



**HAL**  
open science

**CONTRIBUTION A L'AMELIORATION D'UN  
SYSTEME DE PRODUCTION : INTEGRATION DE  
LA METHODE SIX SIGMA ET APPROCHE  
MULTICRITERE D'AIDE A LA DECISION DANS  
SIDELEC INTERNATIONALE**

Lotfi Azzabi

► **To cite this version:**

Lotfi Azzabi. CONTRIBUTION A L'AMELIORATION D'UN SYSTEME DE PRODUCTION : INTEGRATION DE LA METHODE SIX SIGMA ET APPROCHE MULTICRITERE D'AIDE A LA DECISION DANS SIDELEC INTERNATIONALE. Méthodes et statistiques. Université d'Angers, 2010. Français. NNT: . tel-00730543

**HAL Id: tel-00730543**

**<https://theses.hal.science/tel-00730543>**

Submitted on 10 Sep 2012

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

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

**CONTRIBUTION A L'AMELIORATION D'UN SYSTEME DE  
PRODUCTION : INTEGRATION  
DE LA METHODE SIX SIGMA ET APPROCHE  
MULTICRITERE D'AIDE A LA DECISION DANS SIDELEC  
INTERNATIONALE**

THESE DE DOCTORAT EN COTUTELLE

Spécialité : Science de l'ingénieur

ECOLE DOCTORALE D'ANGERS

Spécialité : Méthodes Quantitatives

ECOLE DOCTORALE DE SFAX

Présenté et soutenu publiquement le 1/10/2010

A l'Institut des Sciences et Techniques de l'Ingénieur d'Angers

**Par LOTFI AZZABI**

Devant le jury:

<b>Habib CHABCHOUB</b>	Président	Professeur à l'Institut des Hautes Etudes Commerciales de Sfax.
<b>Zohra CHERFI</b>	Rapporteur	Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne.
<b>Taoufik DJEMAL</b>	Rapporteur	Professeur à l'Université de Gestion de Tunis.
<b>Abdessamad KOBİ</b>	Examineur	Professeur à l'Institut des Sciences et Technologies de l'Ingénieur d'Angers
<b>Younes BOUJELBENNE</b>	Examineur	Professeur à l'Institut Supérieur d'Administration des Affaires de Sfax
<b>Christian ROBLEDO</b>	Examineur	Maître de conférences à l'Institut des Sciences et Technologies de l'Ingénieur d'Angers

Directeurs de thèse : **Pr. Abdessamad KOBİ et Pr. Younes BOUJELBENNE**

Co-encadrant : **Mr. Christian ROBLEDO**

Laboratoire : *LASQUO : Laboratoire en Sécurité de fonctionnement, Qualité et Organisation à l'ISTIA d'Angers.*

*GIAD : Unité de recherche en Gestion Industrielle et Aide à la Décision à FSEG Sfax.*



# Remerciements

J'exprime mes profonds remerciements à mes directeurs de thèse, professeur **Abdessamad KOBİ** et professeur **Younes BOUJELBENNE**, qui m'ont permis d'effectuer cette thèse. Leurs soutiens, leurs confiances et leurs disponibilités m'ont permis de m'épanouir sereinement tout au long de mes travaux.

J'adresse également mes vifs remerciements à Mr **Christian ROBLEDİ** pour son aide, sa disponibilité, ses judicieux conseils pendant toute la durée de ma thèse. Sa patience et sa pédagogie sont exemplaires, son œil critique m'a été très précieux pour guider et structurer ces trois années de travail.

Je remercie aussi Mr **Majdi ChALLOUF** directeur service qualité dans l'entreprise **SİDELEC** pour son accueil sympa, ses aides précieuses pour effectuer ce travail de recherche.

Je ne saurais assez exprimer mes remerciements les plus sincères aux membres de jury qui ont bien accepté d'évaluer ce travail.

Mes remerciements vont à tous les membres du laboratoire **LASQUİ** et **GIAD** qui m'ont accueilli durant ces trois années, L'ambiance chaleureuse est propice un travail efficace.

Je remercie infiniment ma femme **Dorra AYADI** pour ses aides précieuses la compréhension des impératifs qu'entraîne un tel travail, et pour ses encouragements réguliers.



## *Dédicaces*

**Je dédie cette thèse**

**A Dorra et Mohamed Rayen**

**A toute la famille**

**AZZABI**

**Et toute la famille**

**AYADI**



# Table des matières

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 :AIDE METHODOLOGIQUE POUR LA RESOLUTION DES PROBLEMES QUALITE.....</b>	<b>7</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>9</b>
<b>1. Le système de management industriel de la qualité.....</b>	<b>9</b>
<b>1.1. Définition de la qualité.....</b>	<b>9</b>
<b>1.2. L'évolution du concept qualité.....</b>	<b>12</b>
1.2.1 De l'artisan au contrôle unitaire.....	12
1.2.2 Le contrôle statistique de la qualité et la standardisation.....	13
1.2.3 La qualité totale .....	13
<b>1.3. La gestion de la qualité .....</b>	<b>14</b>
<b>2. Les outils de résolution des problèmes qualité .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1. La résolution des problèmes qualité .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2. Définition des outils .....</b>	<b>15</b>
<b>2.3. Classification des outils qualité .....</b>	<b>16</b>
2.3.1 Les outils de première génération .....	17
2.3.2 Les outils de deuxième génération .....	28
<b>2.4. Les outils de la MSP .....</b>	<b>34</b>
2.4.1 Les 5 M du processus .....	37
2.4.2 Les cartes de contrôle .....	38
2.4.3 Interprétation des cartes de contrôle .....	50
2.4.4 La courbe d'efficacité des cartes de contrôle .....	52
2.4.5 La capabilité du processus .....	54
2.4.6 Processus sous contrôle et hors contrôle .....	57
<b>3. Les méthodes d'amélioration de la qualité: Six Sigma .....</b>	<b>58</b>
<b>3.1. Etude et comparaison des méthodes existantes.....</b>	<b>58</b>
<b>3.2. Définition de la méthode Six Sigma .....</b>	<b>61</b>

<b>3.3. Historique de la méthode Six Sigma.....</b>	<b>62</b>
<b>3.4. Pourquoi le Six Sigma .....</b>	<b>63</b>
<b>3.5. Les étapes de la méthode Six Sigma .....</b>	<b>66</b>
3.5.1 Définir.....	66
3.5.2 Mesurer .....	67
3.5.3 Analyser .....	68
3.5.4 Améliorer .....	69
3.5.5 Contrôler .....	70
<b>4. Six Sigma un outil d'amélioration .....</b>	<b>72</b>
<b>4.1. Six Sigma dans un contexte ISO 9000 .....</b>	<b>73</b>
<b>4.2. Six Sigma dans un environnement Lean management.....</b>	<b>74</b>
<b>4.3. Intégrer Six Sigma dans une démarche de performance industrielle.....</b>	<b>76</b>
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>77</b>
<b>CHAPITRE 2 : L'APPROCHE MULTICRITERE D'AIDE A LA</b>	
<b>DECISION .....</b>	<b>79</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>81</b>
<b>1. Définition et concept fondamentaux.....</b>	<b>82</b>
<b>1.1. Aide à la décision .....</b>	<b>82</b>
<b>1.2. Type de la problématique de décision .....</b>	<b>84</b>
<b>1.3. Les actions .....</b>	<b>84</b>
<b>1.4. Le paradoxe de Condorcet .....</b>	<b>85</b>
<b>1.5. Types de critères.....</b>	<b>86</b>
<b>2. Panorama des méthodes multicritère.....</b>	<b>87</b>
<b>2.1. Les méthodes élémentaires .....</b>	<b>88</b>
2.1.1 La méthode catégorique .....	88
2.1.2 Le cost ratio method .....	89
2.1.3 Méthode de la somme pondérée .....	89
2.1.4 Méthode conjonctive .....	90
2.1.5 Méthode disjonctive .....	90

2.1.6	Méthode de MaxMin .....	91
2.1.7	Méthode Lexicographique .....	91
<b>2.2.</b>	<b>Les méthodes d'optimisation mathématiques .....</b>	<b>92</b>
2.2.1	Goal Programming .....	93
2.2.2	La méthode du critère globale .....	94
2.2.3	La programmation mathématique à objectif multiple .....	94
2.2.4	$\epsilon$ - Constraint Method .....	95
2.2.5	Compromise programming .....	95
<b>2.3.</b>	<b>Les méthodes d'aide à la décision multicritère .....</b>	<b>96</b>
2.3.1	Méthode de l'approche du critère unique de synthèse .....	97
2.3.2	Les méthodes de l'approche de surclassement .....	108
<b>3.</b>	<b>Procédure de choix d'une méthode multicritère d'aide à la décision .....</b>	<b>123</b>
<b>3.1.</b>	<b>Caractérisation des inputs .....</b>	<b>125</b>
<b>3.2.</b>	<b>Caractérisation des outputs.....</b>	<b>126</b>
<b>3.3.</b>	<b>Procédure de choix d'une méthode de sélection.....</b>	<b>127</b>
<b>4.</b>	<b>Critique des méthodes d'aide à la décision multicritère et d'optimisation mathématique multicritère .....</b>	<b>129</b>
<b>4.1.</b>	<b>Avantages et inconvénients des méthodes d'aide à la décision multicritère.....</b>	<b>129</b>
<b>4.2.</b>	<b>Avantages et inconvénients des méthodes d'optimisation mathématique multicritère.....</b>	<b>131</b>
	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>132</b>
	<b>CHAPITRE 3 : CONSTRUCTION D'UNE DEMARCHE SIX SIGMA BASE SUR L'APPROCHE MULTICRITERE D'AIDE A LA DECISION POUR L'AMELIORATION D'UN SYSTEME DE PRODUCTION .....</b>	<b>133</b>
	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>134</b>
<b>1.</b>	<b>Démarche de recherche .....</b>	<b>135</b>
<b>2.</b>	<b>La proposition d'une méthode Six Sigma et approche multicritère d'aide à la décision .....</b>	<b>137</b>

<b>2.1. Etape 1 : Définir .....</b>	<b>137</b>
2.1.1 La conduite de l'étape.....	137
2.1.2 Identifier les CTQ .....	138
<b>2.2. Etape 2 : Mesurer .....</b>	<b>142</b>
2.2.1 La conduite de l'étape.....	148
2.2.2 Le concept de la capabilité(aptitude) .....	149
<b>2.3. Etape 3 : Analyser .....</b>	<b>150</b>
2.3.1 Les causes de variation .....	151
2.3.2 La méthode MACBETH.....	153
<b>2.4. Etape 4 : Innover/Améliorer .....</b>	<b>153</b>
2.4.1 La génération des solutions.....	153
2.4.2 Contribution à l'élaboration d'une démarche globale d'aide à la décision pour améliorer un processus de production .....	154
<b>2.5. Etape 5 : Contrôler.....</b>	<b>165</b>
2.5.1 Les différentes natures de contrôle de variable .....	166
2.5.2 Les cartes de contrôles .....	168
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>170</b>
<b>CHAPITRE 4 : LA FONCTION DE PRODUCTION DANS LES ENTREPRISES DE FABRICATION DES FAISCEAUX DE CABLES ELECTRIQUES POUR LE SECTEUR INDUSTRIEL AUTOMOBILE .....</b>	<b>171</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>173</b>
<b>1. Le développement d'entreprise des faisceaux de câbles électriques automobiles .....</b>	<b>173</b>
<b>1.1. Pourquoi ce développement.....</b>	<b>174</b>
1.1.1 Mondialisation et globalisation de la concurrence.....	174
1.1.2 Accélération des changements.....	175
1.1.3 Nécessité d'innover.....	175
<b>1.2. Caractéristiques des entreprises des faisceaux des câbles électriques automobiles .....</b>	<b>176</b>

<b>2. L'amélioration d'un système de production complexe.....</b>	<b>178</b>
<b>2.1. Définition d'un système .....</b>	<b>178</b>
<b>2.2. Les systèmes complexes .....</b>	<b>179</b>
<b>2.3. La théorie générale des systèmes de Bertalanffy.....</b>	<b>181</b>
<b>2.4. Qu'est ce que c'est un système de production .....</b>	<b>183</b>
2.4.1 Les objectifs associés à la fonction de production.....	184
2.4.2 Les modèles de gestion de production .....	186
2.4.3 Structure de production multi-niveaux.....	186
<b>3. Le système de fabrication .....</b>	<b>188</b>
<b>3.1. La maîtrise des systèmes de production.....</b>	<b>188</b>
<b>3.2. Diversité des systèmes de production .....</b>	<b>189</b>
<b>3.3. Les critères d'évaluation d'un système de production .....</b>	<b>191</b>
<b>3.4. Les méthodes analytiques .....</b>	<b>192</b>
<b>3.5. Analyse qualitative et analyse quantitative .....</b>	<b>193</b>
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>194</b>
<b>CHAPITRE 5: APPLICATION INDUSTRIELLE .....</b>	<b>195</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>197</b>
<b>1. Entreprise SIDELEC international.....</b>	<b>197</b>
<b>1.1. Présentation de SIDELEC international .....</b>	<b>197</b>
<b>1.2. Organigramme de l'entreprise.....</b>	<b>199</b>
<b>1.3. Etude et présentation de l'existant .....</b>	<b>199</b>
1.3.1 Présentation des différents services au sein de SIDELEC international .....	199
1.3.2 Description du flux informationnel entre ces services .....	200
<b>1.4. Processus de fabrication .....</b>	<b>202</b>
1.4.1 L'opération de sertissage .....	202
1.4.2 L'épissure .....	203
1.4.3 L'encliquetage.....	203
1.4.4 L'habillage.....	204
1.4.5 Le montage des agrafes .....	204

1.4.6	La soudure ultrason .....	205
1.4.7	Le contrôle électrique .....	205
<b>1.5.</b>	<b>Découpage de l'atelier de production par zones .....</b>	<b>206</b>
1.5.1	Zone de coupe .....	206
1.5.2	Zone de préparation.....	206
1.5.3	Zone d'assemblage.....	207
<b>2.</b>	<b>Présentation des produits de l'entreprise SIDELEC international .....</b>	<b>208</b>
<b>3.</b>	<b>Expérimentation du modèle pour l'amélioration du processus de production (processus coupe) sous l'initiative de l'application de la méthode six sigma et approche multicritère d'aide à la décision.....</b>	<b>211</b>
<b>3.1.</b>	<b>Construction de la démarche à suivre.....</b>	<b>212</b>
<b>3.2.</b>	<b>Etape 1: Définir .....</b>	<b>214</b>
3.2.1	Principe de fonctionnement .....	214
3.2.2	Description des 5M et identification des problèmes .....	218
3.2.3	Définir l'objectif à atteindre.....	226
<b>3.3.</b>	<b>Etape 2 : Mesurer .....</b>	<b>227</b>
3.3.1	Etude de l'aptitude du processus coupe.....	228
3.3.2	Cartes de contrôle .....	230
3.3.3	Capabilité de procédé de processus coupe .....	231
3.3.4	La capabilité de la machine KOMAX cm et cmk .....	232
<b>3.4.</b>	<b>Etape 3 : Analyser .....</b>	<b>234</b>
3.4.1	Identification des causes de dysfonctionnement .....	234
3.4.2	Application de la méthode MACBETH .....	237
<b>3.5.</b>	<b>Etape 4 : Améliorer .....</b>	<b>238</b>
3.5.1	La génération des solutions.....	239
3.5.2	La prise de décision.....	242
3.5.3	Analyse des relations inter décisionnelles .....	244
3.5.4	Analyse d'impact des cinq décisions .....	244
3.5.5	Démarche d'aide à la décision.....	258

3.5.6 Application numérique.....	285
<b>3.6. Etape : Contrôler.....</b>	<b>297</b>
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>299</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>301</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>305</b>
<b>ANNEXE 1 .....</b>	<b>319</b>
<b>ANNEXE 2 .....</b>	<b>320</b>
<b>ANNEXE 3 .....</b>	<b>321</b>
<b>ANNEXE 4 .....</b>	<b>322</b>
<b>ANNEXE 5 .....</b>	<b>334</b>
<b>ANNEXE 6 .....</b>	<b>343</b>



## Liste des figures

Figure 1 : L'évolution du concept de la qualité.....	14
Figure 2 : Matrice des fréquences.....	18
Figure 3 : Diagramme de pareto.....	18
Figure 4 : Les 5M d'ishikawa.....	19
Figure 5: Représentation d'un Diagramme d'ishikawa.....	19
Figure 6 : Représentation des feuilles de relevées.....	20
Figure7 : Représentation d'un histogramme de répartition de la masse des rations alimentaires.....	23
Figure 8 : Représentation d'un Diagramme des affinités.....	24
Figure 9 : Représentation d'un diagramme des relations.....	25
Figure 10 : Représentation d'un diagramme de décision.....	27
Figure 11 : Représentation du diagramme sagittal.....	28
Figure 12 : Matrice QFD «maison de la qualité».....	29
Figure 13 : Graphe des effets des facteurs.....	30
Figure 14 : Graphe des effets des interactions.....	31
Figure 15 : Les types d'AMDEC.....	32
Figure 16 : Diagramme pieuvre.....	33
Figure 17 : Les causes communes et les causes spéciales.....	35
Figure 18 : Démarche générale de la MSP.....	36
Figure 19 : Carte de contrôle $\bar{X}$ .....	40
Figure 20 : Carte de contrôle R.....	41
Figure 21 : Carte de contrôle P.....	43
Figure 22 : Carte de contrôle MA.....	47
Figure 23 : Carte de contrôle EWMA.....	48
Figure 24 : Carte de contrôle T2.....	49
Figure 25 : Représentation graphique d'un Modèle normal.....	50

Figure 26 : Représentation graphique d'un Modèle contient des causes assignables.....	50
Figure 27 : Représentation graphique d'un Modèle contient une série de 8 points.....	50
Figure 28 : Représentation graphique d'un Modèle contient une tendance centrale .....	51
Figure 29 : Représentation graphique d'un Modèle contient la présence de cycles de points au voisinage des limites supérieure et inférieure .....	51
Figure 30 : Courbe d'efficacité.....	53
Figure 31 : Les situations de la capabilité du processus.....	54
Figure 32 : La figure indices Cp.....	55
Figure 33 : La figure indices Cpk .....	56
Figure 34 : Processus sous contrôle et processus hors contrôle.....	57
Figure 35 : La méthode Six Sigma .....	64
Figure 36 : Étape définir.....	67
Figure 37 : Étape Mesurer.....	68
Figure 38 : Étape Analyser .....	69
Figure 39 : Étape Améliorer.....	70
Figure 40 : Étape contrôler.....	71
Figure 41 : Six Sigma et la réduction de la variabilité.....	72
Figure 42 : Réduction des cycles de production avec Lean Six Sigma.....	75
Figure 43 : Le vrai critère.....	86
Figure 44 : Le quasi critère .....	86
Figure 45 : Le pré- critère.....	86
Figure 46 : Illustration des distances à l'idéal et à l'anti-idéal .....	98
Figure 47 : Matrice de décision .....	101
Figure 48 : Matrice des fonctions de valeur partielle .....	101
Figure 49 : Structure hiérarchique d'un problème selon la méthode AHP ....	105
Figure 50 : Différents types de critères .....	113

Figure 51 : <b>La procédure MACBETH</b> .....	121
Figure 52 : <b>Philosophie Six Sigma</b> .....	134
Figure 53 : <b>Six Sigma et outils multicritères d'aide à la décision</b> .....	136
Figure 54 : <b>Différents types d'états de processus</b> .....	136
Figure 55 : <b>Présentation des outils de mesure</b> .....	144
Figure 56 : <b>Distribution normale et aires de probabilité</b> .....	145
Figure 57 : <b>Comparaison des distributions</b> .....	146
Figure 58 : <b>Les trois étapes principales de la démarche d'intégrité</b> .....	156
Figure 59 : <b>Architecture des faisceaux de câblages automobile</b> .....	169
Figure 60 : <b>Topologie d'un système complexe</b> .....	176
Figure 61 : <b>Processus de production</b> .....	180
Figure 62 : <b>Différences entre causes communes et causes spéciales</b> .....	184
Figure 63 : <b>Réseau de fabrication internationale de SIDELEC</b> .....	198
Figure 64 : <b>Organigramme de l'entreprise</b> .....	199
Figure 65 : <b>Cartographie des processus de l'entreprise</b> .....	202
Figure 66 : <b>Opération de sertissage</b> .....	203
Figure 67 : <b>Opération d'épissure</b> .....	203
Figure 68 : <b>Opération d'encliquetage</b> .....	203
Figure 69 : <b>Habillage continue</b> .....	204
Figure 70 : <b>Habillage discontinue</b> .....	204
Figure 71 : <b>Schéma d'une agrafe</b> .....	205
Figure 72 : <b>Soudure ultrason</b> .....	205
Figure 73 : <b>Diagramme de flux de production</b> .....	207
Figure 74 : <b>Différents cycles de production</b> .....	208
Figure 75 : <b>Architectures câblage d'une automobile</b> .....	211
Figure 76 : <b>Etat méthodologique de la démarche à suivre</b> .....	212
Figure 77 : <b>Approche Six Sigma et approche multicritère d'aide à la décision</b> .....	213
Figure 78 : <b>Logigramme processus coupe sertissage marquage</b> .....	217

Figure 79 : Logigramme processus coupe sertissage marquage_New1 .....	218
Figure 80 : Lay-out Usine .....	218
Figure 81 : Graphique d'Ishikawa pour les problèmes de M1 .....	220
Figure 82 : Graphique d'Ishikawa pour les problèmes de M1 et M2 .....	223
Figure 83 : Graphique d'Ishikawa pour les problèmes de M1, M2 et M3 .....	224
Figure 84 : Graphique d'Ishikawa pour les problèmes de M1, M2, M3 et M4	225
Figure 85 : Graphique d'Ishikawa pour les problèmes de M1, M2, M3, M4 et M5 .....	226
Figure 86 : Démarche de réorganisation.....	227
Figure 87 : Droite de Henri .....	229
Figure 88 : Carte de contrôle individuel .....	230
Figure 89 : Carte EWMA pour la surveillance du processus coupe .....	231
Figure 90 : Capacité du processus coupe avant Six Sigma.....	232
Figure 91 : Résultat d'application de la méthode MACBETH.....	237
Figure 92 : Classement des causes .....	238
Figure 93 : Proposition des critères de choix.....	242
Figure 94 : Représentation graphique d'analyse d'impact de M1 .....	246
Figure 95 : Représentation graphique d'analyse d'impact de M2 .....	249
Figure 96 : Représentation graphique d'analyse d'impact de M3 .....	251
Figure 97 : Représentation graphique d'analyse d'impact de M4 .....	253
Figure 98 : Représentation graphique d'analyse d'impact de M5 .....	256
Figure 99 : Les impacts inter décisionnelles .....	258
Figure 100 : Démarche d'aide à la décision .....	259
Figure 101 : Structure hiérarchique du problème .....	261
Figure 102 : Comparaison par paires des critères .....	262
Figure 103 : Vecteur propre correspondant au critère « Qualité du milieu de travail».....	262
Figure 104 : Vecteur propre correspondant au critère « Coût d'amélioration du milieu» .....	263

Figure 105 : Vecteur propre correspondant au critère « Durée».....	263
Figure 106 : Performance des actions .....	264
Figure 107 : Classement finale des solutions de M1.....	265
Figure 108 : Structure hiérarchique du problème .....	266
Figure 109 : Comparaison par paires des critères .....	267
Figure 110 : Vecteur propre correspondant au critère «Maintenance ».....	267
Figure111 : Vecteur propre correspondant au critère «Coût d'amélioration du matériel» .....	268
Figure 112 : Vecteur propre correspondant au critère «Durée ».....	268
Figure 113 : Performance des actions .....	269
Figure 114 : Classement finale des solutions de M2.....	270
Figure 115 : Structure hiérarchique du problème .....	271
Figure 116 : Comparaison par paires des critères .....	271
Figure117 : Vecteur propre correspondant au critère «Les avantages concurrentiels.....	272
Figure 118 : Vecteur propre correspondant au critère «Coût d'amélioration de la méthode» .....	272
Figure 119 : Vecteur propre correspondant au critère «Durée ».....	273
Figure 120 : Performance des actions .....	274
Figure 121 : Classement final des solutions de M3 .....	274
Figure 122 : Structure hiérarchique du problème .....	276
Figure 123 : Comparaison par paires des critères .....	276
Figure 124 :Vecteur propre correspondant au critère «Formation et sensibilisation de l'ouvrier».....	277
Figure 125 : Vecteur propre correspondant au critère «Coût d'amélioration de la main d'œuvre».....	277
Figure 126 : Vecteur propre correspondant au critère « Durée ».....	278
Figure 127 : Performance des actions .....	279
Figure 128 : Classement final des solutions de M4 .....	279

Figure 129 : Structure hiérarchique du problème .....	281
Figure 130 : Comparaison par paires des critères .....	281
Figure 131 : Vecteur propre correspondant au critère « Coût d'amélioration de la matière».....	282
Figure 132 : Vecteur propre correspondant au critère « Durée ».....	282
Figure 133 : Performance des actions .....	283
Figure 134 : Classement final des solutions de M5 .....	284
Figure 135 : Interaction entre les décisions .....	291
Figure 136 : les modalités de calcul des valeurs Uijd qui correspondent à la décision d'améliorer M1 .....	295
Figure 137 : Représentation graphique des résultats optimaux .....	296
Figure 138 : Carte EWMA pour la surveillance du processus coupe après Six Sigma.....	297
Figure 139 : Capabilité de processus après Six Sigma.....	298

## Liste des tableaux

Tableau 1 : <b>La feuille de relevés</b> .....	20
Tableau 2 : <b>Mesure des rations alimentaires</b> .....	22
Tableau 3 : <b>Représentation schématique du diagramme multicritère</b> .....	26
Tableau 4 : <b>Matrice de l'AMDEC</b> .....	32
Tableau 5 : <b>Tableau fonctionnel</b> .....	33
Tableau 6 : <b>Les règles de pilotages des cartes de contrôles</b> .....	52
Tableau 7 : <b>Rapprochement des méthodes de résolutions des problèmes Six Sigma</b> .....	61
Tableau 8 : <b>Echelle de Saaty</b> .....	106
Tableau 9 : <b>Ratios aléatoires</b> .....	107
Tableau 10 : <b>Catégorie de jugement</b> .....	122
Tableau 11 : <b>Matrice des jugements du décideur par rapport au critère qualité</b> .....	122
Tableau 12 : <b>Classification des MADMC selon la matrice inputs/outputs</b> .....	124
Tableau 13 : <b>Caractérisation des inputs</b> .....	125
Tableau 14 : <b>Caractérisation des outputs</b> .....	126
Tableau 15 : <b>Tableau comparatif des MOM et des MADMC</b> .....	127
Tableau 16 : <b>Positionnement des méthodes d'optimisation mathématique sur la matrice inputs/outputs</b> .....	128
Tableau 17 : <b>Les avantages et inconvénients des méthodes d'aides à la décision multicritère</b> .....	130
Tableau 18 : <b>Les avantages et inconvénients des méthodes d'optimisation mathématique multicritère</b> .....	131
Tableau 19 : <b>Charte du projet</b> .....	141
Tableau 20 : <b>Les mesures de processus</b> .....	143
Tableau 21 : <b>La matrice A du modèle de programmation linéaire 0-1</b> .....	162
Tableau 22 : <b>classification des causes communes</b> .....	166

Tableau 23 : Les causes de dysfonctionnement de M1.....	235
Tableau 24 : Les causes de dysfonctionnement de M2.....	235
Tableau 25 : Les causes de dysfonctionnement de M3.....	236
Tableau 26 : Les causes de dysfonctionnement de M4.....	236
Tableau 27 : Les causes de dysfonctionnement de M5.....	236
Tableau 28 : Génération des solutions proposées.....	240
Tableau 29 : Tableaux des abréviations.....	241
Tableau 30 : Classification des solutions de chaque M.....	284
Tableau 31 : Solutions pour M1.....	285
Tableau 32 : Solutions pour M2.....	285
Tableau 33 : Solutions pour M3.....	285
Tableau 34 : Solutions pour M4.....	285
Tableau 35 : Solutions pour M5.....	285
Tableau 36 : Les utilités de la solution 1 pour les cinq M simultanément.....	286
Tableau 37 : Les utilités de la solution 2 pour les cinq M simultanément.....	286
Tableau 38 : Les utilités de la solution 3 pour les cinq M simultanément.....	286
Tableau 39 : Les utilités de la solution 4 pour les cinq M simultanément.....	286
Tableau 40 : Les utilités de la solution 5 pour les cinq M simultanément.....	286
Tableau 41 : Les utilités de la solution 1 pour les cinq M simultanément.....	286
Tableau 42 : Les utilités de la solution 2 pour les cinq M simultanément.....	286
Tableau 43 : Les utilités de la solution 3 pour les cinq M simultanément.....	286
Tableau 44 : Les utilités de la solution 4 pour les cinq M simultanément.....	287
Tableau 45 : Les utilités de la solution 5 pour les cinq M simultanément.....	287
Tableau 46 : Les utilités de la solution 1 pour les cinq M simultanément.....	287
Tableau 47 : Les utilités de la solution 2 pour les cinq M simultanément.....	287
Tableau 48 : Les utilités de la solution 3 pour les cinq M simultanément.....	287
Tableau 49 : Les utilités de la solution 4 pour les cinq M simultanément.....	287
Tableau 50 : Les utilités de la solution 5 pour les cinq M simultanément.....	287
Tableau 51 : Les utilités de la solution 1 pour les cinq M simultanément.....	287

Tableau 52 : Les utilités de la solution 2 pour les cinq M simultanément.....	288
Tableau 53 : Les utilités de la solution 3 pour les cinq M simultanément.....	288
Tableau 54 : Les utilités de la solution 4 pour les cinq M simultanément.....	288
Tableau 55 : Les utilités de la solution 5 pour les cinq M simultanément. ....	288
Tableau 56 : Les utilités de la solution 1 pour les cinq M simultanément.....	288
Tableau 57 : Les utilités de la solution 2 pour les cinq M simultanément.....	288
Tableau 58 : Les utilités de la solution 3 pour les cinq M simultanément .....	288
Tableau 59 : Les utilités de la solution 4 pour les cinq M simultanément .....	288
Tableau 60 : Les utilités de la solution 5 pour les cinq M simultanément .....	288
Tableau 61 : Nombre des solutions pour chaque M.....	289
Tableau 62 : Les solutions optimaux pour d=1.....	289
Tableau 63 : Les solutions optimaux pour d=2.....	289
Tableau 64 : Les solutions optimaux pour d=3.....	289
Tableau 65 : Les solutions optimaux pour d=4.....	290
Tableau 66 : Les solutions optimaux pour d=5.....	290
Tableau 67 : Les critères des décisions.....	290
Tableau 68 : Les poids des critères des 5 décisions .....	292
Tableau 69 : Evaluation du critère A de M1.....	293
Tableau 70 : Evaluation du critère B de M1.....	293
Tableau 71 : Evaluation du critère A de M2.....	293
Tableau 72 : Evaluation du critère B de M2.....	293
Tableau 73 : Evaluation du critère A de M3.....	293
Tableau 74 : Evaluation du critère B de M3.....	293
Tableau 75 : Evaluation du critère A de M4.....	294
Tableau 76 : Evaluation du critère B de M4.....	294
Tableau 77 : Evaluation du critère A de M5.....	294
Tableau 78 : Evaluation du critère B de M5.....	294
Tableau 79 : Echelle d'évaluation des critères.....	294

## Liste des photos

Photo 1 : <b>Table d'assemblage</b> .....	177
Photo 2 : <b>Opération de contrôle</b> .....	177
Photo 3 : <b>Opération d'assemblage</b> .....	177
Photo 4 : <b>Machine de contrôle électrique</b> .....	206
Photo 5 : <b>Table d'assemblage</b> .....	207
Photo 6 : <b>Câble batterie</b> .....	209
Photo 7 : <b>Les produits de l'entreprise SIDELEC INTERNATIONAL</b> .....	210
Photo 8 : <b>Zone de coupe</b> .....	219
Photo 9 : <b>La machine Komax</b> .....	221
Photo 10 : <b>La surface utilisateur</b> .....	221
Photo 11 : <b>La configuration sertissage</b> .....	222
Photo 12 : <b>La tête de coupe Gamma 255</b> .....	222

# Introduction Générale

Depuis plusieurs années, le contexte de mondialisation et l'accroissement de la concurrence ont défini un nouvel ordre économique et industriel pour les entreprises de production de biens. En effet, ces entreprises sont quotidiennement confrontées à la maîtrise et à l'amélioration des performances de l'ensemble de leurs processus afin de garantir leur pérennité et leur compétitivité.

En raison de l'ouverture des marchés et de la concurrence accrue, plusieurs phénomènes concourants ont lieu.

Tout d'abord, le phénomène le plus notable concerne l'attente des clients de plus en plus forte, non seulement en ce qui concerne le prix et la qualité, mais également sur l'innovation des produits ainsi que sur leur disponibilité.

Nous pouvons aussi noter d'autres phénomènes comme la personnalisation des produits à grande échelle (mass-customization), la mondialisation des marchés (clients et fournisseurs) et les délocalisations qui peuvent avoir un effet néfaste sur le phénomène d'aide à la décision au sein de l'entreprise.

En effet, l'activité d'aide à la décision est une activité faite par tous presque chaque jour. Nous prenons des décisions sans arrêt. Des plus simples aux plus complexes ; À tous les niveaux: individuel, organisationnel, inter-organisationnel.

L'aide à la décision déborde aujourd'hui le strict cadre du décideur traditionnel qui s'isole pour prendre une décision. Ainsi, l'aide à la de décision au sein des organisations nécessite une synergie d'efforts de plusieurs membres ayant différents intérêts, compétences et expériences afin que chacun d'eux mette à contribution son savoir-faire. D'ailleurs, c'est grâce à cette synergie que les membres peuvent atteindre des résultats supérieurs à ceux qu'ils auraient pu réaliser individuellement [POOLE D. 1992].

Aussi, la recherche de la qualité est devenue un point-clé et un autre créneau de la compétition du fait de l'importance de l'offre par rapport à la demande. Ainsi, l'obtention de la qualité des services et des produits passe le plus souvent par la mise en place d'un système d'assurance qualité et par l'utilisation des outils de la qualité tant au niveau de la conception qu'au niveau de la réalisation des produits.

De plus la qualité est actuellement, et pour longtemps encore, au centre des préoccupations des organismes industriels, qui fournissent des produits destinés à satisfaire les besoins des clients. Face à tous ces phénomènes, dans le domaine de production un des objectifs de la

recherche est de trouver des méthodes formelles d'analyse et de modélisation des procédés industriels afin de faciliter leur pilotage.

D'un point de vue stratégique, la qualité est considérée comme une démarche globale dans l'entreprise devant assurer la satisfaction de l'ensemble de ses partenaires. Ce niveau intègre toutes les activités qualité relatives à l'amélioration de la performance globale, à la certification selon la norme ISO 9000 ainsi qu'au management de la qualité en tant que démarche [DEEB S. 2008].

Du point de vue tactique, le processus qualité opère à ce niveau plus spécifiquement sur les processus de type techniques tels que la production et la maintenance. Il contient des activités relatives à la maîtrise de la qualité des produits et la qualité de processus de production au sens large [DEEB S. 2008]. Ces activités peuvent être mesurées par exemple en utilisant le Balanced Scorecard. Le Balanced Scorecard (ou le tableau de bord prospectif) est un outil de contrôle de gestion qui ne se limite pas aux indicateurs financiers, il permet ainsi aux organisations de clarifier leurs visions globales et leurs stratégies en les transformant en actions réalisables et quantifiables. Il permet aux exécutants de transformer les objectifs stratégiques en indicateurs mesurables. Il peut être un outil de réalisation de stratégie ou d'élaboration et conception de stratégie [KAPLAN R. et al 2001].

Enfin, le point de vue opérationnel a pour objectif de mettre en place les moyens et les actions pour vérifier que les résultats des processus techniques sont conformes aux exigences spécifiées en terme de qualité, réaliser les contrôles et traiter les non-conformités. Cette activité doit être coordonnée avec les activités du niveau tactique [DEEB S. 2008]. En effet un produit final complexe est généralement le résultat de plusieurs combinaisons et/ou de transformations physico-chimiques, dans différentes phases, de plusieurs produits intermédiaires. La performance globale du procédé et la qualité de sa production dépendent d'une part des caractéristiques des produits intermédiaires et d'autre part des paramètres de fonctionnement de processus.

En effet les travaux antérieurs réalisés dans le contexte de notre recherche tels que ceux de [DUCLOS E. et al 1997] « la contribution à la maîtrise statistique des procédés : cas des procédés non normaux », montrant que l'utilisation de méthodes non paramétriques, permet de fournir une solution qui soit applicable pour un vaste ensemble de lois. Il s'est intéressé à des estimateurs construits à partir de statistiques d'ordre. Le but est de mettre en place une carte de contrôle de type Shewhart, utilisant le L-estimateur des moindres carrés, dont l'une des caractéristiques est de fournir une estimation sans biais à variance minimale quelle que

soit la loi des observations. De son côté, [BASSETTO S. 2005] présente dans ses travaux de recherche une problématique de recherche liée à la difficulté de mise en place d'une démarche qualité d'amélioration continue. Les études de cas menées s'appuient sur des besoins opérationnels. Elles ont permis d'explorer la façon dont il fallait s'y prendre pour qualifier et améliorer les moyens de production et ce, de manière opérationnelle, dynamique, en supportant les connaissances métiers.

Vers la fin de la seconde guerre mondiale, un courant important voit le jour avec le développement d'outils d'optimisation mathématique (la recherche opérationnelle). L'idée directrice consiste ici à tenter d'optimiser des décisions en s'appuyant sur des simulations et optimisations a priori. Bien que ces méthodes séduisent largement les chercheurs et consultants, elles n'intègrent que lentement les sphères décisionnelles des entreprises.

En plus de ces travaux, [VERRON S. 2007] propose dans ses travaux de recherches une méthode de surveillance complète, basée sur un outil de classification particulier : le réseau bayésien. Il a proposé un algorithme de sélection de variables basé sur un nouveau résultat concernant l'information mutuelle. Ensuite, il a proposé une méthode de diagnostic non supervisée pour identifier une structure complète d'un réseau bayésien dédié à la surveillance des procédés.

Les problèmes économiques actuels sont devenus très complexes pour qu'une seule personne puisse les appréhender dans leur globalité. Le temps est passé où un stratège d'entreprise avait la capacité de s'informer et de comprendre seul son environnement. L'entreprise doit donc organiser ses activités de façon plus globale. Dans un environnement toujours plus confus où la visibilité se réduit, où toute prospective est fragile, la stratégie d'une entreprise doit s'appuyer sur une surveillance bien organisée et particulière dans la fonction production.

Dans de telles situations nous proposons de suivre la variabilité du processus par l'intégration de la méthode Six Sigma, afin de détecter toute preuve de changement significatif de la variabilité. Notre recherche s'inscrit dans une logique d'améliorer un système de production complexe par la méthode Six Sigma et l'Approche Multicritère d'aide à la décision.

La mise en place d'une approche **Six Sigma** constitue une approche globale de l'amélioration de la qualité du produit et des services rendus aux clients. L'objectif principal de Six Sigma est d'augmenter la rentabilité de l'entreprise en réduisant le gaspillage, tout en ayant l'intérêt du client à cœur. Elle est aussi une mesure statistique de la performance des processus qui permet de déterminer avec une grande précision la qualité des produits ou services. Un niveau de performance Six Sigma correspond à 3,4 erreurs par million de transactions.

La nouveauté réside plutôt dans le fait qu'elle apporte une nouvelle philosophie de gestion au niveau de l'entreprise et dans l'application des outils multicritères d'aide à la décision.

Cette philosophie vise à mettre en place une culture d'entreprise orientée client et qui se base sur des faits concrets et des données pour l'aide à la décision. De plus, Six Sigma s'appuie sur une infrastructure d'agents de changement qui travaillent dans tous les départements de l'entreprise, pas uniquement dans un « département Qualité ». Ces individus sont appelés Green Belt (personnes à temps partiel), Black Belt (personnes à temps plein), et Master Black Belt (gestionnaires chevronnés en stratégie d'amélioration des processus). Enfin, les efforts d'amélioration sont toujours organisés en projets selon le modèle DMAIC qui signifie en anglais « Define, Measure, Analyze, Improve, Control » ou en français DMAAC : Définir, Mesurer, Analyser, Améliorer, Contrôler.

De plus, nous considérons qu'une approche mono-décideur n'est pas à l'abri de plusieurs reproches. D'une part, elle ne reflète pas les réalités concernant le processus d'aide à la décision (conflits et influences) dans une étape de la méthode Six Sigma DMAAC. D'autre part dans la pratique, on constate que la plupart des décisions se font dans le cadre d'une décision de groupe, que se soit pour :

- Définir : déterminer le problème à résoudre, mesurer comprendre l'ampleur du problème ;
- Analyser : trouver les causes et les confirmer de façon statistique ;
- Améliorer : éliminer les causes du problème et améliorer la performance du processus ;
- Contrôler : mettre en place des mécanismes afin d'assurer que la nouvelle performance ne se détériore pas.

Se pose alors le problème de l'évaluation des actions aux yeux de critères et de la pondération des critères. Dans certaines situations la définition même de critères est remise en question ; chacun tient compte de ses propres critères dans son système de valeurs (subjectivité, ignorance). L'idée est de formuler le problème dans le cadre d'une approche multicritère d'aide à la décision (**A.M.C**).

Par la suite, sur la base du degré d'importance et du rôle primordial de la méthode Six Sigma, notre **problématique** qui recoupe la mission d'amélioration d'un système de production est la suivante:

*« Comment améliorer un système de production complexe par la méthode Six Sigma et A.M.C.? »*

Pour répondre simultanément à cette question, **notre contribution** porte sur la proposition d'une approche Six Sigma et une approche multicritère d'aide à la décision permettant d'améliorer un processus de production complexe.

L'objectif de notre travail de recherche, est de fournir une vision opérationnelle, structurée à travers l'intégration de la méthode Six Sigma basée sur les outils multicritères d'aide à la décision afin d'améliorer un système de production. Il s'agit de comprendre et savoir comment optimiser les processus de production dans le but de réduire le nombre de défauts et la variabilité des processus.

Notre contribution est ainsi exposée dans ce manuscrit sous la forme de 5 chapitres complémentaires. Le premier chapitre nous permet de présenter l'évolution méthodologique qui s'est opérée en matière de résolution de problèmes depuis l'avènement des cercles qualité. Nous analyserons ainsi l'adéquation de ces outils et méthodes qualité. Le deuxième chapitre décrit une revue de la littérature sur les outils multicritères d'aide à la décision. Le troisième chapitre nous permet de visualiser le modèle de notre travail de recherche. Le quatrième chapitre nous permet de visualiser le concept de la fonction production dans les entreprises de production des câbles électriques pour le secteur industriel automobile, afin de cerner les contraintes à prendre en compte pour la proposition d'une démarche de résolution de problèmes adaptée. Enfin, dans le cinquième chapitre nous exposerons l'application industrielle de la démarche proposée dans l'entreprise SIDILEC international.



# Chapitre 1

## Aide méthodologique pour la résolution des problèmes qualité

### Sommaire

---

INTRODUCTION .....	9
1. Le système de management industriel de la qualité.....	9
1.1. Définition de la qualité .....	9
1.2. L'évolution du concept qualité.....	12
1.2.1 De l'artisan au contrôle unitaire .....	12
1.2.2 Le contrôle statistique de la qualité et la standardisation.....	13
1.2.3 La qualité totale .....	13
1.3. La gestion de la qualité .....	14
2. Les outils de résolution des problèmes qualité.....	15
2.1. La résolution des problèmes qualité .....	15
2.2. Définition des outils.....	15
2.3. Classification des outils qualité.....	16
2.3.1 Les outils de première génération .....	17
2.3.2 Les outils de deuxième génération .....	28
2.4. Les outils de la MSP .....	34
2.4.1 Les 5 M du processus.....	37
2.4.2 Les cartes de contrôle .....	38
2.4.3 Interprétation des cartes de contrôle .....	50
2.4.4 La courbe d'efficacité des cartes de contrôle .....	52
2.4.5 La capabilité du processus .....	54
2.4.6 Processus sous contrôle et processus hors contrôle .....	57

3. Les méthodes d'amélioration de la qualité: Six Sigma .....	58
3.1. Etude et comparaison des méthodes existantes .....	58
3.2. Définition de la méthode Six Sigma.....	61
3.3. Historique de la méthode Six Sigma .....	62
3.4. Pourquoi le Six Sigma .....	63
3.5. Les étapes de la méthode Six Sigma.....	66
3.5.1 Définir .....	66
3.5.2 Mesurer .....	67
3.5.3 Analyser .....	68
3.5.4 Améliorer .....	69
3.5.5 Contrôler .....	70
4. Six Sigma un outil d'amélioration.....	72
4.1. Six Sigma dans un contexte ISO 9000.....	73
4.2. Six Sigma dans un environnement Lean management .....	74
4.3. Intégrer Six Sigma dans une démarche de performance industrielle....	76
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>77</b>

---

# Introduction

La globalisation de la concurrence, la complexité de l'économie et la pléthore d'informations disponibles aujourd'hui placent les entreprises dans un contexte plus que mouvant avec lequel elles doivent composer. Les entreprises ont donc plus de mal à prévoir les évolutions politiques, sociales, économiques, technologiques et industrielles. Elles doivent cependant pouvoir définir une vision lointaine du futur tout en gérant des changements plus fréquents. Le raccourcissement des délais entre les innovations, des horizons de planification et la réduction des coûts de développement sont un impératif. L'accélération des changements devient une constante de la vie des entreprises [VILLEMUS P. 2001]. Les entreprises ont donc besoin d'aide méthodologique leur permettant d'explorer plusieurs domaines, de traiter des montagnes d'informations pour trier l'information pertinente et ce, pour définir leur stratégie future, développer de nouveaux produits de plus en plus complexes et les industrialiser rapidement.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différents outils qualité indispensable pour la résolution d'un problème dans le contexte d'un processus de production, dans une première partie. La seconde partie est consacrée à l'identification de la méthode d'amélioration de la qualité : Six Sigma.

## 1. Le système de management industriel de la qualité

### *1.1 Définition de la qualité*

La qualité est un objectif important depuis que les besoins de consommateurs ont été intégrés dans la boucle de décision et elle devient un véritable outil stratégique et offensif pour faire face aux nouveaux enjeux de l'entreprise [GRANT D. et al 2006]. Elle est actuellement considérée comme un des leviers principaux avec lesquels une entreprise peut augmenter sa position concurrentielle globale.

Qu'est ce que la qualité ? Question brève, mais quelque peu embarrassante. Vouloir définir ce que l'on entend par « qualité » est une tâche difficile. L'utilisation de ce terme n'est pas récente dans le langage courant. Ses premiers utilisateurs ont probablement cru qu'il existait un consensus sur sa signification. Lorsque le mot est apparu dans le dictionnaire, sa définition n'était ni claire ni convaincante. Aujourd'hui encore, sa définition reste ambiguë et présente

beaucoup d'équivoques. Son sens varie selon la situation dans laquelle ce terme est utilisé et aussi selon la vision des uns et des autres. Cependant, comme le souligne [GLASSER W. 1992], même s'il semble difficile de définir ce que l'on entend par la qualité d'un objet, on peut quand même la reconnaître lorsqu'on voit un objet de qualité.

Le mot « qualité » est de plus en plus utilisé dans les entreprises, que ce soit dans le secteur alimentaire, industriel ou même dans le secteur des services. La notion de qualité est apparue avec le contrôle des produits visant à réduire le nombre de leurs défauts. Cette notion de qualité a évolué avec le temps et a étendu son champ d'action vers les phases de conception, production, installation, marketing, après-vente et soutien logistique [LOPEZ R. 2006]. En particulier dans le monde industriel, cette notion est complexe et peut se voir assigner un sens différent suivant les personnes et les entités considérées [REEVES C. et al 1994]. La norme [NF X 50-120 1992] définit la qualité comme étant : « l'ensemble des caractéristiques d'une entité qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés et implicites ». Cette définition est doublement générique, il faut préciser la qualité « de quoi » (d'un produit, d'un processus, d'un service, ...) et aussi les besoins « de qui » (un utilisateur, un consommateur, un chef de projet...). Le terme qualité ne peut donc pas être défini dans l'absolu mais toujours relativement à quelque chose et pour une entité donnée. En effet, le terme « qualité » regroupe plusieurs aspects en fonction du besoin ou de la phase abordée [CHOVE J. 1992], [DOMINIQUE H. 2003], [ISO8402 1995]:

- pour un client ou pour un utilisateur : la qualité c'est l'aptitude d'un produit ou d'un service à satisfaire les besoins de ses utilisateurs;
- pour la production : la qualité d'un système de production réside dans son aptitude à produire au moindre coût et dans un court délai des produits satisfaisant les besoins des consommateurs;
- pour l'entreprise ou une organisation : la qualité consiste en la mise en oeuvre d'une politique qui tend à la mobilisation permanente de tout son personnel pour améliorer:
  - la qualité de ses produits et services,
  - l'efficacité de son fonctionnement,
  - la pertinence et la cohérence de ses objectifs.

Dans le même sens, le dictionnaire de l'APICS (American Production and Inventory Control Society) a proposé une définition plus complète de la qualité selon différents points de vue de la qualité « conformité au besoin ou aptitude à l'emploi » [APICS 1992]:

- une qualité transcendée est un idéal, une condition de l'excellence,

- l'approche « produit » de la qualité est fondée sur les attributs du produit,
- l'approche « utilisateur » de la qualité est l'aptitude à l'emploi,
- l'approche « production » de la qualité est la conformité au besoin,
- l'approche « valeur » de la qualité est le degré d'excellence pour un prix acceptable.

Cette qualité a été définie sur sa partie mathématique (statistique), de façon plus conceptuelle et globale comme inversement proportionnelle à la variabilité. L'accroissement de la qualité s'obtient donc par la réduction de cette variabilité. Le but des méthodologies et méthodes qualité est ainsi de réduire la variabilité sur des caractéristiques clés essentielles à la satisfaction du client [DEEB S. 2008].

La norme [ISO9000 V 2000] de son côté donne une définition de la qualité « aptitude d'un ensemble de caractéristiques intrinsèques à satisfaire des exigences ». Elle précise de plus que « le terme Qualité n'est pas utilisé pour exprimer un degré d'excellence dans un sens comparatif... non plus dans un sens quantitatif pour des évaluations techniques...

La qualité d'un produit ou service est influencée par de nombreuses phases d'activités interdépendantes, telles que la conception, la production, le service après-vente et la maintenance... ». En effet, dans la pratique, les différents aspects de la qualité peuvent se réunir sous deux formes [FLEURQUIN R. 1996]:

- **La qualité externe**, correspondant à la satisfaction des clients. Il s'agit de fournir un produit ou des services conformes aux attentes des clients afin de les fidéliser et ainsi améliorer sa part de marché.

- **La qualité interne**, correspondant à l'amélioration du fonctionnement interne de l'entreprise. L'objet de la qualité interne est de mettre en œuvre des moyens permettant de décrire au mieux l'organisation, de repérer et de limiter les dysfonctionnements. Son objectif essentiel est de mieux maîtriser et améliorer la qualité des produits et aussi la qualité de tous les processus de l'entreprise. Cette qualité interne passe généralement par une étape d'identification et de formalisation des processus internes réalisée grâce à une démarche participative.

En conclusion, le terme Qualité n'est pas utilisé pour exprimer un degré d'excellence dans un sens comparatif... les plus que dans un sens quantitatif pour des évaluations techniques. La qualité est un résultat qui se constate en utilisation donc, en général, quand il est trop tard pour faire quelque chose. Aussi est-il important de mettre en place, tout au long du processus d'élaboration d'un produit nouveau, des méthodes et des outils de travail pour construire et assurer sa qualité. En nous appuyant sur ces définitions, nous constatons que pour répondre au

critère normatif de la qualité nous avons besoin de mettre en place non pas uniquement des contrôles qualité, mais un véritable système qui permettra d'une part de déterminer les exigences des clients, mais aussi de les satisfaire. Pour atteindre cet objectif les entreprises mettent en place des systèmes de management de la qualité.

## ***1.2 L'évolution du concept qualité***

[JURAN J. 1995], dans son ouvrage « A history of Managing for Quality », a souligné que la gestion de la qualité n'est pas une activité récente. On trouve des textes traitant de normalisations et de contrôle de la qualité dans pratiquement toutes les grandes civilisations anciennes. Toutefois, la vague de popularité que connaît la qualité dans les années quatre vingt est sans précédent.

Les exigences du management de la qualité ne sont pas un phénomène de mode. Depuis toujours, les créateurs de produits divers, les bâtisseurs des temples antiques et des cathédrales, les fabricants d'armes ou de navires travaillaient avec méthode. La notion de qualité est apparue avec le contrôle de la fabrication des produits et le caractère systématique de dispositions visant à réduire le nombre de défauts de ces produits. Ces concepts ont évolué et ont étendu leur champ d'action en amont (marketing, conception...) et en aval (installation, après-vente, soutien logistique, etc.). Cette généralisation de l'application de la qualité, appelée "maîtrise totale de la qualité", est à la base des systèmes qualité modernes. Lorsque ces principes deviennent véritablement des modes de management de la qualité et de management par la qualité, on parle alors de "qualité totale". Ils préconisent en particulier, la prévention, la mesure, l'amélioration progressive et permanente, la maîtrise des processus.

### ***1.2.1 De l'artisan au contrôle unitaire***

A la fin du XVIème siècle, la conception et la fabrication des produits sont motivées par leur usage pratique. Les produits sont fabriqués par les artisans du village, formés à la rude école du compagnonnage qui développe la créativité et la notion d'excellence. Le travail est essentiellement manuel et l'artisan est proche de son client, utilisateur du produit. Cela crée une relation privilégiée entre l'artisan et le produit, ainsi qu'entre l'artisan et l'utilisateur du produit. Avec l'essor des moyens de communication entre le XVIème et le XXème siècle, le développement des villes et des ports de commerce, on assiste à une modification du paysage économique international. La notion de concurrence apparaît et le consommateur devient critique et exigeant. Des manufactures se créent pour produire en quantité et ceci contribue à une perte de la qualité du produit selon [HAMALIAN E. et al 1996]. Mais c'est aussi le début de la perte de contact entre l'artisan et le client. Ceci entraîne une perte de motivation

des artisans devenus ouvriers travaillant dans des conditions de travail très rudes, peu propices à la qualité. « Il apparaît que cette époque ne conduira pas à de grandes préoccupations en matière de qualité » [LAMBUSSON A., 1988]. C'est en pleine période de crise que Taylor fait ses débuts dans l'atelier de construction mécanique de la Midvale Steel Company en 1878. Avec lui, naît l'organisation scientifique du travail dont le but est d'améliorer la productivité des ouvriers et de l'appareil de production, qui est devenu de plus en plus mécanisé. Le travail est divisé en tâches élémentaires et répétitives. La qualité devient étroitement liée aux performances des machines. De plus la prime à la quantité pousse les ouvriers à faire « beaucoup de pièces » plutôt qu'à faire de « bonnes pièces ». L'objet produit n'a plus de sens et passe au second plan devant la machine toute puissante, que l'on respecte et qui fait l'objet de la fierté des ouvriers qualifiés. Le contrôle de la qualité est assuré par la maîtrise qui procède au tri entre les pièces conformes et celles qui ne le sont pas. Selon [CHIAVENATO. I 1983], il y avait parfois plus d'inspecteurs que d'ouvriers dans un secteur de production. L'inspection des produits devient une activité coûteuse, car elle est faite sur toutes les unités produites.

### ***1.2.2 Le contrôle statistique de la qualité et la standardisation***

La période entre les deux guerres voit se développer le contrôle statistique de la qualité comme solution à la persistance des problèmes rencontrés en fabrication. En 1924, la Western Electric Company demanda à un de ses ingénieurs, "de garantir la qualité finale des appareils téléphoniques, c'est à dire d'atteindre la satisfaction des clients au moindre coût" [FEY R. et al 1981]. Ce qui fait apparaître le concept de « Quality Assurance Department ».

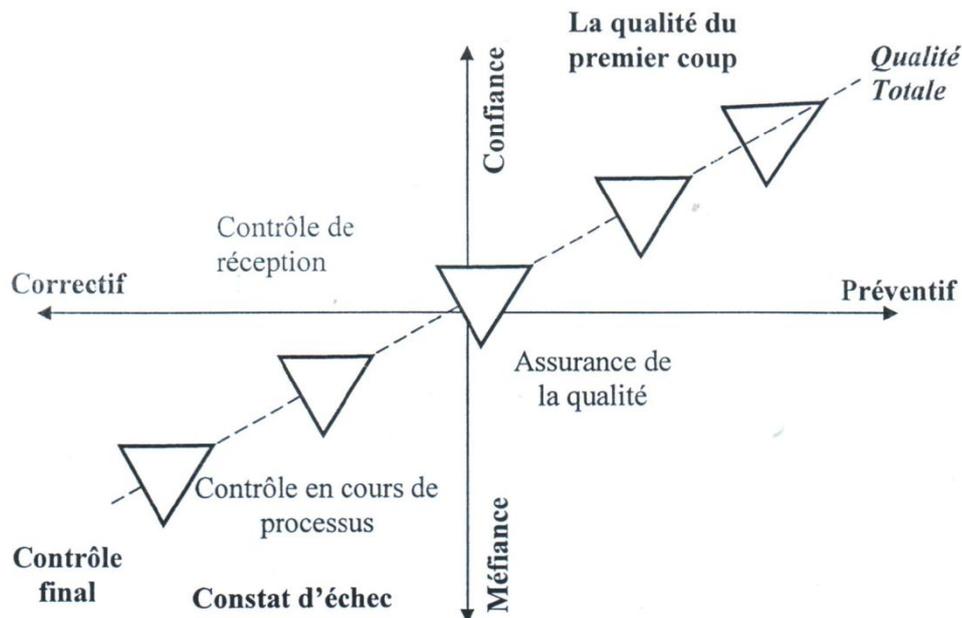
D'autre part, des normes apparaissent, en particulier aux Etats Unis avec les « Military Standard ». La deuxième guerre mondiale entraîne un renforcement de ces normes, du contrôle statistique de la qualité, ainsi que le développement de la standardisation dans le domaine de l'armement. Le problème était de livrer avec certitude et en grande quantité, du matériel en parfait état de marche. Ainsi, la norme de guerre nord-américaine Z1.1-Z1.3 est élaborée pour garantir la qualité des produits fabriqués en grandes quantités nécessaires à l'effort de guerre, comme nous le rappelle [TODOROV B. 1994].

### ***1.2.3 La qualité totale***

La qualité totale est une méthode de management qui vise le succès à long terme grâce à la satisfaction client. Elle est basée sur la participation de tous les membres d'une organisation à l'amélioration des processus, des produits et des services de leur organisation.

Au début des années 1980, nous sommes entrés dans l'ère de mondialisation des marchés d'où on observe aussi l'immense succès que connaît la philosophie de gestion Japonaise propagée par deux gourous américains, Deming et Juran, et qui concerne la qualité totale.

Les deux concepts: Assurance de la qualité et qualité totale deviennent une base importante pour la construction et le déploiement de la fonction qualité dans l'entreprise [FOURNIER P. et al 1999]. La figure 4 montre l'évolution du concept de la qualité d'après de MFQ (Mouvement Français pour la qualité).



**Figure. 1 L'évolution du concept de la qualité**

### ***1.3 La gestion de la qualité***

Le concept de la qualité a fait apparition dans le monde des affaires dans les années 60 au Japon, au début des années 80 aux USA et en Europe. A l'origine de cette qualité se trouve un concept de gestion d'entreprise développé par Edward Deming, d'origine américaine, dénommé Total Quality Management. Comme le souligne [ANSARI M. 1999], le développement de TQM est associé à d'autres personnalités importantes telles que Juran, Feigenbaum, Crosby, Ishikawa, Taguchi, ... Son développement est lié aux apports d'experts en management comme Peter Drucker ou Mc Gregor, et aussi à celui de l'école japonaise.

Le concept de gestion de la qualité apparaît, entre autres sous l'impulsion du docteur [JURAN. J. M 1995], [DEMING W. 1994] [ISHIKAWA K. et al 1985] et de la J.U.S.E. (Japan Union of Scientifics and Engineers) en 1954. « Les promoteurs de la gestion de la qualité constatent que de nombreux aspects organisationnels gênent la qualité. Vouloir

résoudre le problème de la qualité par des contrôles de spécification au niveau de la production n'est pas suffisant. Il faut repenser l'organisation de la conception et de la production de façon à diminuer le nombre et le coût des contrôles, mais également introduire le concept qualité dans les services connexes à la production » [LAMBUSSON A. 1988].

## ***2. Les outils de résolution des problèmes qualité***

### ***2.1 La résolution des problèmes qualité***

Avant de définir ce qu'est la résolution d'un problème qualité, étudions le terme « problème » dans son acception courante ; Question scientifique à résoudre, problème de géométrie, problème d'algèbre, proposer un problème, résoudre un problème, la solution d'un problème, un problème insoluble, difficile à résoudre. Il se dit, dans le langage courant, d'une question difficile à résoudre. Problème historique, problème de morale, de métaphysique, ce fait est encore un problème. Cette question est un vrai problème, un véritable problème. Il se dit encore, en général, de tout ce qui est difficile à concevoir. L'homme est pour lui-même un grand problème. Cet homme est un problème, sa conduite est un vrai problème se dit d'un homme dont il est difficile de définir le caractère ou d'expliquer la conduite. On dit de même d'une affaire embrouillée : Cette affaire est un vrai problème.

Difficulté qu'il faut résoudre pour obtenir un certain résultat : situation instable ou dangereuse exigeant une décision.

La différence entre la dernière définition et les deux autres tient surtout de la connaissance ou non du résultat à attendre. Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous nous intéressons aux problèmes de production c'est-à-dire aux problèmes dans le système de production.

Dans la littérature, on distingue plusieurs types de problèmes qualité [DEMING W. 1982] [KEPNER C. et al, 1980], tel que:

***Les problèmes de cause spéciale:*** se sont des instabilités soudaines et imprévisibles et qui provoquent une baisse du niveau de performance et empêchent le retour à ce niveau.

***Les problèmes de causes communes:*** c'est le niveau de performance stable qui est le problème, en d'autre terme, le niveau escompté de performance le plus élevé.

### ***2.2. Définition des outils***

Outil : pour le domaine de la qualité, un outil est un moyen conçu pour réaliser de façon efficace un certain type d'action. Dans le domaine de la qualité : outils de base de la qualité et

outils de management de la qualité. Ainsi, un outil possède un mode opératoire précis, il s'inscrit généralement dans le cadre d'une méthode.

Ainsi un outil qualité est un ensemble cohérent de dispositions pratiques mises en place dans l'entreprise en vue d'améliorer les performances d'une ou de plusieurs caractéristiques d'un produit ou service.

Les outils de la qualité ont parfois été désignés comme les 7 outils de la qualité (feuille de relevé, diagramme de Pareto, diagramme causes-effets, graphiques et histogrammes, cartes de contrôle, remue-méninges, Q, Q, O, Q, C, P). Il s'agit des moyens mis en œuvre dans les actions d'amélioration. Ce sont des outils de résolution de problème.

Par ailleurs, les outils de management de la qualité représentent les outils de management de la qualité, appelés aussi les nouveaux outils de la qualité (diagramme des affinités, diagramme des relations, diagramme matriciel, diagramme en arbre, diagramme des décisions, diagramme en flèche (ou sagittal), analyse factorielle des données). Ils ont été mis au point au Japon en complément des 7 outils de base de la qualité. Ils donnent les moyens de comprendre les situations complexes et de faire des plans pertinents. Ces outils, en particulier les 6 premiers, permettent de prendre en compte les idées des membres d'un groupe pour construire un consensus. Ils aident à poser clairement un problème flou pour fonder la formulation du problème sur des faits. Ils aident à rechercher les causes, à focaliser les efforts sur l'essentiel, à préparer l'action [ANAES 2000].

### ***2.3 Classification des outils qualité***

La qualité en production demande une organisation rigoureuse basée sur un modèle. Cependant, le système qualité n'est pas suffisant pour obtenir seuls des produits de bonne qualité, donc il faut également des outils, souvent très simples qui permettent la résolution des problèmes quotidiens de l'entreprise.

Nous présentons ainsi les sept outils de base de résolution des problèmes qui facilitent le travail de groupe et qui sont indispensables à tous les cercles de qualité. Ces outils doivent naturellement être complétés par d'autres plus sophistiqués tels que les plans d'expériences, le QFD et les «3A» de la qualité en conception (AF «Analyse Fonctionnelle», AV «Analyse de la Valeur», AMDEC «Analyse des Modes de Défaillances leurs Effets, leurs Criticités) pour donner toute leur efficacité [GOGUE F. 1991].

### **2.3.1 Les outils de première génération**

Les outils de premières générations sont des instruments qui permettent de dégager les défauts possibles.

- **QOOQCP (Qui, Quoi, Où, Quand, Comment, Pourquoi)**

C'est un outil qui permet de se poser les bonnes questions avant d'aborder un problème. Il vise à déterminer avec exactitude quelle est la cause principale. Le QOOQCP peut être utilisé aussi pour bâtir le plan d'action de solution proposée. Pour être sûr d'appréhender le plus complètement possible un problème, il faut se poser les questions (Qui ? Quoi ? Où ? Quand ? Comment ? Pourquoi ?). La réponse à ces questions permet d'identifier les aspects essentiels d'un problème.

Qui ? : Qui est concerné par le problème ?

Quoi ? : De quoi s'agit-il ? Quel est le problème ?

Où ? : En quel lieu le problème se pose-t-il ?

Quand ? : A quel moment le problème apparaît-il ?

Comment ? : Sous quelle forme le problème apparaît-il ?

Pourquoi ? : Quelles sont les raisons qui poussent à résoudre ce problème ? [ANAES 2000].

- **Diagramme de Pareto**

Le diagramme de Pareto permet de classer les données de la plus importante à la moins importante. Il permet de hiérarchiser les informations, afin de se consacrer à l'essentiel. Il est en effet indispensable d'ordonner ce qui a été relevé pour révéler la signification des faits. Ce diagramme constitue la première étape dans la démarche permanente d'amélioration des produits et des procédés de l'entreprise. C'est un indicateur sur l'état de l'avancement de la résolution du problème, car pour chaque action corrective la construction d'un nouveau diagramme de Pareto rend compte de l'amélioration de la qualité. [ANAES 2000].

#### **Exemple numérique:**

Parfois, ton auto refuse de démarrer, les causes probables sont les suivants :

- Il manque de l'essence,
- La batterie est à plat,
- Les bougies ne sont pas chargées,
- Le chauffeur n'arrive pas.

La matrice des fréquences est la suivante:

Causes	Fréquences						Cum
	Lun	Mar	mer	jeudi	ven	total	
Gaz	1	0	1	0	0	2	2
Bougies	0	1	2	1	2	6	8
Batterie	1	0	0	0	0	1	9
Chauffeur	0	0	0	1	0	1	10

Total cumulé des causes  
 Causes classées  
 Fréquence par causes par jour  
 Somme des pannes /cause  
 $6 = 1+2+1+2$

Figure. 2 Matrice des fréquences

La représentation graphique est la suivante:

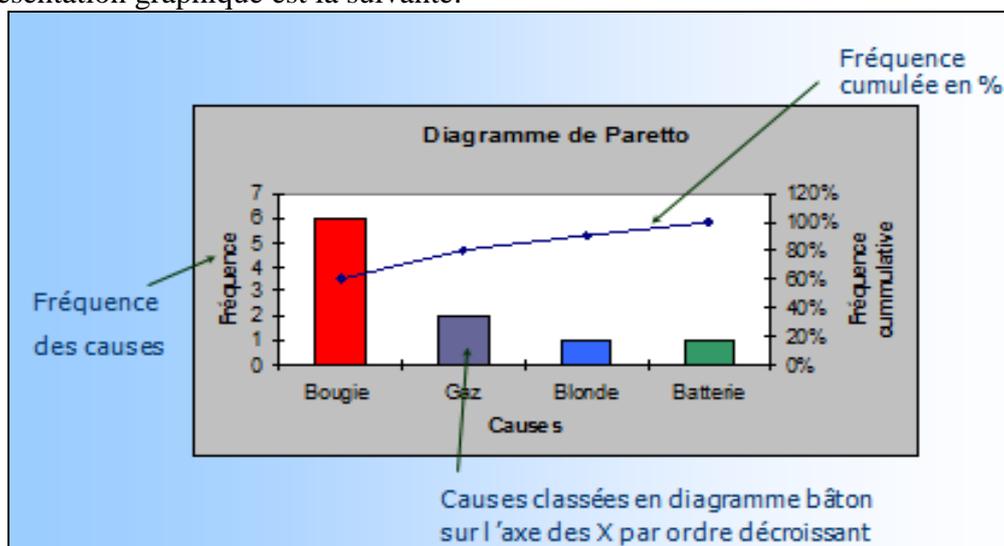


Figure. 3 Diagramme de Pareto

- **Diagramme d'Ishikawa**

Ce diagramme est utilisé pour associer des causes multiples à un seul effet. Il sert à mettre en évidence les relations des causes à effet suivant une méthode définie par le professeur Kariou Ishikawa.

Cet outils est connu également sous le nom «Diagramme des causes effets» ou «Arête de poisson» et aussi «la famille de 5Mou 6M». Et cette série de M facilite l'identification rapide de toutes les causes possibles qui sont classées par famille [ANAES 2000].

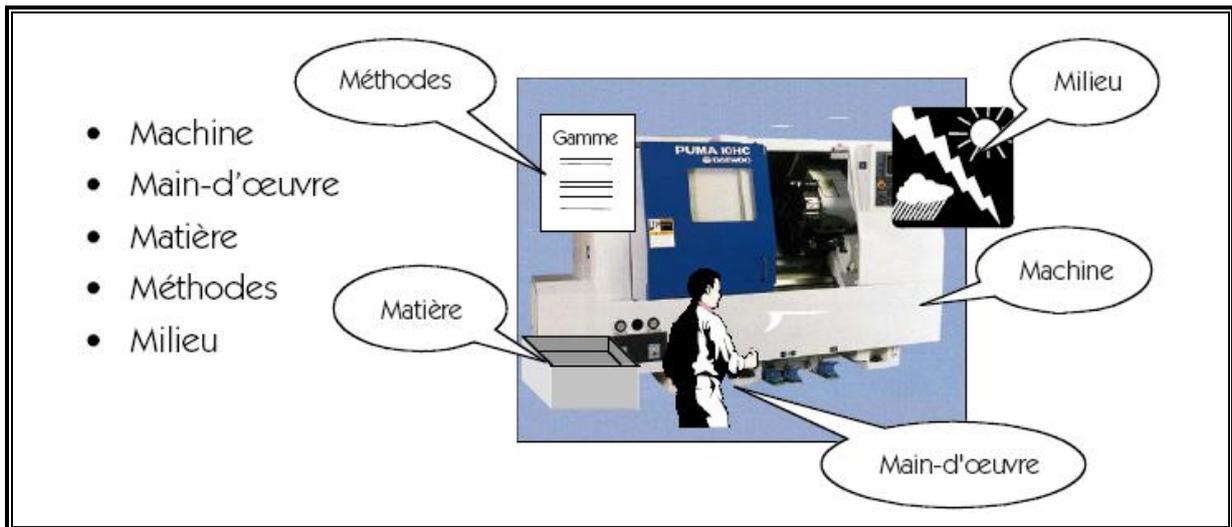


Figure. 4 Les 5M d'Ishikawa

**Exemple numérique:**

La figure ci-dessous représente le diagramme d'Ishikawa, pour traiter les causes du problème «pourquoi les légères coupures aux doigts ?»

La représentation de diagramme d'Ishikawa est comme suit:

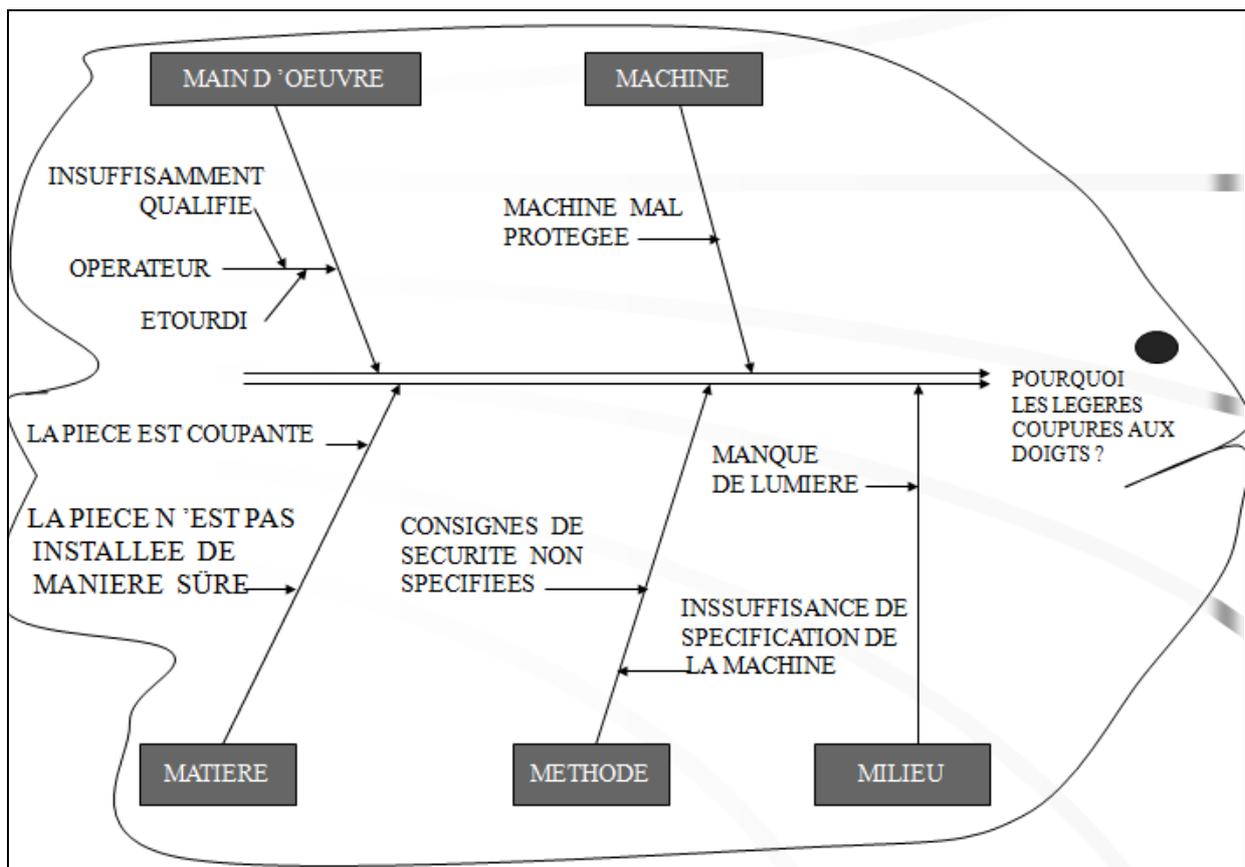


Figure. 5 Représentation d'un diagramme d'Ishikawa [BACCOU BONNEVILLE C. 2007]

Comme les autres outils le diagramme d'Ishikawa est utilisé dans le but de mettre en évidence les causes d'un problème et les regrouper dans des catégories distinctes (matériel, milieu et manière).

- **La feuille de relevés**

La feuille de relevés permet de faciliter la saisie des informations. Cet outil est une collecte de données précises, fiables, en relation avec l'objectif défini et il contribue à éviter des erreurs d'enregistrements. La feuille de relevés peut vérifier les modes et les effets de défaillance sur le processus de production et permet de rechercher des causes de dysfonctionnements. Elle constitue une pratique préalable à toute analyse statistique de données [ANAES 2000].

**Exemple numérique:**

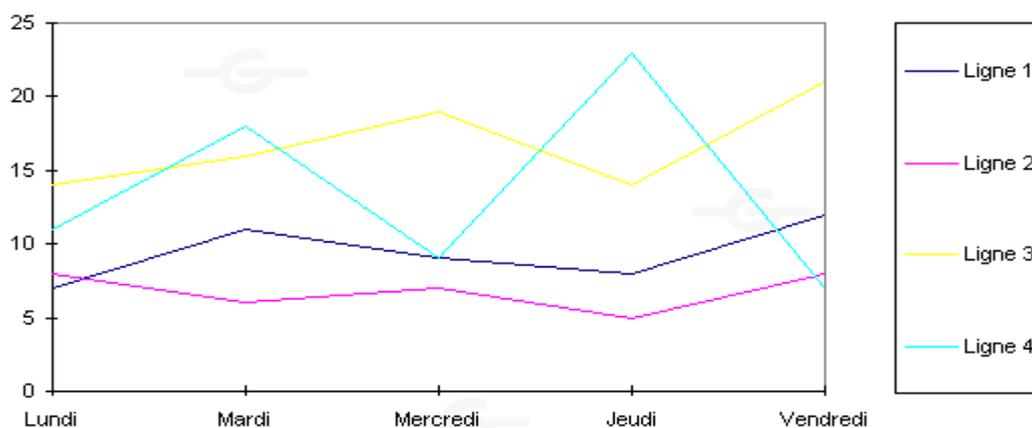
Instructions à l'opérateur des fours (responsable du relevé) : Relever la température (grandeur qui fait l'objet du relevé) en sortie du four X35 (lieu où s'effectue le relevé) durant le mois de juillet (durée et la fréquence du relevé) à chaque heure (critère de classement) à l'aide du thermomètre fixe T9 (méthode pour effectuer le relevé).

Les résultats sont résumés dans le tableau ci-dessous:

	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi
Ligne 1	7	11	9	8	12
Ligne 2	8	6	7	5	8
Ligne 3	14	16	19	14	21
Ligne 4	11	18	9	23	7

**Tableau. 1** feuille de relevé

La représentation des données des températures du four sont comme suit :



**Figure. 6** Représentation de feuilles relevées

- **Brainstorming**

Cet outil ne fait pas partie des sept outils traditionnels, il a pourtant un rôle essentiel dans la résolution de problème. Le travail de groupe coûte cher, il faut donc qu'il soit efficace pour être rentable. Il permet de gagner un temps précieux et se base sur un groupe pluridisciplinaire. Il doit toujours commencer par l'écriture claire de l'objectif de l'étude.

Ses Synonymes sont, Remue-méninges, tempête d'idées, créativité, brassage d'idées.

Son but est de résoudre un problème en recherchant les causes et les solutions possibles, en développant la créativité et l'émergence d'idées nouvelles auxquelles personne, individuellement, n'aurait pensé. Rechercher des causes, à l'origine d'un dysfonctionnement, ou des solutions en favorisant l'expression de chacun.

C'est un travail de groupe composé de 8 à 15 personnes, choisis de préférence dans plusieurs disciplines, et un animateur. Le maximum d'idées devra être exprimé et noté sur un tableau (paper-board) visible de tous. Quoi qu'il en soit, des pauses seront ménagées entre chaque réunion pour laisser reposer les idées émises pour mieux les réexaminer par la suite.

Le déroulement du Brainstorming peut-être décrit en trois phases :

**- Phase de Recherche :**

Les participants exprimeront les uns après les autres toutes les idées leur venant à l'esprit sans restriction. L'exercice doit se dérouler dans la discipline : on écoute ce que l'autre dit et on ne critique en aucune manière.

Aucune idée, aussi étrange soit elle, ne doit être réprimée : le brainstorming a lieu dans un esprit de progression du bien commun. Pas de censure ni de critique. Il faut exprimer le maximum d'idées : plus il y a d'idées, plus on a de chances de trouver la solution.

**- Phase de regroupement et de combinaison des idées :**

Le groupe cherchera à exploiter, améliorer les idées émises. On pourra faire des analogies, exprimer des variables ou des modifications. Certaines idées se verront complètement dénigrées, et d'autres aux contraires encensées. Mais attention ! Ces critiques ne s'adresseront jamais à l'auteur de l'idée, et il faudra savoir garder le sens de l'humilité.

L'important n'est pas de savoir qui a eu l'idée, mais de voir ce que l'on peut en tirer.

**- Phase de Conclusion :**

Au terme de l'exercice, il faudra faire l'analyse des causes suspectées et des solutions proposées discerner celles du domaine du réalisable, de celle du domaine de l'utopie. Les solutions et les causes dégagées devront alors être confrontées aux exigences de

l'entreprise, ainsi qu'aux autres outils. On adoptera donc la meilleure des solutions [ANAES 2000].

- **L'histogramme**

L'histogramme est un outil d'analyse qui permet de représenter les données sous forme graphique. Il permet d'identifier l'existence d'un modèle applicable et illustre les relations entre les valeurs relevées et les valeurs de référence. Il visualise la répartition de ces valeurs en différentes classes [ANAES 2000].

**Exemple numérique:**

Soit la fabrication de rations alimentaires, la pesée des rations avant emballage donne la série de mesures suivantes en kg:

0,547	0,563	0,532	0,521	0,514	0,547	0,578	0,532	0,552	0,526	0,534	0,560	0,502	0,503	0,516	0,565
0,532	0,574	0,521	0,523	0,542	0,539	0,543	0,548	0,565	0,569	0,574	0,596	0,547	0,578	0,532	0,552
0,554	0,596	0,529	0,555	0,559	0,503	0,499	0,526	0,551	0,589	0,588	0,568	0,564	0,568	0,556	0,523
0,526	0,579	0,551	0,584	0,551	0,512	0,536	0,567	0,512	0,553	0,534	0,559	0,498	0,567	0,589	0,579

**Tableau. 2 Mesure des rations alimentaires**

Les caractéristiques du relevé sont les suivantes:

- Le nombre d'échantillons:  $N = 64$ ,
  - L'étendue:  $w = 0,098$  kg,
  - Valeur minimale: 0,498 kg,
- Valeur maximale: 0,596 kg.

On en déduit les paramètres suivants pour l'histogramme:

- Le nombre de classes est de 7,
- L'amplitude de classe est  $0,098/7 = 0,014$  kg que l'on arrondit à 0,015 kg (résolution de la balance: 0,001 kg);
- La valeur minimale de la première classe est de  $0,498 - (0,001/2) = 0,4975$ . Par souci de facilité pour l'interprétation, on peut arrondir cette valeur à 0,495 kg.

On obtient l'histogramme suivant:

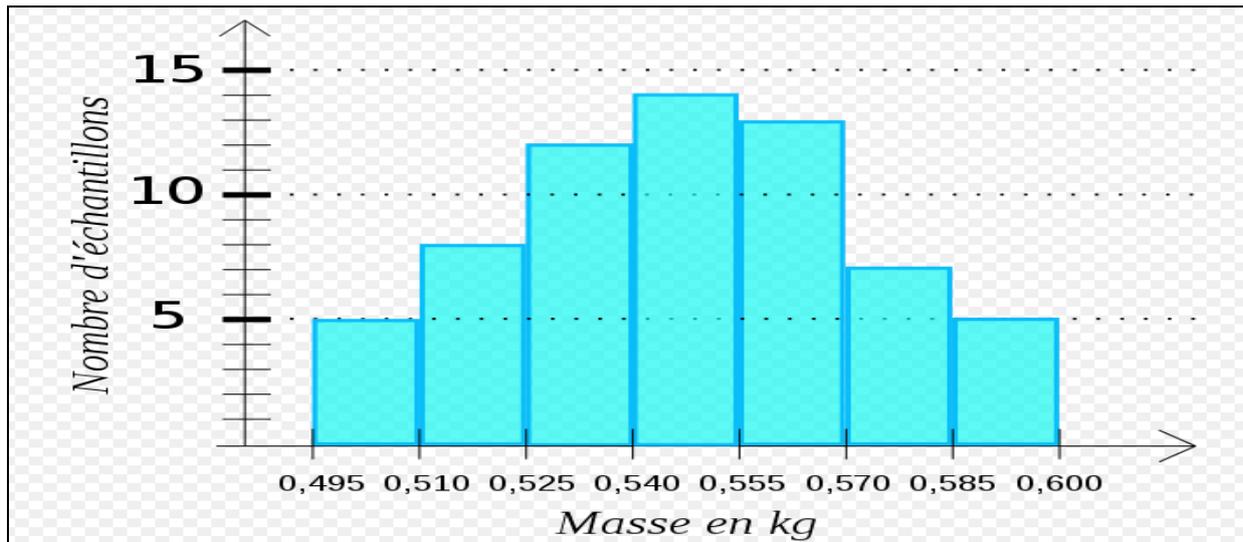


Figure. 7 Représentation d'un histogramme de répartition de la masse des rations alimentaires

La distribution de beaucoup de paramètres industriels correspond souvent à une loi normale. On compare souvent l'histogramme obtenu au profil «en cloche» de la loi normale. Cette comparaison est visuelle et même si elle peut être une première approche, elle ne constitue pas un test de «normalité». Pour cela, il faut exécuter un test dont un des plus classiques est la droite de Henry [WIKIPEDIA 2009 a].

- **Diagramme des affinités**

Un Diagramme des affinités est un Outil développé au Japon dans les années 50 permettant de définir plus clairement une situation mal connue, de structurer des idées floues.

Son objectif est de cerner plus clairement un problème apparaissant peu précis, en l'absence de données objectives. Rassembler et structurer des idées pour mettre en évidence leur appartenance à une logique commune [ANAES 2000].

**Exemple numérique:**

**Question de départ**

Qu'est-ce qui fait que les incidents et les « événements indésirables » ne sont pas signalés à la direction et/ou à la cellule de gestion des risques ?

**Diagnostic**

Les incidents et les événements indésirables ne sont pas signalés à la direction et/ou à la cellule de gestion des risques en raison d'une communication verticale et par manque d'identification professionnelle se manifestant par une sous-déclaration d'incidents/accidents/événements indésirables.

La représentation du diagramme des affinités est comme suit:

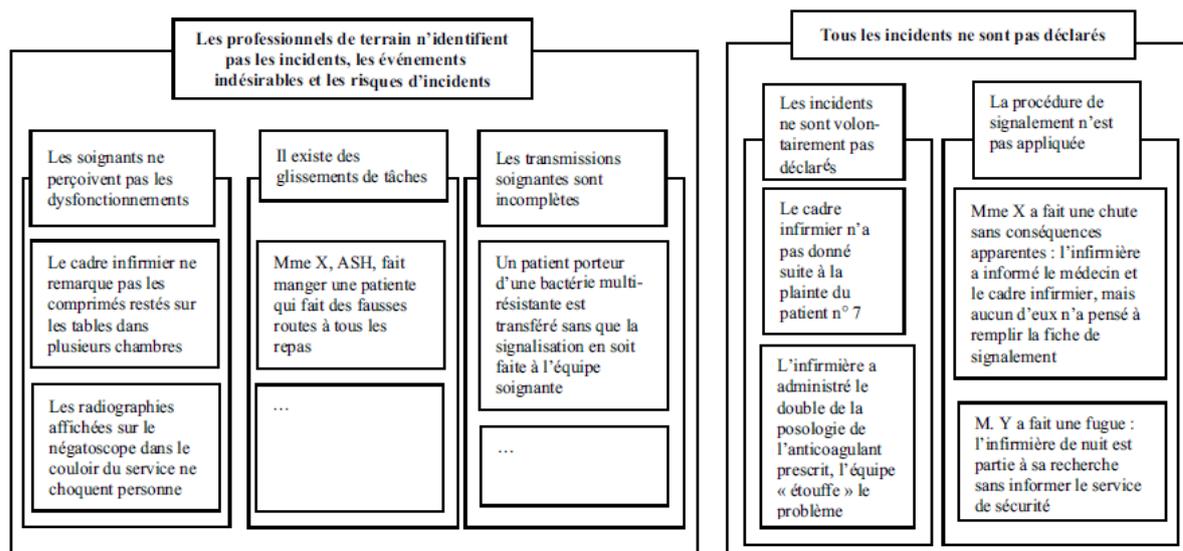


Figure. 8 Représentation d'un Diagramme des affinités [ANAES 2000]

- **Diagramme des relations**

Diagramme des relations est une représentation permettant de clarifier et de mieux cerner la structure des causes d'une situation ou d'un problème complexe.

Son objectif est d'identifier tous les paramètres caractérisant le problème ou la situation. Classer, ordonner ces paramètres en fonction de leurs liens de cause à effet. Identifier les causes successives induisant un problème donné et remonter jusqu'à la cause principale. À la différence du diagramme causes-effets, il prend en compte les interactions entre les causes [ANAES 2000].

**Exemple numérique:**

La directrice des finances et de la gestion de Début, une jeune entreprise de formation multimédia, a relevé, par un diagramme d'affinité, les facteurs ralentissant l'implantation d'un tableau de bord dans son organisation. Elle demande maintenant à la même équipe de retravailler ces facteurs pour en faire un diagramme de relations.

Les différents enjeux et leurs relations sont schématisés comme suit:

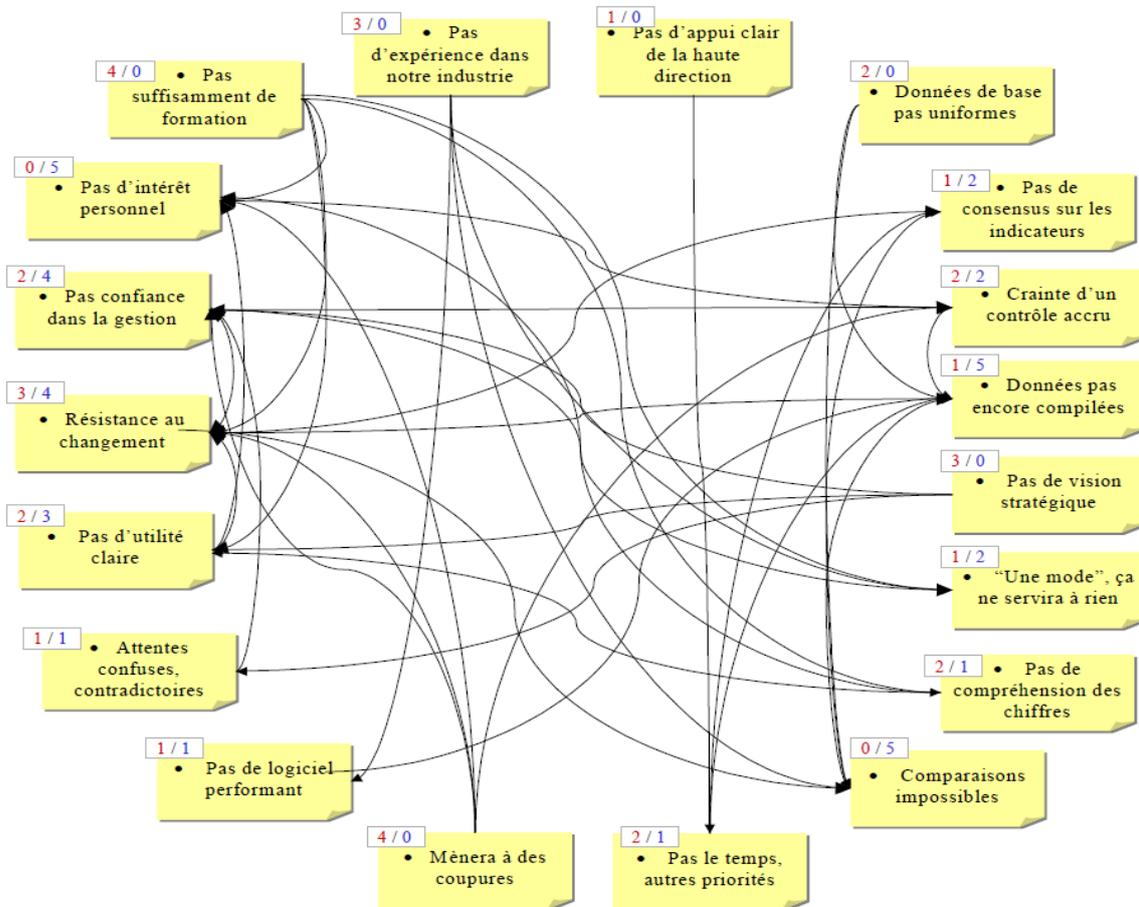


Figure. 9 Représentation d'un Diagramme des relations [GILLES E. et al 2003]

On a donc, comme **principales causes** : la crainte des coupures, le manque de formation et de vision stratégique et le fait de ne pas avoir de points de comparaison dans l'industrie. La résistance au changement est aussi une cause importante, mais elle résulte aussi d'autres causes; il semble donc nécessaire d'agir plus en amont dans ce cas.

• **Diagramme multicritère**

Diagramme multicritère est une matrice se présentant sous la forme d'un tableau à 2 entrées permettant d'analyser plusieurs sujets en fonction de critères prédéterminés, pour réaliser un choix. Les critères représentent les attributs subjectifs ou objectifs qui caractérisent les éléments de choix. Son objectif est de choisir un problème ou un dysfonctionnement et de sélectionner des solutions [ANAES 2000].

**Exemple numérique:**

Objectif : Aller seul de Lyon à Paris, dans les meilleures conditions de délai, confort, coût et sécurité.

- Cahier des charges : .....Pondération
- Rapidité : Moins de 3 heures de centre ville à centre ville.....4

- Confort : Possibilité d'écrire pendant le trajet et d'étendre ses jambes.....3
- Sécurité : Risque d'accident et d'agression < 1/1000.....2
- Coût : < 500 £.....1

Notation de 0 à 3 en fonction de la satisfaction au critère;

		SOLUTIONS							
CRITERES	Pondération	TGV 1ere classe	Total	AVION	Total	VOITURE	Total	AUTO STOP	Total
Rapidité	4	3	12	3	12	1	4	0	0
Confort	3	3	9	2	6	0	0	1	3
Sécurité	2	3	6	3	6	1	2	0	0
Coût	1	2	2	0	0	0	0	3	3
<b>TOTAL</b>			<b>29</b>		<b>24</b>		<b>6</b>		<b>6</b>

Tableau. 3 Représentation schématique du diagramme multicritère

- **Diagramme de décision**

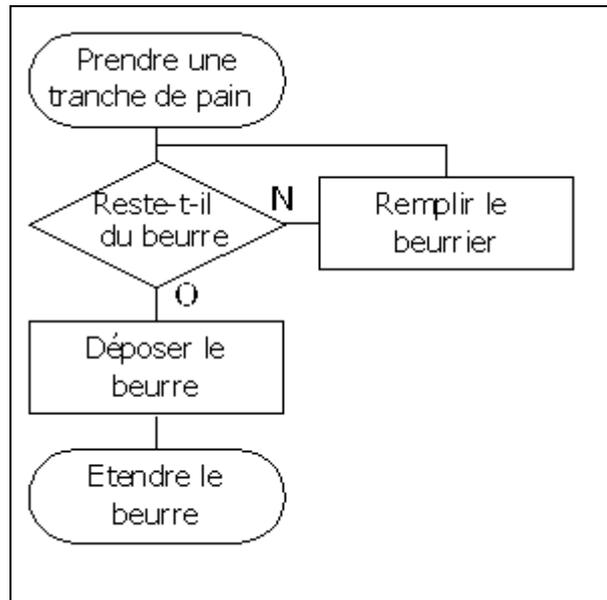
C'est un outil d'aide au choix du meilleur processus de décision en évaluant les situations possibles et leurs conséquences probables. Il permet d'anticiper les aléas liés à la mise en place des solutions retenues et de prévoir les mesures alternatives permettant de garantir le bon déroulement des actions depuis le début et jusqu'à la fin d'un processus bien défini.

Son objectif est de:

- Mettre en lumière les difficultés qui peuvent surgir dans la mise en œuvre d'un nouveau processus,
- analyser les différents procédés possibles pour atteindre un résultat voulu,
- s'adapter aux nouvelles informations disponibles, pour une démarche donnée,
- aider à faire face à des situations par nature changeantes,
- donner une vue systématique des actions à entreprendre,
- minimiser les pertes de temps occasionnées par les événements imprévus,
- implanter de manière fiable des solutions dans un environnement bien défini [ANAES 2000].

**Exemple numérique:**

Comment beurrer une tartine: cas peu détaillé



**Figure. 10 Représentation du Diagramme de décision**

• **Diagramme sagittal**

Outil de planification et de suivi de projet, présenté sous forme graphique, qui détermine la durée prévisible des différentes étapes et permet d'assurer un suivi du projet. Son objectif est de: [ANAES 2000]

- optimiser le planning d'un projet,
- assurer le suivi du projet,
- faire apparaître le chemin critique, en termes de délais,
- détecter rapidement les risques de retard.

**Exemple numérique:**

*Système à étudier:* protection par caméra dans une banque

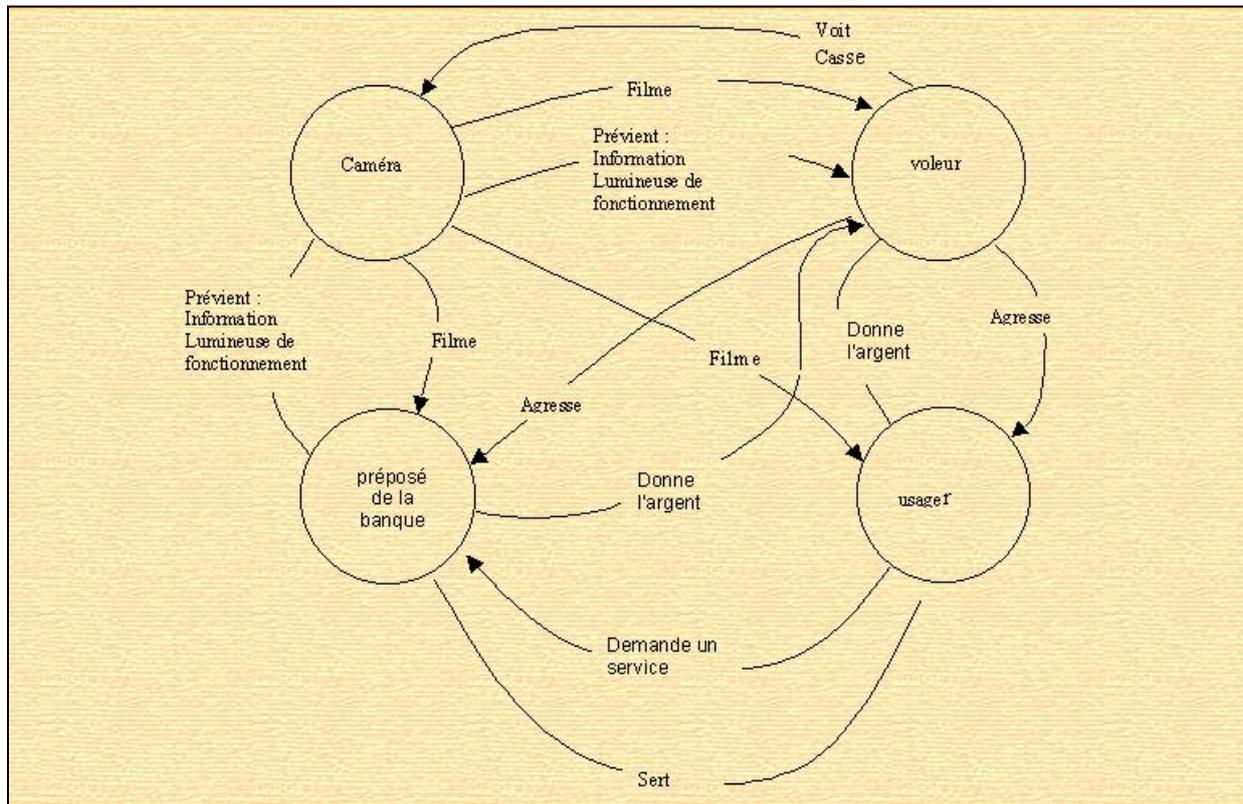


Figure. 11 Représentation du Diagramme sagittal [ANAES 2000]

### 2.3.2 Les outils de deuxième génération

Les outils de deuxième génération permettent de dégager les problèmes dès la conception.

- **Le QFD (Quality Function Deployment)**

Le QFD est une méthode permettant de traduire de façon appropriée les attentes du consommateur en spécifications internes à l'entreprise et ceci tout au long du développement d'un produit. Il est indispensable d'utiliser une méthode qui permet de leur transmettre la «voix de client » dans leur langage avec le moins de déformation possible. De plus, il est capital dès lors que nous nous focalisons sur l'essentiel pour le client, de comparer les performances de l'entreprise avec les concurrents.

La méthode QFD est une méthode préventive qui permettra d'éviter des actions correctives et permet d'entrer les attentes des clients dans l'entreprise et traduire ses attentes en différentes étapes [GOGUE F. 1991].

#### **Exemple numérique:**

Conception d'une cafetière-filtre

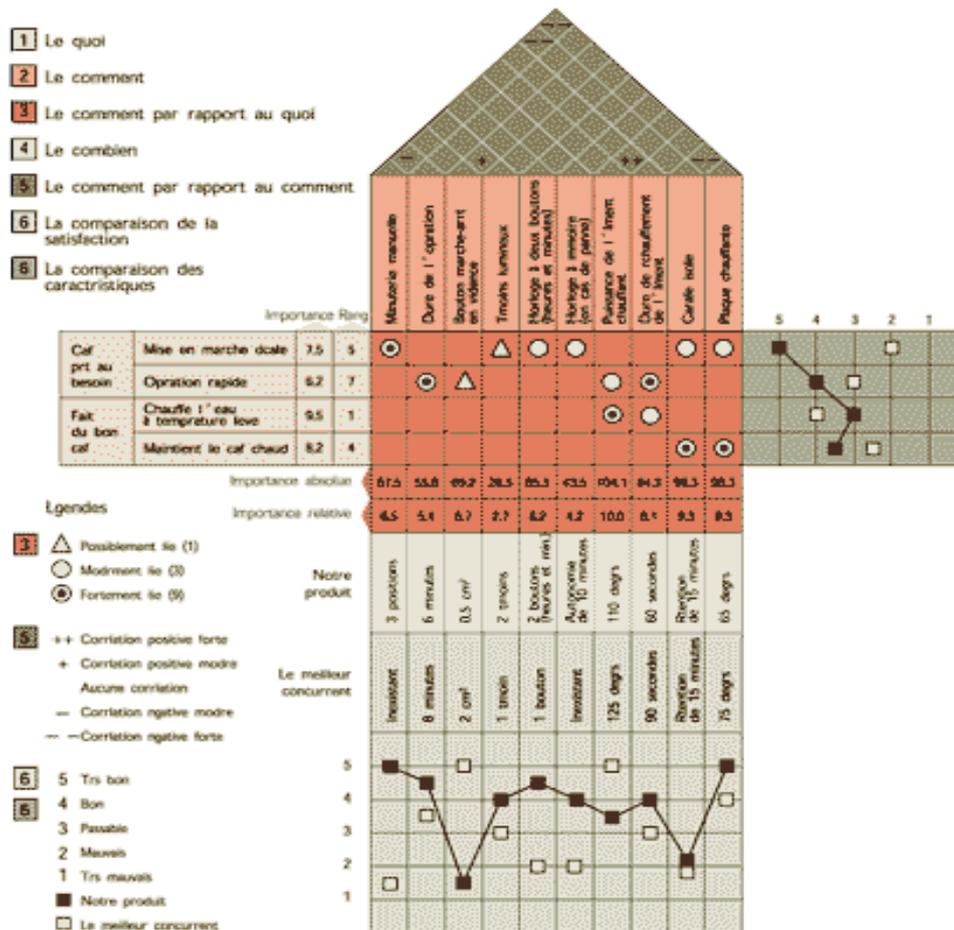


Figure. 12 matrices QFD «maison de la qualité»

• *Les plans d'expériences*

Les plans d'expériences font partie de l'ensemble des outils de la qualité qui permettent aux entreprises de progresser dans la maîtrise de la conception de produits nouveaux et dans la maîtrise des procédés de fabrication. Ils permettent de résoudre de nombreux problèmes de qualité et de réduire le nombre d'essais sans perdre en précision. La méthode des plans d'expériences permet de conduire de façon rigoureuse les essais en vue d'un objectif parfaitement défini [GOGUE F. 1991].

Ainsi les avantages des plans d'expériences sont:

- permettent une diminution considérable du nombre d'essais et une interprétation rapide et sans équivoque. Ils fournissent des résultats faciles à présenter à des non spécialistes.
- permettent d'étudier un très grand nombre de facteurs, de détecter des interactions éventuelles, et de déterminer des résultats avec une bonne précision.

**Exemple numérique:**

Nous considérons maintenant la mise en œuvre de la méthode des plans d'expérience pour minimiser la rugosité de pièces usinées.

- *Moyenne générale* : elle correspond à la moyenne de la réponse sur les m essais.

$$M = \frac{\sum_{i=1}^m Y_i}{m}$$

- *Effet d'un facteur* : l'effet  $E_{A_{ij}}$  du facteur A au niveau j correspond à la moyenne des réponses lorsque le facteur A est au niveau j soustrait de la moyenne M.

$$E_{A_{ij}} = (\text{Moyenne des réponses lorsque } A_i \text{ est au niveau } j) - M$$

- *Effet d'une interaction* : l'effet de l'interaction  $I_{A_{ij}A_{kl}}$  entre le facteur  $A_i$  au niveau j et le facteur  $A_k$  au niveau l est donné par la moyenne des réponses lorsque  $A_i$  est au niveau j et  $A_k$  est au niveau l à laquelle on soustrait l'effet  $E_{A_{ij}}$ , l'effet  $E_{A_{kl}}$  et la moyenne M.

$$I_{A_{ij}A_{kl}} = (\text{Moyenne des réponses pour } A_{ij} \text{ et } A_{kl}) - E_{A_{ij}} - E_{A_{kl}} - M$$

- *Graphe des effets des facteurs* : il s'agit d'une manière commode de représenter l'évolution de la réponse en fonction des niveaux des différents facteurs. Il consiste à tracer, pour chaque facteur, la *moyenne des réponses obtenues* lorsqu'il prend ses différents niveaux. L'exemple de la Figure 4 correspond à un facteur A1 à trois niveaux, un facteur A2 à deux niveaux et un facteur A3 à quatre niveaux.

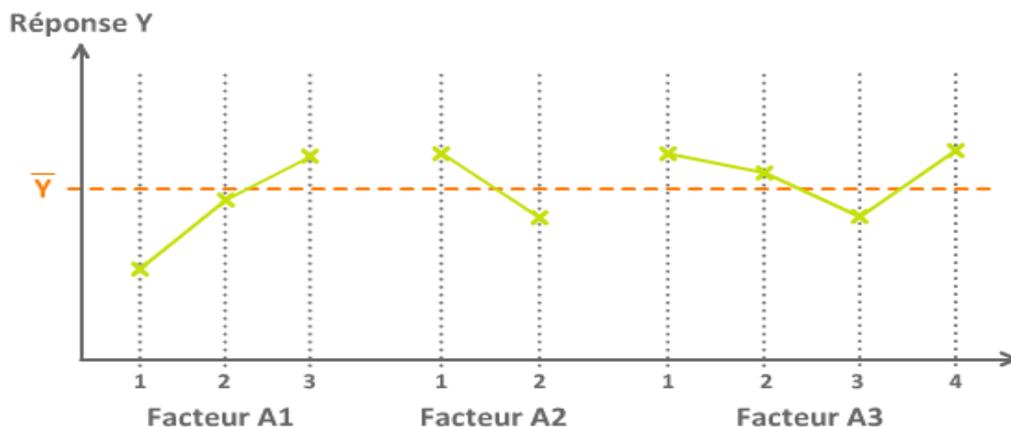


Figure. 13 Graphe des effets des facteurs

- *Graphe des effets des interactions* : il est construit sur le même principe que le graphe des effets des facteurs, à ceci près que l'on trace *plusieurs* courbes par facteur, correspondant aux effets moyens calculés *selon le niveau d'un autre facteur*. Des courbes confondues traduisent une interaction nulle ; des courbes très différentes traduisent une interaction forte. La Figure 5 donne des exemples d'interactions entre deux facteurs à deux niveaux.

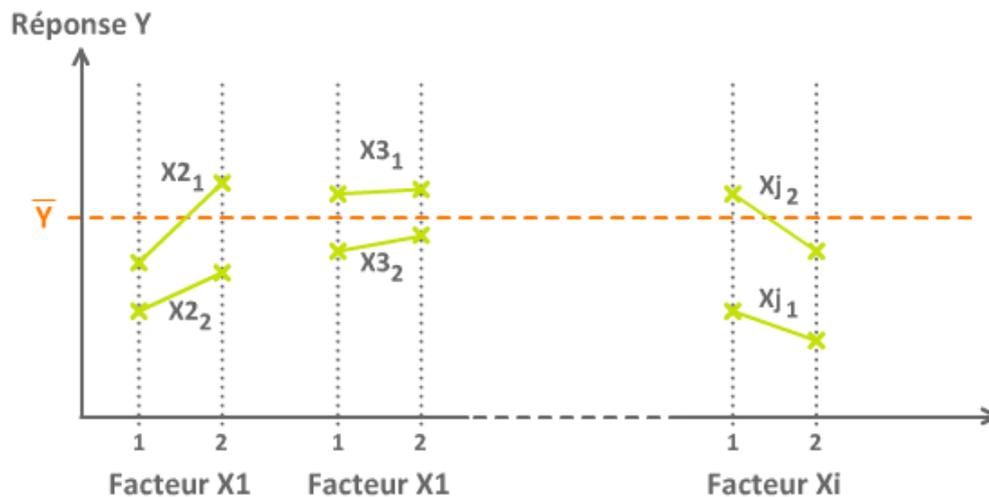


Figure. 14 Graphe des effets des interactions [MELLA P. 2009]

- **AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance leurs Effets et leurs Criticités)**

L'AMDEC est une méthode utilisée comme technique d'évaluation de fiabilité afin de déterminer les effets des défaillances de système. Cette méthode permet de prévenir les défaillances potentielles d'un produit d'un processus de fabrication ou d'une organisation. Elle s'appuie sur une analyse méthodique des risques potentiels qui permet de les hiérarchiser afin de traiter les plus importants de manière préventive. L'AMDEC permet d'obtenir la qualité par une action préventive.

Cet outil a pour objectif de détecter les défaillances d'un produit, définir les actions à entreprendre pour éliminer ces défaillances, réduire leurs effets et pour en empêcher ou en détecter les causes et documenter le processus du développement [GOGUE F. 1991].

Parmi plusieurs types d'AMDEC les plus utilisés sont:

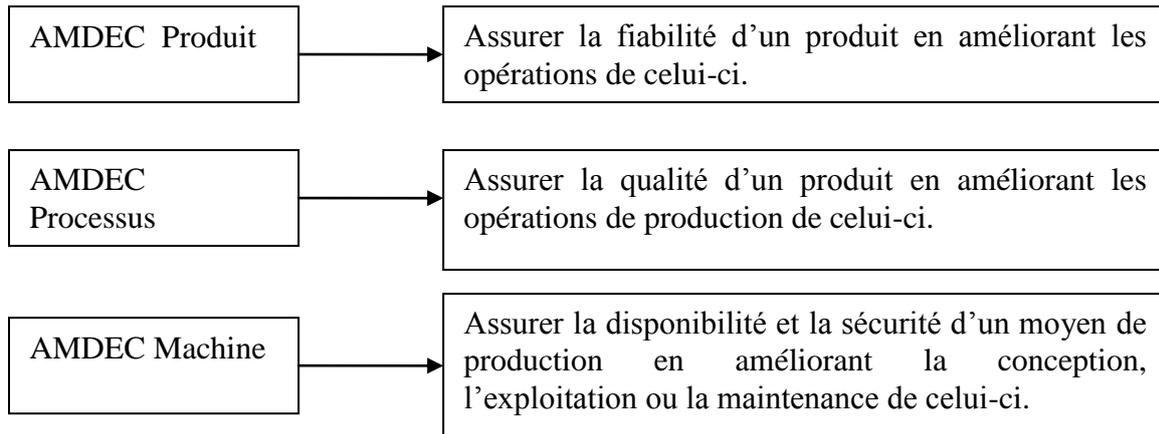


Figure. 15 Les types d'AMDEC

**Exemple numérique:**

En général on utilise des grilles d'évaluations adaptées au problème à étudier. Souvent on utilise une notation allant de 1 à 10 (il ne faut jamais coter zéro). Cependant l'expérience peut amener certaines entreprises à utiliser une notation de 1 à 5.

Note F	Fréquence ou probabilité d'apparition	Note G	Gravité	Note D	Probabilité de détection
10	Permanent	10	Mort d'homme	10	Aucune probabilité de détection
5	Fréquent	5	Conséquences financières et/ou matérielles	5	Un système de détection est en place mais n'est pas infallible
1	Rare	1	Pas grave	1	Le système de détection est infallible

Tableau. 4 Matrice de l'AMDEC [WIKIPEDIA 2009 b]

- **L'analyse de la valeur**

La norme NF X 50-152 donne la définition suivante:

«Méthode de compétitivité organisée et créative, visant à la satisfaction du besoin de l'utilisateur par une démarche à la fois fonctionnelle, économique et pluridisciplinaire.»

Cette méthode permet de concevoir un «produit» parfaitement adapté aux besoins de son utilisateur et ce, à moindre coût.

L'analyse de la valeur est largement développée dans les organismes qui sont fortement elle est utilisée dès la conception d'un produit qui peut être un produit existant ou nouveau, un processus ou un service.

- **L'analyse fonctionnelle**

Selon la norme NF X 50-150, l'analyse fonctionnelle consiste à rechercher, ordonner, caractériser et hiérarchiser les fonctions d'un produit. Il s'agit d'exprimer le besoin en termes

de fonctions pour établir un cahier des charges fonctionnel : donnée d'entrée de la conception. Les données d'entrées sont le cahier des charges marketing ou STB (Spécification Technique du Besoin), expression des besoins du client. La donnée de sortie sera le CdCF (Cahier des Charges Fonctionnel).

**Exemple numérique:**

Il s'agit d'étudier l'analyse fonctionnelle du produit «Logement»,

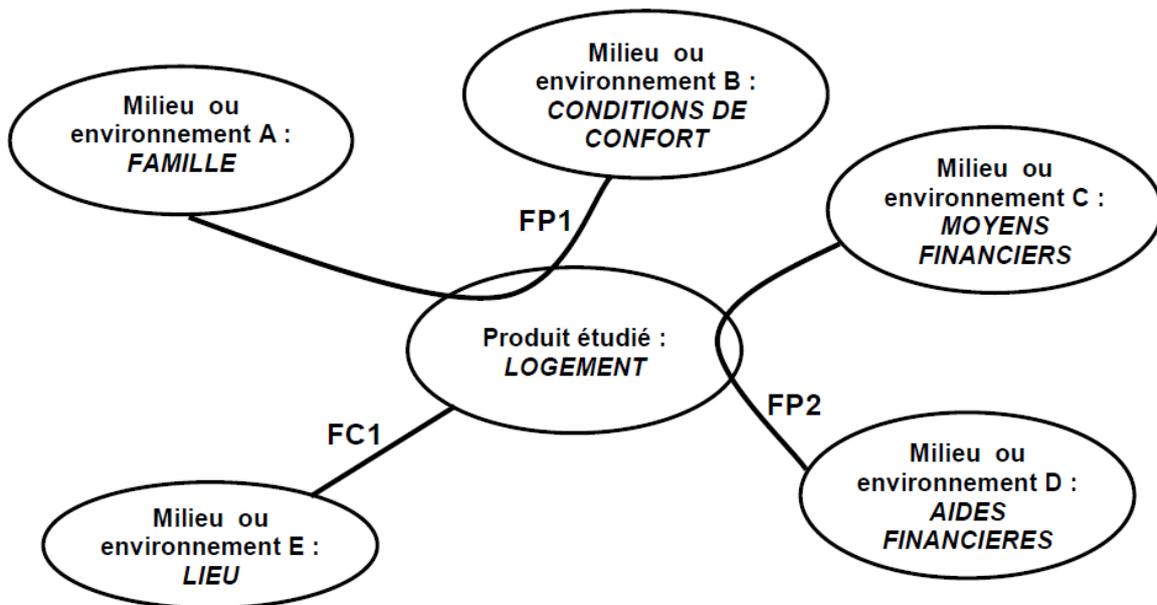


Figure. 16 Diagramme pieuvre

Le tableau fonctionnel est comme suit:

FONCTION	CRITERE	NIVEAU	FLEXIBILITE, LIMITES
FP1 : Loger une famille dans les conditions normales de confort	C11 : Nombre de membres	2 adultes,3 enfants	Aucune
	C12 : Nombre de chambres nécessaires	4 chambres	3 chambres éventuellement
FP2: Définir le logement en fonction des moyens financiers disponibles, et des aides associées au type de logement	C21 : Aide personnalisée au logement	Aucune	Aucune
	C22 : Salaires du couple	2 000€. Max	± 130 €
FC 1 : Respecter les contraintes de lieu d'habitation actuelle	C31 : Ecole des enfants	Aucun chgt	Aucune
	C32 : Lieu de travail du père	Rayon de 30 km	30 km Maximum
	C33 : Lieu de travail de la mère	Rayon de 5 km	+ 2 km acceptables
	C34 : Nourrice	Rayon de 5 km	+ 2 km acceptables

Tableau. 5 Tableau fonctionnel [SEVERIN P. 2009]

## **2.4 Les outils de la MSP**

La MSP (Maîtrise Statistique du Procédé) appelée aussi SPC (Statistical Process Control) réunit un ensemble de méthodes permettant de surveiller et d'améliorer un processus de production de point de vue statistique.

La **MSP** constitue la méthode la plus adéquate pour le suivi d'un processus de production complexe; elle est défini comme un ensemble d'actions permettant d'évaluer, de régler et de maintenir un processus de production en état de fabriquer tous ses produits conformes aux spécifications retenues, avec des caractéristiques stables dans le temps [AZZABI. L et al 2008 b].

De plus la maîtrise statistique du Procédé (MSP) est une méthode qui permet de contrôler et d'améliorer la qualité d'un produit ou d'un processus grâce à une analyse statistique. Le contrôle, qui porte sur des paramètres prédéfinis d'un produit ou d'un processus, s'effectue au cours de son élaboration ; il permet ainsi d'anticiper en intervenant sur le procédé avant que le défaut ne se produise. La MSP fait évoluer le contrôle d'une méthode a posteriori (contrôle du produit fini) à une méthode d'anticipation (contrôle en cours d'élaboration) [ANAES 2000].

Ses objectifs sont:

- analyser le procédé et identifier les paramètres à suivre par les plans d'expériences,
- stabiliser le procédé,
- réduire la variation du procédé,
- obtenir un produit ou un processus conformes à des exigences prédéfinies.

C'est une excellente méthode scientifique d'analyse des données, son rôle est de contribuer à Aussi, la MSP a passé par trois phases essentielles telle que:

- Les évolutions conceptuelles concernent principalement la notion de conformité du produit qui était largement fondée sur le simple respect des tolérances, elle est plus liée désormais au centrage sur la cible.
- Les évolutions méthodologiques concernent tous les aspects de la MSP, avec l'application de nouvelles cartes de contrôle, les évolutions sur les calculs des capacités interne et externe de l'entreprise; elle permet d'assurer une qualité optimum par l'utilisation de l'outil statistique en donnant les moyens aux opérateurs de réaliser une production centrée de dispersion la plus faible possible [AZZABI. L et al 2008 b].

D'après [PILLET. M 2002] « La MSP représente une des marches importantes permettant d'améliorer de façon importante la qualité et la fiabilité des produits par une plus grande maîtrise des procédés ».

La MSP vise l'amélioration de la qualité d'un produit ou d'un processus en s'appuyant sur une analyse statistique. Les dispersions dans un procédé sont dues à deux types de causes : [ANAES 2000]

- **Les causes communes** sont les nombreuses sources de variations dues au hasard. Les statistiques permettent de les modéliser et elles sont représentées par une courbe de Gauss.

*Exemples de causes communes :*

- jeux dans la chaîne cinématique de la machine ;
- défaut de la broche de la machine.

- **Les causes spéciales** sont les causes de dispersion identifiables, irrégulières, instables et difficiles à prévoir. L'apparition d'une cause spéciale nécessite une intervention sur le processus ; les causes spéciales sont peu nombreuses. La MSP prévient leur apparition. La dispersion sera visualisée en temps réel sur une carte de contrôle, ce qui permettra une intervention rapide de l'opérateur dès qu'une dérive provoquée par une cause spéciale sera mise en évidence.

*Exemple de causes spéciales :*

- dérèglement d'un outil ;
- usure d'un outil ;
- mauvaise lubrification.

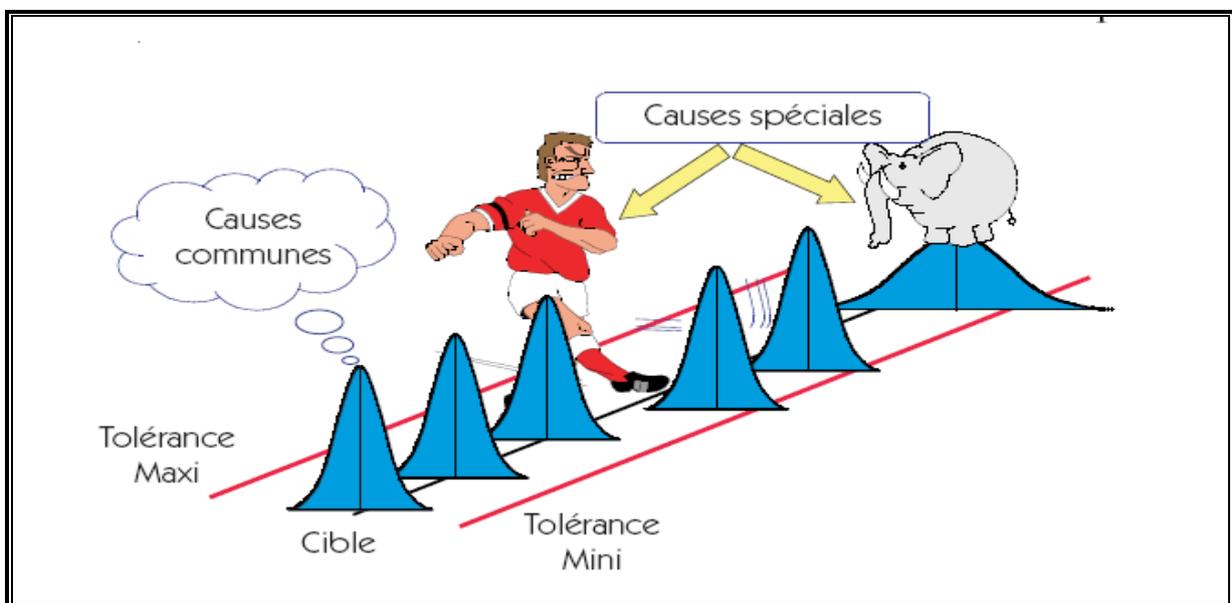


Figure. 17 les causes communes et les causes spéciales

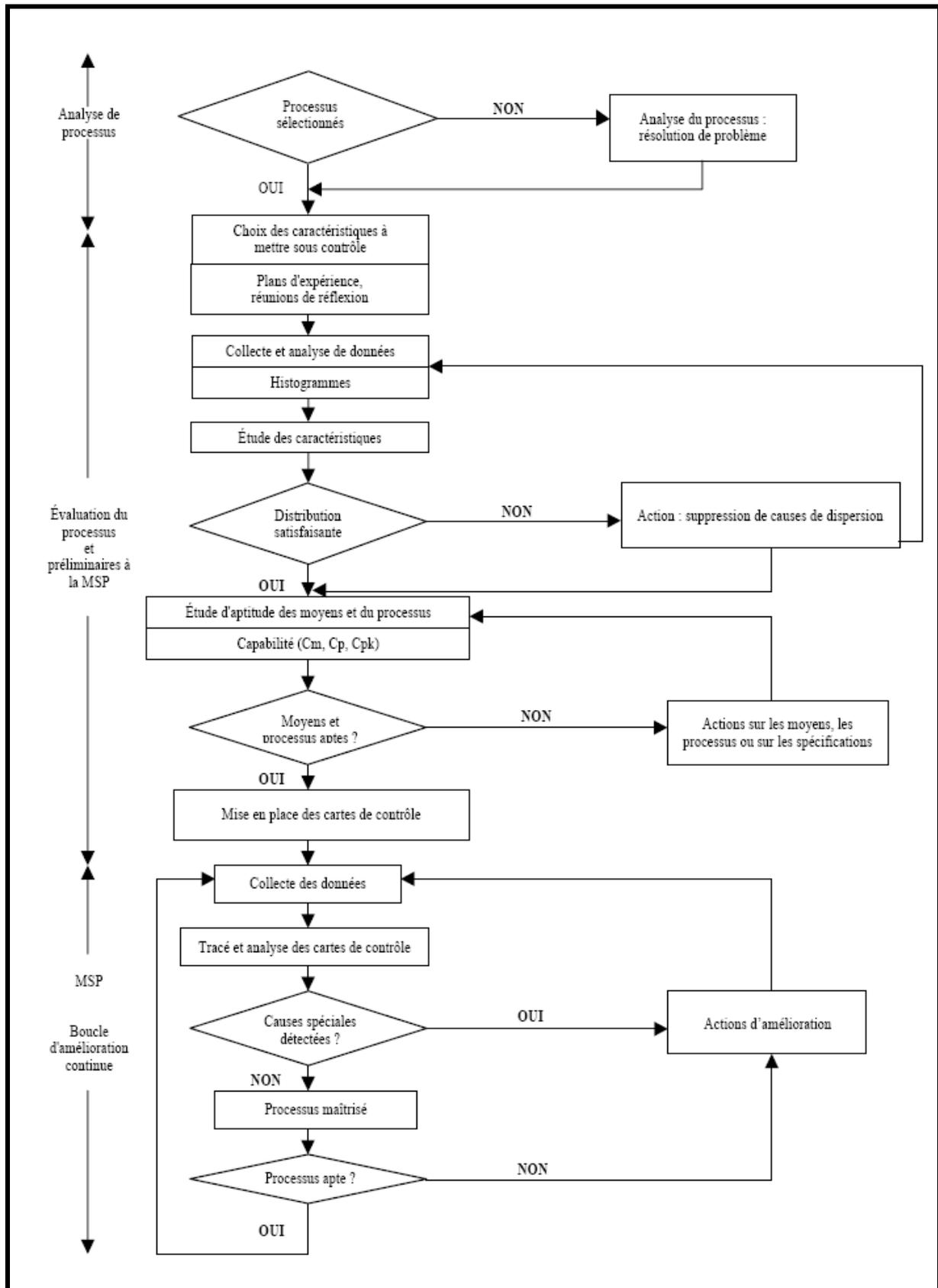


Figure. 18 Démarche générale de la M.S.P [ANAES 2000]

A la base de ces techniques, on trouve les cartes de contrôle du Shewhart qui sont à l'origine de la théorie des variations. Plus généralement, le but de la MSP est de surveiller l'évolution temporelle d'un processus et de détecter les changements qui peuvent affecter ses performances. La MSP est fondée sur le concept de l'état stable. Il est indispensable de bien connaître ce concept pour utiliser correctement la méthode. Un système stable est un système qui a les performances prévisibles. Au contraire un système instable est absolument imprévisible. Le jugement sur la stabilité entraîne deux approches différentes et complémentaires [LA JAUNE ET LA ROUGE 2001]:

- *Système instable* : Stratégie d'action intensive pour identifier le plus tôt possible les causes d'instabilité, puis les éliminer autant que possible, ou au moins y remédier.
- *Système stable* : Stratégie de veille pour détecter des signes éventuels d'instabilité. Il est possible également dans un tel système de déplacer la moyenne et de diminuer la variabilité, pour des raisons économiques. Des problèmes existent aussi bien dans un système stable que dans un système instable, mais dans le premier cas ils sont imputables au système lui-même, alors que dans le second ils sont imputables à des événements particuliers.

Dans ce contexte, la MSP est considéré le plus souvent comme un ensemble des outils : carte de contrôle, capabilité; [STOUBOS Z. 2002], [PHILLIPS A. et al 1997] et [TIPLICA T. et al 2002] ... La notion de MSP n'a pas eu toujours de significations claires pour les ingénieurs de différents domaines : électronique, automatique, mécanique. Ils associent souvent la notion de la MSP avec le contrôle prédictif, avec le contrôle adaptatif ou avec le contrôle proportionnel- intégral dérivé [TIPLICA T. et al 2002].

#### **2.4.1 Les 5 « M » du processus**

Tous les processus, quels qu'ils soient, sont incapables de produire toujours exactement le même produit. Cela tous les opérateurs le savent bien et c'est d'ailleurs un des problèmes principaux auxquels les régleurs sont confrontés tous les jours [PILLET M. 2005].

Quelle que soit la machine étudiée, la caractéristique observée, on note toujours une **dispersion** dans la répartition de la caractéristique [PILLET M. 2005].

Cette variabilité est incontournable et il faut être capable de « vivre avec ». Ces variations proviennent de l'ensemble du processus de production. L'analyse des processus de fabrication permet de dissocier 5 éléments élémentaires qui contribuent à créer cette dispersion. On désigne généralement par les 5 M ces 5 causes fondamentales responsables de dispersion, et donc de non-qualité : [PILLET M. 2005]

La méthode MSP a pour objectif la maîtrise des processus en partant de l'analyse de ces 5 M. Elle apporte une plus grande rigueur et des outils méthodologiques qui vont aider les opérateurs et la maîtrise dans leur tâche d'amélioration de la qualité.

#### **2.4.2 Les cartes de contrôle**

Aujourd'hui, les cartes de contrôle classiques sont utilisées dans plusieurs applications en « temps réel ». L'utilisation d'une carte de contrôle repose sur l'échantillonnage d'un processus qui évolue dans le temps. Il faut établir la variable mesurée, la taille d'échantillon, l'intervalle entre deux prélèvements successifs et les règles de décision appliquées. [PAGES E. 1954] et [ROBERTS S. 1959] ont développé des cartes de contrôle CUSUM (Cumulative Sum) et EWMA (Exponentially Weighted Moving Average) plus performantes pour détecter des dérèglages de faible amplitude dans le cas uni varié (le contrôle s'effectue pour une seule dimension). La plupart des systèmes actuels sont caractérisés par des ensembles de variables corrélées ou non dans le cas multi varié (le contrôle s'effectue pour plusieurs dimensions à la fois) et pour ces systèmes ont été développés des procédures de contrôle basées sur la statistique  $T^2$  de Hotelling et l'analyse en composante principale. [TIPLICA T. et al 2001] a présenté une étude comparative de ces différentes techniques dans le cas de processus multi varié.

La carte de contrôle est l'un des outils de base utilisé pour la maîtrise statistique des procédés. C'est une représentation graphique constituée d'une suite d'images de la production. Elle permet de visualiser la variabilité du procédé en distinguant les causes aléatoires des causes assignables [DUCLOS E. et al 1997].

Une carte de contrôle est un graphique représentant des images successives de la production, prises à une certaine « fréquence de prélèvement », à partir d'échantillons prélevés sur la production. On reporte sur le ou les graphiques de la carte les différents calculs effectués sur les échantillons (moyenne, écart-type, étendue, nombre, pourcentage, ...). De ce fait on peut citer une multitude des types des cartes de contrôle qui diffèrent selon les caractéristiques à mesurer ou à contrôler, on peut citer : [AYADI. D et al 2008 a]

C'est l'outil statistique qui permet de suivre les fluctuations d'une caractéristique mesurable ou dénombrable et d'en diagnostiquer les situations non maîtrisées. C'est un outil de qualité de référence normative dans les normes ISO.

- **Les cartes de contrôle aux mesures**

comprend deux graphiques, un pour suivre la tendance centrale, l'autre pour suivre la dispersion du procédé,

- **Les cartes de contrôle par mesure ( $\bar{X} - R$ ):** Ces cartes sont utilisées pour une étude rétrospective, c'est-à-dire pour analyser des données rassemblées précédemment, leurs lignes centrales et leurs limites de contrôle sont calculés à partir d'estimation des paramètres de la caractéristique de suivie, ces cartes sont appelées cartes de contrôles pour la maîtrise ou cartes de contrôle d'étendue initiale [JAUPI L. 2002].

-**La carte de contrôle moyenne  $\bar{X}$  :**

La carte de contrôle moyenne est utilisée pour détecter la présence des causes spéciales qui affectent la tendance centrale du processus, elle permet de montrer les variations de la moyenne des échantillons. La moyenne ainsi que les limites de contrôle sont calculées comme suit:

$$\bar{X}_i = \frac{\sum X_i}{n}$$

$$LC = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \dots + \bar{X}_m}{m}$$

$$LIC = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R}$$

$$LSC = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R}$$

Avec : n = taille de l'échantillon;

m = nombre de l'échantillon;

A<sub>2</sub> = dépend uniquement de la taille de l'échantillon;

R = l'étendue.

La règle de décision : si tous les points  $\bar{X}_i$  sont à l'intérieur des limites de contrôles, le processus est déclaré stable, dans le cas contraire, le processus est déclaré instable [JAUPI L. 2002].

**Exemple numérique:**

L'objectif du contrôle du produit fini bidon relax 4l est de déterminer l'adéquation des produits de l'échantillon selon la caractéristique poids, et l'instrument utilisé pour le contrôle du caractéristique poids est la balance; L'échantillon pris comprend 25 prélèvement, pour chacun de ces exemplaires on a pris 5 mesures pour un délai de contrôle 30mn, les résultats des suivis sont dans la cartes qui suit:

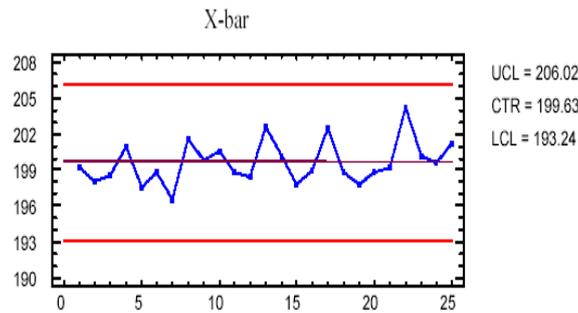


Figure. 19 Carte de contrôle  $\bar{X}$  [AYADI. D et al 2008 c]

**-La carte de contrôle étendue R:**

La carte de contrôle de l'étendue est utilisée pour détecter toute cause assignable qui affecte la variabilité du processus puisqu'elle met en évidence les variations de l'étendue des échantillons. La moyenne ainsi que les limites de contrôle sont calculées comme suit :

$$R_i = X_{\max} - X_{\min}$$

$$LC = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_m}{m}$$

$$LIC = D_3 \bar{R}$$

$$LSC = D_4 \bar{R}$$

Avec:  $D_3$  et  $D_4$  qui dépendent uniquement de la taille de l'échantillon;

La règle de décision : si tous les points  $R_i$  sont à l'intérieur des limites de contrôles, le processus est déclaré maîtrisé, sinon le processus est déclaré non maîtrisé [JAUPI L. 2002].

**Exemple**

La cartographie de l'échantillon décrit dans la section «La carte de contrôle moyenne  $\bar{X}$  » selon l'étendue est schématisée dans la carte R comme suit:

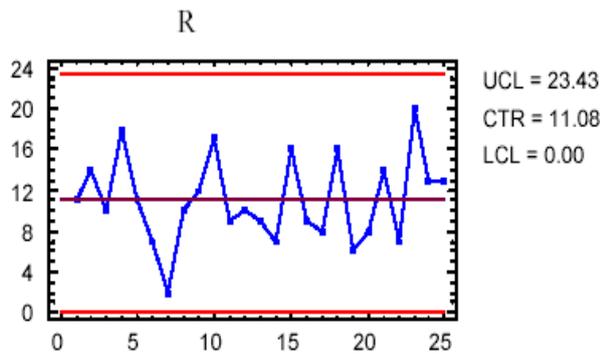


Figure. 20 Carte de contrôle R [AYADI. D et al 2008]

Elles sont utilisées pour plusieurs raisons:

**Leurs champs d'application:** la majorité des procédés et leur production ont des caractéristiques mesurables. Le champ d'application de la carte par variable est donc très large et adaptable sous différentes formes à des procédés de nature très différentes, de la production en série aux procédés continus.

**La richesse de l'information:** une valeur mesurée (*le diamètre est de 4,2 mm*) apporte plus d'informations qu'un seul contrôle au gabarit (*le diamètre est bon*). On peut ainsi suivre l'évolution d'une caractéristique dans le temps et avoir une action préventive sans que la dérive ne crée des non conformités [AYADI. D et al 2008].

**Un coût plus faible :** généralement elle est moins coûteuse car l'observation de la conformité et de la non conformité du produit, pour être fiable, exige le contrôle d'un grand nombre de pièces.

**Une réaction plus rapide :** le nombre de mesures étant faible (se limite en général à 5 mesures) le temps de réaction pour prendre une mesure corrective ou préventive peut être raccourci. Ainsi le pilote a un retour d'informations immédiat sur la performance de son procédé et peut donc réagir en temps réel et constater l'impact de la mesure corrective ou préventive qu'il aura prise.

**Enfin, elle favorise l'amélioration continue:** avec des données mesurées, la performance du procédé peut être évaluée et analysée, même si toutes les valeurs sont dans les spécifications du client.

C'est un atout important pour promouvoir une dynamique d'amélioration continue. Le pilote du procédé ne travaille plus uniquement pour faire un **produit« bon »** au regard des spécifications mais surtout pour réaliser la production la moins dispersée qui soit, compte tenu

de la capacité de son procédé. Il gère un potentiel qui est la performance du procédé dont il doit maximiser l'impact.

- **Les cartes de contrôle aux attributs :**

Pour des données de type attribut, telles que BON/MAUVAIS, les cartes les plus utilisées affichent des taux ou des proportions. Lorsque les tailles des échantillons varient, les limites de contrôle dépendent de ces tailles.

**-La carte de contrôle p :**

Les étapes à suivre sont:

- constitution des échantillons,
- choix de la taille de l'échantillon (de 50 à 200),
- fréquence d'échantillonnage : doit permettre un suivi réaliste par rapport aux mesures correctives à apporter,
- nombre d'échantillon : 20 à 30,
- calcul des proportions (%).

Avec:  $p$  = proportion d'articles non conformes : Nombre de non conformes / Taille de l'échantillon

$n$  = nombre d'articles contrôlés dans un échantillon ou sous-groupe

$np$  = le nombre de non-conformes

$k$  = le nombre d'échantillon

$\bar{p}$  = la proportion moyenne de non-conformes qui définit la ligne moyenne

$$\bar{p} = \frac{\sum np}{k}$$

**Les limites sont calculées de la façon suivante : [JAUPI L. 2002]**

Calcul des limites:

$$LSC = \bar{p} + 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}$$

$$LC = \bar{p}$$

$$LIC = \bar{p} - 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}$$

**Exemple numérique:**

Il s'agit d'étudier la conformité du produit pharmaceutique, le calcul des cartes de contrôle est comme suit:

LSC=0.13

LC=0.06

LIC=0

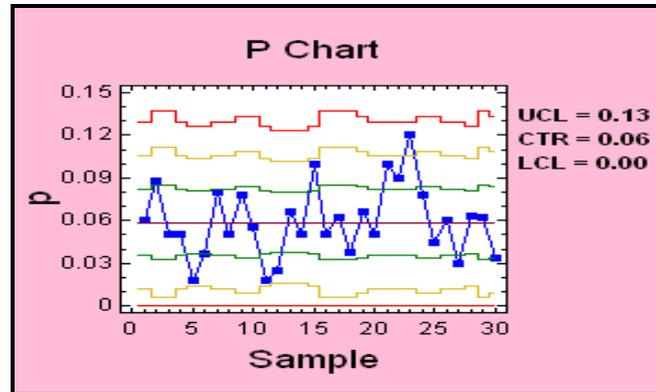


Figure. 21 Carte de contrôle P

**-La carte de contrôle np:**

La carte **p** permet le suivi de la proportion d'unités non conformes ; la carte **np** permet le suivi du nombre d'unités non conformes. Cette carte est une carte de Shewhart : les limites de contrôle sont situées à trois écarts types. Pour cette carte, les échantillons doivent tous être de même taille. Comme pour la carte **p**, la carte **np** nécessite de prélever des échantillons de grande taille (quelques centaines d'objets) [JAUPI L. 2002].

Le nombre d'unités non conforme est **np**. C'est le produit de la taille des échantillons : n, avec la proportion d'unités non conformes : **p**.

On suppose que le nombre théorique d'unités non conformes dans les échantillons de n unités est : **np**.

On pose  $q = 1 - p$ . Les paramètres de la carte de phase II sont alors : [JAUPI L. 2002]

$$LSC = np + 3\sqrt{npq}$$

$$LC = np$$

$$LIC = np - 3\sqrt{npq}$$

Si la valeur LSC calculée ci-dessus est négative, elle est remplacée par 0 pour la construction de la carte. Sur la carte de contrôle, on porte la ligne centrale, les limites de contrôle et les points  $M_i$  de coordonnées  $(i; n_i)$ ,  $n_i$  étant le nombre d'unités non conformes dans l'échantillon  $i$ . Si tous les points  $M_i$  sont situés entre les limites de contrôle, le processus est déclaré maîtrisé ; dans le cas contraire, le processus est déclaré non maîtrisé.

**-La carte de contrôle c:**

La carte c est la carte utilisée pour le suivi du nombre de non conformités, de défauts, par unité de contrôle. Cette carte est assez basique puisque l'on ne distingue pas les défauts et que l'on considère qu'ils ont tous la même importance. En principe, on estime que la variable aléatoire C qui associe à chaque unité de contrôle le nombre de non conformités par unité de contrôle, suit une loi de Poisson. On rappelle qu'alors la moyenne et la variance de C sont égales. La carte C est une carte de Shewhart.

Soit c le nombre moyen de non conformité par unité de contrôle. Ce nombre c est le paramètre de la loi de Poisson suivie par la variable aléatoire C. Les paramètres de la carte c de phase II sont :

$$LSC = c + 3\sqrt{c}$$

$$LC = c$$

$$LIC = c - 3\sqrt{c}$$

On prélève un certain nombre d'unités de contrôle. Ces unités de contrôles sont des échantillons tous de même taille. Si le calcul de LIC donne un résultat négatif, ce résultat est remplacé par 0. Sur la carte de contrôle, on porte la ligne centrale, les limites de contrôle et les points  $M_i$  de coordonnées  $(i; c_i)$ ,  $c_i$  étant le nombre de défauts de l'unité de contrôle i. Si tous les points  $M_i$  sont situés entre les limites de contrôle, le processus est déclaré maîtrisé ; dans le cas contraire, le processus est déclaré non maîtriser [JAUPI L. 2002].

**-La carte de contrôle u:**

La carte u est semblable à la carte c. Dans la carte u on ne suit pas le nombre de non conformités par unité de contrôle, mais le taux de non conformités par unité de contrôle. Les unités de contrôle : les échantillons d'unités de production, peuvent être de taille variable, mais dans ce cas, les limites de contrôle dépendent, pour chaque unité de contrôle, de la taille de l'unité de contrôle.

On suppose que le taux de défauts par unités de contrôle est u. Les limites de la carte u sont alors :

$$LSC = u + 3\sqrt{\frac{u}{n_i}}$$

$$LC = u$$

$$LIC = u - 3\sqrt{\frac{u}{n_i}}$$

Où  $n_i$  est la taille de l'unité de contrôle  $i$ . Si le calcul de  $LIC$  donne un résultat négatif, on pose

$LIC = 0$ . On prélève un certain nombre d'unités de contrôle. Ces unités de contrôles sont des échantillons dont la taille peut varier. Sur la carte de contrôle, on porte la ligne centrale, les limites de contrôle et les points  $M_i$  de coordonnées  $(i; u_i)$ ,  $u_i = c_i/n_i$  étant le taux de défauts de l'unité de contrôle  $i$ . Si tous les points  $M_i$  sont situés entre les limites de contrôle, le processus est déclaré maîtrisé ; dans le cas contraire, le processus est déclaré non maîtriser [JAUPI L. 2002].

#### -La carte de contrôle D:

La carte de contrôle D est une carte de contrôle des démerites. C'est un raffinement de la carte C. Dans le cadre d'une carte D, les défauts sont classés par type, en fonction de leur gravité. À chaque classe de défaut est associé un poids : la valeur du démerite, d'autant plus important que le défaut est majeure.

Notons  $C_1, C_2, \dots, C_k$  les classes de défauts et  $w_1, w_2, \dots, w_k$  leurs poids respectifs.

On fixe le nombre  $n$  d'unités élémentaires dans chaque unité de contrôle (la taille des échantillons).

Pour chaque nombre  $n$  d'unités élémentaires dans les échantillons, on fixe l'indice démerite D par :

$$D = \sum_{i=1}^k w_i c_i$$

Où  $c_i$  est le nombre moyen de défauts de classe  $C_i$  dans les échantillons de taille  $n$ . Notons que si  $n = 1$ , alors  $c_i$  est le nombre de défauts de classe  $C_i$  par unité produite.

Les paramètres de la carte D sont :

$$LSC = D + 3 \sqrt{\sum_{i=1}^k w_i^2 c_i}$$

$$LC = D$$

$$LIC = D - 3 \sqrt{\sum_{i=1}^k w_i^2 c_i}$$

Si  $LIC < 0$ , on pose  $LIC = 0$ . On prélève  $m$  unités de contrôle ( $m$  échantillons de taille  $n$ ).

On calcule, pour chaque unité de contrôle, son nombre démerite :

$$D_j = \sum_{i=1}^k w_i c_{ij}$$

Où  $c_{ij}$  est le nombre de défauts de classe  $i$  dans l'unité de contrôle  $j$ . On trace sur la carte  $D$  la ligne centrale et les limites de contrôle. On porte sur cette carte les points  $M_j$  de coordonnées  $(j; D_j)$ ,  $j$  allant de 1 à  $m$ . La règle de décision est identique à celle des autres cartes de contrôle. Ainsi les avantages des cartes de contrôle par attributs sont souvent les premières cartes implantées dans les entreprises car elles offrent des avantages facilitant leur mise en œuvre et les rendant immédiatement opérationnelles. Ainsi, les données nécessaires à l'établissement de ces cartes sont :

- pratiquement identifiables pour tout procédé,
- souvent déjà disponibles,
- rapides et simples à obtenir,
- fréquemment utilisées dans les rapports de production,
- efficaces pour définir les zones prioritaires pour les améliorations,
- faciles à comprendre sous forme de carte de contrôle.

En effet, la mesure de la conformité est le plus souvent le résultat de l'expression d'un jugement. Or ce jugement peut varier d'une personne à l'autre, et pour une même personne varier dans le temps [JAUPI L. 2002].

- **Les cartes de contrôle spécifiques :**

Les cartes de contrôle spécifiques sont essentiellement utilisées lorsque les caractéristiques du processus que l'on cherche à maîtriser présentent des dérèglages de petites tailles et qui ne peuvent pas être détectés par les cartes de contrôle aux mesures ou aux attributs. Ces cartes spécifiques englobent les types suivants:

- **La carte de contrôles moyennes mobiles (MA) :**

La carte de contrôle moyennes mobile (MA) est plus efficace que la carte de contrôle de Shewhart pour la détection des petits dérèglages de processus. Elle est simple à mettre en place et à exploiter. Supposons que la caractéristique de qualité suivie est  $x \sim N(\mu, \sigma)$  et que

l'on prélève des échantillons de taille constante  $n$ . Soient  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_t$  les moyennes respectives des échantillons prélevés. La moyenne mobile de durée  $b$  à l'instant  $t$ , notée  $Mt$ , est définie par:

$$M_t = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_{t-1} + \dots + \bar{x}_{t-b+1}}{b}$$

Avec ; b : horizon, ordre ou amplitude de la moyenne mobile.

Les limites de contrôle de la carte MA d'ordre b sont données par :

$$LC = \bar{x} \pm 3 \frac{\sigma}{\sqrt{nb}} \text{ pour } 1 \leq t < b$$

$$LC = \bar{x} \pm 3 \frac{\sigma}{\sqrt{nb}} \text{ pour } t \geq b$$

**Exemple numérique:**

Nous proposons d'appliquer la carte de contrôle moyenne mobile (MA) pour la détection des petits dérèglages de processus de contrôle de produit fini bidon.

LSC = 201.76

LC = 199.93

LIC = 197.50

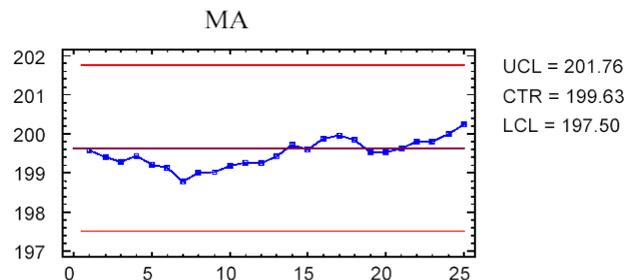


Figure. 22 Carte de contrôle MA [AYADI. D et al 2008]

**- La carte de contrôles moyennes mobiles avec pondération exponentielle (EWMA)**

La carte EWMA représente les initiales d'Exponentially Weighted Moving Average qui peut se traduire par moyenne mobile à pondération exponentielle. Ces cartes sont très adaptées dans les cas suivants:

- détection de petits écarts par rapport à la cible;
- suivi des valeurs individuelles.

La carte EWMA est basée sur la statistique  $Z_t$  est une moyenne pondérée qui exploite tout le passé du processus.

Les limites de contrôle de la carte EWMA sont variables. Pour la période initiale de la mise en service d'une carte EWMA, c'est-à-dire pour de petites valeurs de  $t$ , elles sont données par [AYADI. D et al 2008]:

$$Z_t = w\bar{x}_t + (1 - w) Z_{t-1}$$

$$\text{où } 0 < w < 1$$

$$LCZ_t = \bar{x} \pm 3 \sigma \sqrt{\frac{w [1 - (1-w)^{2t}]}{n(2-w)}}$$

Pour de grandes valeurs de  $t$ , en exploitant l'équation (a) on obtient:

$$LCZ_t = \bar{x} \pm 3 \sigma \sqrt{\frac{w}{n(2-w)}}$$

### Exemple numérique:

Nous proposons d'appliquer la carte de contrôles moyens mobiles avec pondération exponentielle (EWMA) pour la détection des petits dérèglages de processus de contrôle de produit fini bidon. Le but qu'on veut atteindre c'est la détection de petits écarts par rapport à la cible et le suivi des valeurs individuelles.

$$LSC=22.24$$

$$LC=21.50$$

$$LIC=20.75$$

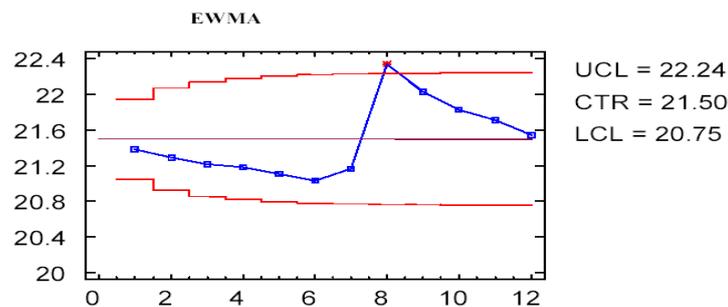


Figure. 23 Carte de contrôle EWMA [AYADI. D et al 2008]

- *Les cartes de contrôle multidimensionnel:*

La carte de contrôle multidimensionnel est un graphique utilisé pour le contrôle de plusieurs caractéristiques de la qualité [FEY R. et al 1981].

#### - La carte de contrôle multimodale $T_2$

Soit  $\mathbf{X}$  un vecteur de dimension  $p$  où chaque composante représente une caractéristique Produit/processus [JAUPI L. 2002].

Nous ferons l'hypothèse que la connaissance disponible sur l'historique du processus se limite à  $M$  modes de fonctionnement ( $M > 2$ ) :

- Etat sous contrôle statistique : fonctionnement normal (pas d'anomalie): état  $\omega_0$ ,
- Etats hors contrôle : type d'anomalie 1: état  $\omega_1$ , type d'anomalie 2: état  $\omega_2 \dots$

Par rapport à chaque état  $\omega_i$ , on définit une statistique  $T_{2i}$ : [AYADI. D et al 2008]

Où:

$$T_i^2 = (\mathbf{X}_i - \bar{\mathbf{X}})' \mathbf{S}^{-1} (\mathbf{X}_i - \bar{\mathbf{X}})$$

$$\bar{\mathbf{X}}_i = \frac{\sum_{k=1}^n \mathbf{X}_k}{n}, \mathbf{S} = \frac{\sum_{k=1}^n (\mathbf{X}_k - \bar{\mathbf{X}})(\mathbf{X}_k - \bar{\mathbf{X}})'}{n-1}$$

$\bar{\mathbf{X}}_i$  et  $\mathbf{S}_i$  désignent respectivement le vecteur moyenne et la matrice de covariance estimés sur un ensemble de données historiques de taille  $n$  caractérisant l'état du processus  $\omega_i$ .

**Exemple numérique:**

Il s'agit de données extraites de mesures concernant un réacteur chimique pilote, en phase d'étude, données qu'il n'est pas possible de détailler pour des raisons de confidentialités. L'échantillon de contrôle est composé de 4 groupes de variables «Hydro», qui ont particulièrement intéressé les responsables du groupe. Le graphique de la carte T2 est comme suit:

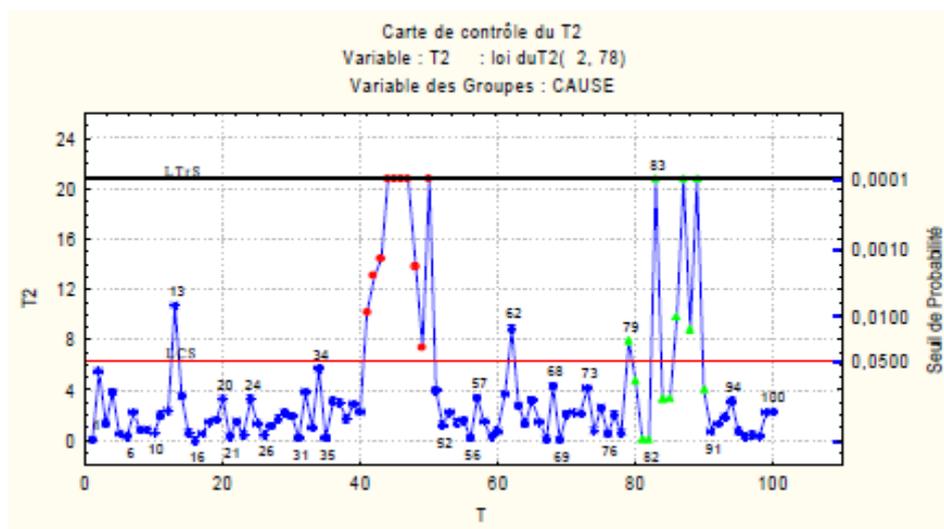
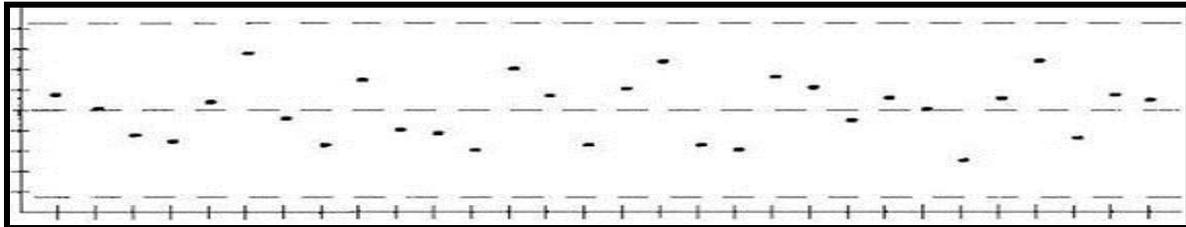


Figure. 24 Carte de contrôle T2 [MICHEAUX DL. 2000]

### 2.4.3 Interprétation des cartes de contrôle

Les cartes de contrôle recèlent des informations qui peuvent aider à la prise d'actions correctives.

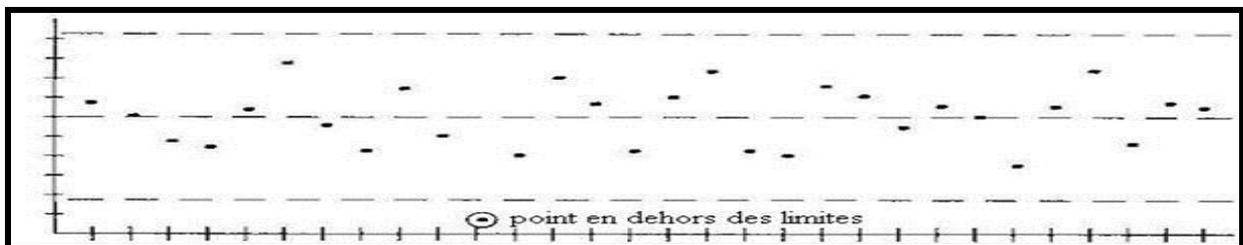
- *Modèle normal*



**Figure. 25** Représentation graphique d'un Modèle normal

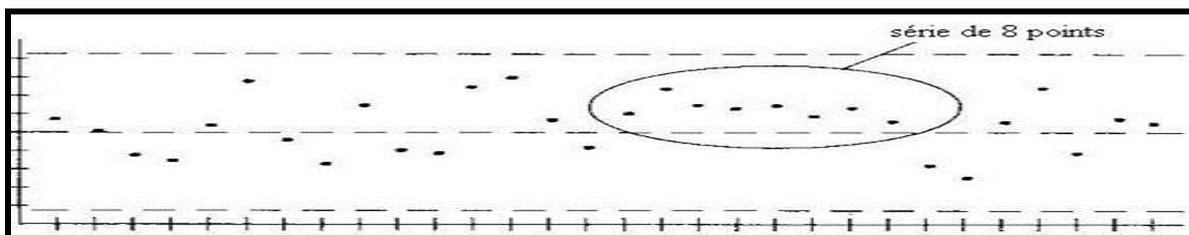
Dans cette carte de contrôle, les points sont distribués de façon à peu près symétrique de part et d'autre de la tendance centrale. Aucun point n'est en dehors des limites et il n'y a pas de successions de points qui pourraient indiquer la présence de causes assignables.

- *Présence de causes assignables*



**Figure. 26** Représentation graphique d'un Modèle contient des causes assignables

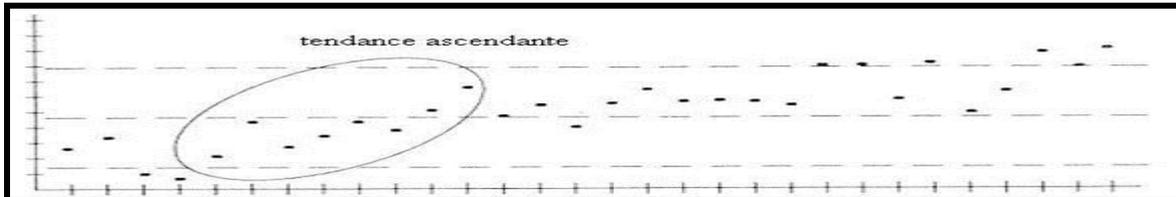
Sur cette carte de contrôle est représenté un point en dehors des limites. Dans le cas d'une carte étendue ou écart-type, il peut par exemple traduire une dispersion trop importante.



**Figure. 27** Représentation graphique d'un Modèle contient une série de 8 points

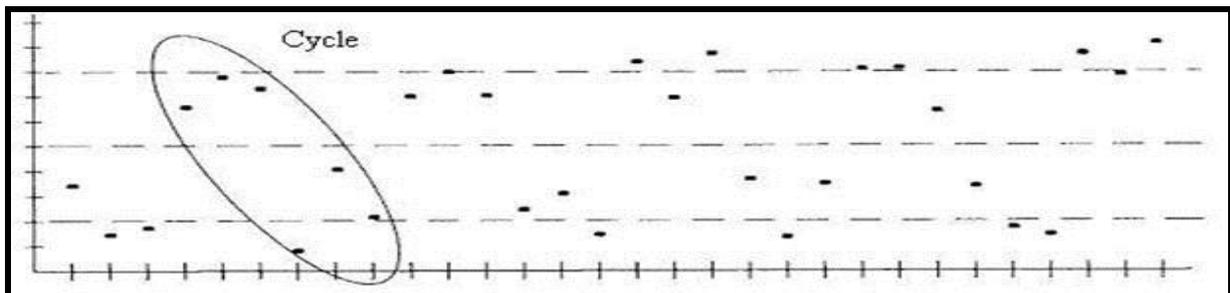
La série de 8 points au-dessus de la moyenne, indique qu'il existe une grande tendance dans le procédé de fabrication et qu'il y a là aussi une variabilité qui n'est pas normale.

A l'inverse de la carte précédente, tous les points sont regroupés sur la tendance centrale. La variabilité normale du procédé n'est pas montrée, et cette disposition des points souligne que les limites doivent être recalculées.



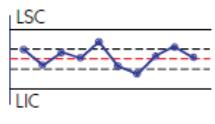
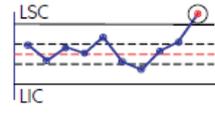
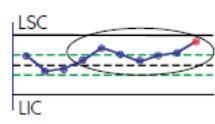
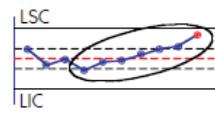
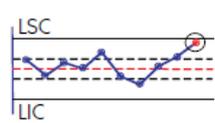
**Figure 28 Représentation graphique d'un Modèle contient une tendance centrale**

Cette carte souligne des tendances régulières d'une succession de grands nombres de points à croître vers le haut. La tendance générale montre le dépassement des limites de contrôle.



**Figure. 29 Représentation graphique d'un Modèle contient la présence de cycles de points au voisinage des limites supérieure et inférieure**

Cette carte indique la présence de cycles de points au voisinage des limites supérieure et inférieure, de façon presque régulière. Il doit donc s'agir d'une cause assignable.

Graphique	Description	Décision carte des moyennes	Décision carte des étendues
	<p><b>Processus sous contrôle</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Les courbes <math>\bar{X}</math> et R oscillent de chaque côté de la moyenne.</li> <li>• 2/3 des points sont dans le tiers central de la carte.</li> </ul>	<b>Production</b>	<b>Production</b>
	<p><b>Point hors limites</b></p> <p>Le dernier point tracé a franchi une limite de contrôle.</p>	<p><b>Régler le processus</b></p> <p>de la valeur de l'écart qui sépare le point de la valeur cible.</p>	<p><b>Cas limite supérieure</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La capacité court terme se détériore. Il faut trouver l'origine de cette détérioration et intervenir.</li> <li>• Il y a une erreur de mesure</li> </ul> <p><b>Cas limite inférieure</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La capacité court terme s'améliore</li> <li>• Le système de mesure est bloqué</li> </ul>
	<p><b>Tendance supérieure ou inférieure</b></p> <p>7 points consécutifs sont supérieurs ou inférieurs à la moyenne.</p>	<p><b>Régler le processus</b></p> <p>de l'écart moyen qui sépare la tendance à la valeur cible</p>	<p><b>Cas tendance supérieure</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La capacité court terme se détériore. Il faut trouver l'origine de cette détérioration et intervenir.</li> </ul> <p><b>Cas tendance inférieure</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La capacité court terme s'améliore. Il faut trouver l'origine de cette amélioration pour la maintenir.</li> </ul>
	<p><b>Tendance croissante ou décroissante</b></p> <p>7 points consécutifs sont en augmentation régulière ou en diminution régulière.</p>	<p><b>Régler le processus</b></p> <p>si le dernier point approche les limites de contrôle de l'écart qui sépare le dernier point à la valeur cible</p>	<p><b>Cas série croissante</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La capacité court terme se détériore. Il faut trouver l'origine de cette détérioration et intervenir.</li> </ul> <p><b>Cas série décroissante</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La capacité court terme s'améliore. Il faut trouver l'origine de cette amélioration pour la maintenir.</li> </ul>
	<p><b>1 point proche des limites</b></p> <p>Le dernier point tracé se situe dans le 1/6 au bord de la carte de contrôle</p>	<p><b>Confirmer</b></p> <p>en prélevant immédiatement un autre échantillon. Si le point revient dans le tiers central – production Si le point est également proche des limites ou hors limites, régler de la valeur moyenne des deux points</p>	<p><b>Cas limite supérieure</b></p> <p><b>Surveiller la capacité</b></p> <p>Si plusieurs points de la carte sont également proches de la limite supérieure, la capacité se détériore. Il faut trouver l'origine de cette détérioration et intervenir.</p>

En cas de réglage : un nouvel échantillon est mesuré et marqué sur la carte. Pour être acceptable, le point doit se situer dans le tiers central de la carte des moyennes

Tableau. 6 Les règles de pilotages des cartes de contrôles [PILLET M. 2005]

#### 2.4.4 Courbe d'efficacité des cartes de contrôle

Les risques liés à l'utilisation des cartes de contrôle sont de deux sortes :

- conclure qu'il y a un dérèglement alors qu'il n'en est rien,
- poursuivre une fabrication alors qu'un dérèglement s'est produit.

Par définition des limites de contrôle, le premier risque est égal à 0.2%. Il est à assimiler au «risque du fournisseur » dans le contrôle de réception.

Le second risque correspond au cas où une cause assignable est intervenue mais n'a pas suffisamment marqué la statistique calculée sur l'échantillon pour que le premier point inscrit après un dérèglement se trouve en dehors des limites de contrôle. Il y a poursuite d'une fabrication déréglée.

Ces risques peuvent être précisés en utilisant la courbe d'efficacité. Si  $p$  est la probabilité de ne pas détecter un dérèglement  $d$ ,  $p$  décroît lorsque  $d$  croît. Ce dérèglement peut porter sur la moyenne ou la dispersion, ou encore correspondre à une augmentation de la proportion de défectueux. La courbe précise l'efficacité du contrôle : plus la décroissance de la courbe est rapide, plus le contrôle est efficace, comme le montre le modèle suivant :

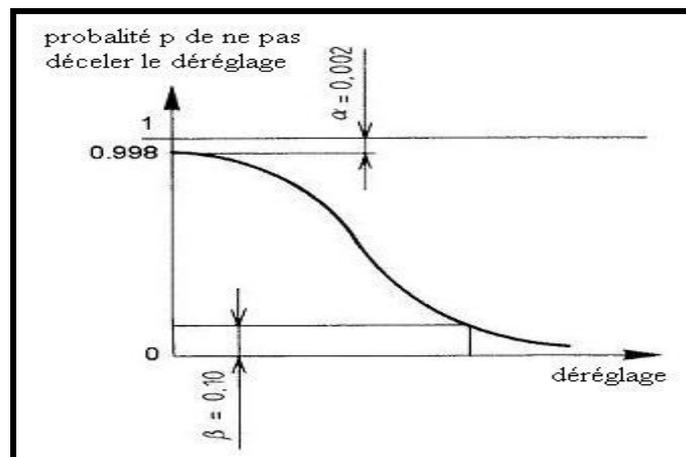


Figure. 30 Courbe d'efficacité [BAVENT P. 2001]

**-Efficacité des cartes de contrôle de la moyenne :**

L'efficacité des cartes de contrôle de la moyenne est définie par le décalage de la moyenne 'm' exprimée en nombre d'écart-type.

**-Efficacité des cartes de contrôle de l'écart-type:**

Le dérèglement est défini par le paramètre  $r$  qui correspond à une augmentation de l'écart-type

$$\rho = \frac{\sigma}{\sigma_0}$$

**-Efficacité des cartes de contrôle aux attributs:**

L'efficacité des cartes de contrôle aux attributs se définit en fonction du nombre de défauts par unités de contrôle ou par la proportion de défectueux.

D'une façon générale, les cartes de contrôle aux mesures permettent une meilleure surveillance du fonctionnement du procédé que les cartes de contrôle aux attributs, qui ne

s'attachent qu'à la qualité du produit a posteriori. On retiendra que seules les cartes de contrôle aux mesures permettent de faire de la prévention, surtout si elles présentent la variation des paramètres influents du procédé.

Quant à l'amélioration du procédé, mesurée par le resserrement de la dispersion et des limites de contrôle, c'est une tâche permanente extrêmement valorisante pour le personnel. Il faut toutefois souligner qu'elle rencontre des limites technologiques inhérentes au procédé lui-même : on ne peut améliorer indéfiniment le procédé. Il arrive un moment où l'amélioration ne peut s'obtenir que par l'investissement dans un procédé nouveau.

### 2.4.5 La capacité du processus

Les indices d'aptitude ou indices de capacité d'un processus de fabrication permettent de s'assurer de la qualité des produits, mais également de leur processus de fabrication.

La capacité est la mesure établissant le rapport entre la performance réelle d'une machine (ou procédés) et la performance demandée. Une capacité s'exprime par un chiffre.

Elle permet de mesurer la capacité d'une machine ou d'un procédé à réaliser des pièces dans l'intervalle de tolérance fixé par le cahier des charges. Le fait d'utiliser un chiffre pour caractériser la capacité est fondamental. [PILLET M. 2005]

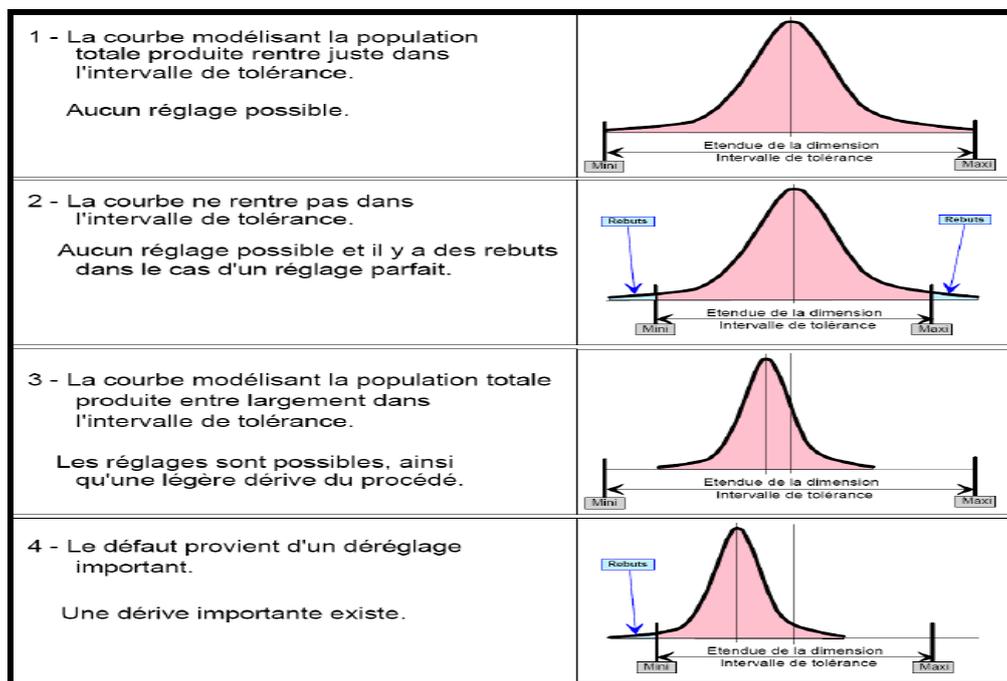


Figure. 31 Les situations de la capacité du processus [PILLET M. 2005]

#### -Cp, Cpk:

Les calculs de ces indices sont faits sur une série de pièces produites dans la continuité, et sans changer de réglage. Cet indicateur tend à ne plus être utilisé car il ne reflète pas la réalité

des pièces produites en série contrôlées par échantillon, il reflète une capacité à un instant donné.  $C_p$ ,  $C_{pk}$  capacité procédé, ces deux indices, calculés à partir des résultats portés sur une carte de contrôle permettent de vérifier la capacité intrinsèque du procédé sans tenir compte des causes assignables éventuelles.

Les indices  $C_p$  et  $C_{pk}$  ne sont représentatifs de la qualité livrée que si le procédé est stable en moyenne et en dispersion (sous contrôle - absence de causes assignables).

- $C_p$

Cet indicateur compare la performance attendue du procédé (l'intervalle de tolérance) et la performance obtenue sur celui-ci (la dispersion).

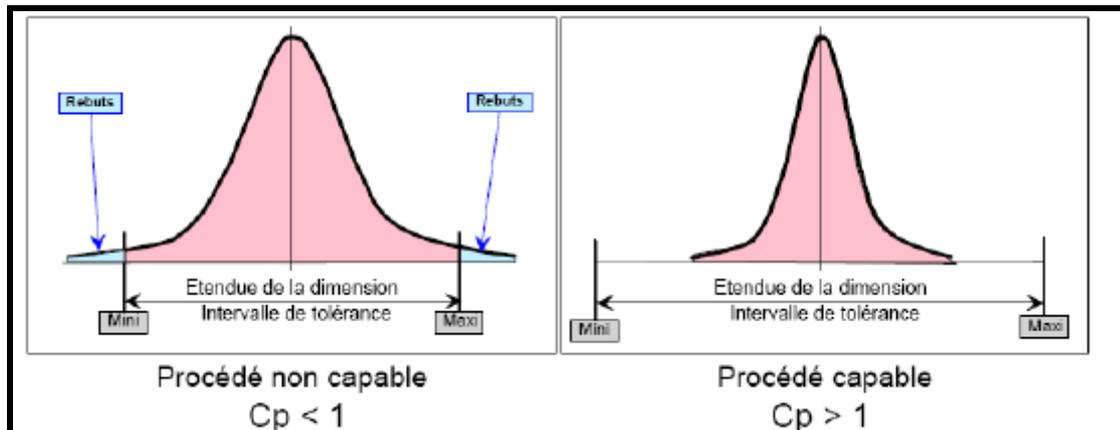


Figure. 32 La figure indices  $C_p$  [PILLET M. 2005]

Dans une première approche, un procédé sera dit capable si l'intervalle de tolérance est plus grand que la dispersion aléatoire du procédé, c'est-à-dire lorsque le  $C_p$  est supérieur à 1. La figure montre deux situations extrêmes, la première correspond à un procédé non capable car la dispersion est plus importante que l'intervalle de tolérance, dans la seconde, la dispersion est faible au regard de l'intervalle de tolérance, le procédé est donc capable. Cependant, une capacité telle que  $C_p = 1$  s'avère être insuffisante, et le minimum de capacité exigé aujourd'hui est de 1,33 voire 1,67 pour certains constructeurs automobiles (PSA, Ford ...) [PILLET M. 2005].

Une capacité de 1,33 correspond à une marge de 1 écart-type de chaque côté de la dispersion.

Précisons que la dispersion aléatoire est définie comme étant égale à six fois l'écart-type de la dispersion du procédé, c'est-à-dire l'intervalle contenant 99,7% des pièces fabriquées. La dispersion utilisée pour le calcul de la capacité  $C_p$  est la dispersion globale du procédé. En effet, la mesure de la capacité du procédé doit traduire la capacité à fabriquer des pièces

sur le long terme. Il faut donc en tenir compte dans le calcul de la dispersion globale de l'ensemble des influences qui peuvent perturber le procédé pendant le temps de production.

Cette dispersion est constituée des dispersions à court terme (dispersions dues à la machine), et des dispersions consécutives aux variations de consignes (dérèglages) incontournables sur le long terme. Le calcul du Cp sera donc réalisé à partir d'un échantillon représentatif de l'ensemble d'une production. Ainsi, le Cp calculé donnera une bonne indication de la qualité de la production livrée au client.

Indicateur de dérèglement Cpk, nous venons de voir qu'une des conditions pour qu'un procédé soit capable est que l'indicateur Cp soit supérieur à 1,33.

Cette condition est-elle suffisante ?

Dans la figure ci dessous, les deux situations ont un Cp supérieur à 1,33, et pourtant, lorsque la production est décentrée, il existe des pièces hors tolérance. L'indicateur Cp est donc insuffisant, et il faut mettre en place un autre indicateur Cpk, qui tiendra compte du dérèglement du procédé.

Ainsi, le Cp donnera la capabilité intrinsèque du procédé, et le Cpk la capabilité réelle.

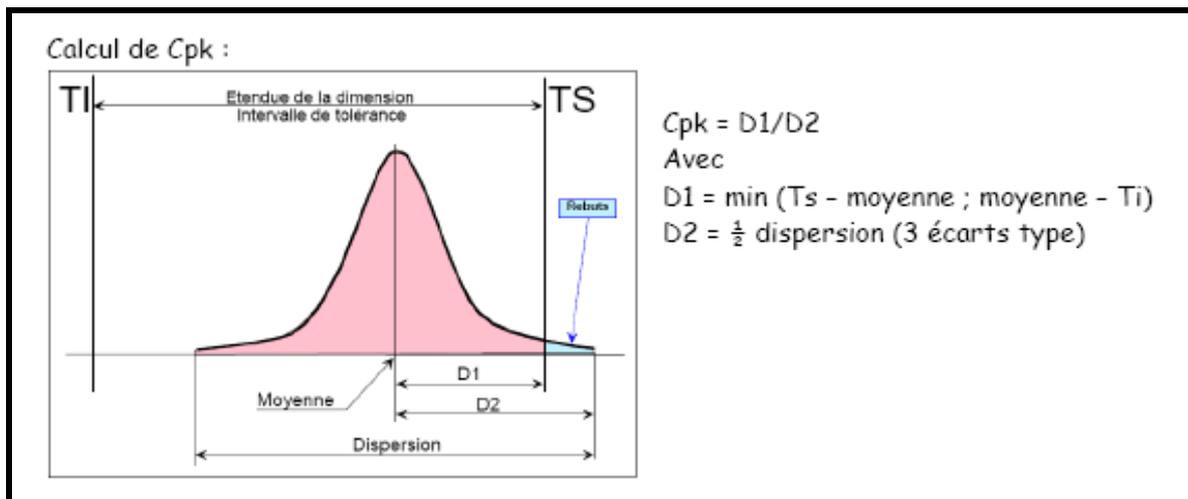


Figure. 33 La figure indices Cpk [PILLET M .2005]

### -cpm capabilité machine

Le Cpm est de capabilité machine critère de TAGUCHI. C'est un indice unique qui prend en compte les concepts de la fonction perte de qualité de Genichi Taguchi. Il tient compte à la fois, du centrage de la dispersion et de l'écart de moyenne par rapport a la cible.

La capabilité machine selon le critère de TAGUCHI est encore peu utilisée, elle est décrite dans le manuel SPC de Ford, GM et Chrysler édition 1995.

Elle prend simultanément en compte les écarts par rapport à la valeur cible et la dispersion par rapport à la moyenne des résultats. Elle exploite la notion de qualité de Taguchi.

C<sub>pm</sub> se calcule à partir de l'écart type déterminé par la formule : [PILLET M. 2005]

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \text{cible})^2}{n - 1}}$$

$$C_{pm} = \frac{T_s - T_i}{3 \hat{\sigma}}$$

#### 2.4.6 Processus « sous contrôle » et « hors contrôle »

Un processus « sous contrôle » est un processus dans lequel seules subsistent les causes communes. La répartition de la production suit alors une courbe en cloche et elle est centrée sur la cible.

Un processus « hors contrôle » est soumis à la présence de causes spéciales. Le résultat de la production ne suit donc pas nécessairement une courbe en cloche et la production peut être décentrée par rapport à la cible [PILLET M. 2005].

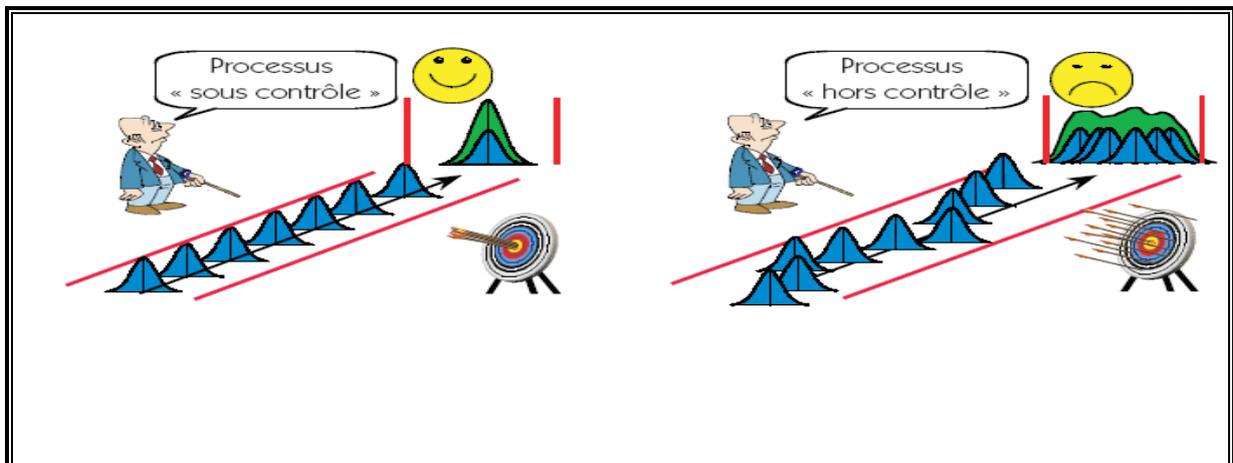


Figure. 34 processus sous contrôle et processus hors contrôle [PILLET M. 2005]

## 3. Les méthodes d'amélioration de la Qualité: Six Sigma

**3.1 Etude et comparaison des méthodes existantes** Aujourd'hui, une multitude de méthodes d'approche des problèmes qualité pour l'industrie est disponible sur le marché et dans la littérature. On compte presque autant de méthodes que d'entreprises ! Chacune se façonne un nom accrocheur et des particularités tant sur le découpage des étapes que sur les outils utilisés. On retrouve cependant deux orientations majeures (qui peuvent être combinées) :

L'analyse statistique des données (ex : Six Sigma, G8D, Shainin) [ **MAST J. 2004**].

Le croisement des faits, de la connaissance et de la créativité (ex : Kepner Tregoe, G8D) [ **KEPNER C. et al 1980**]. Nous avons choisi d'étudier quatre de ces méthodes : Six Sigma, Shainin, G8D et Kepner Tregoe car d'une part elles sont bien représentatives des deux orientations évoquées ci-dessus et d'autre part elles font parties des méthodes les plus répandues dans les industries.

Le désormais célèbre DMAIC [ **PIZDEK T. 2001**] (Define, Measure, Analyse, Improve, Control) de Six Sigma créé par Motorola est 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 [ **PIZDEK T. 2001**]. Shainin propose un système dont le découpage est similaire au DMAIC. L'originalité de cette méthode réside en l'articulation d'outils simples et conviviaux développés ou repris par Dorian Shainin pour « faire parler les pièces ». La recherche de causes ne commence pas par un brainstorming comme la plupart des autres méthodes mais par l'utilisation d'outils de génération d'indices. [ **SHAININ R. 1993a**]: La méthode Global 8D, également très répandue, est séquencée en huit phases. La liste des outils à utiliser n'est volontairement pas définie comme exhaustive et d'autres outils peuvent être ajoutés au besoin. Cette méthode est centrée sur la description du problème dans toutes ses dimensions (temporelle, géographique ...) [ **BAUER-KURZ I. 2000**].

Contrairement aux approches précédemment décrites, l'approche de Kepner et Tregoe correspondante est constituée de deux méthodes distinctes : l'analyse de problème et l'analyse de décision. La première part de la définition du problème jusqu'à la validation de la cause réelle, la seconde consiste à choisir la solution à implémenter. Cette approche est la moins

statistique des quatre, elle illustre parfaitement la deuxième des orientations évoquées ci-dessus. [KEPNER C. et al 1980] Le tableau ci-dessous présente les différentes méthodes citées [AVRILLON L. et al 2002], [BAUER-KURZ I. 2000], [DE MAST J. 2004], [HARRY N. et al 2000], [KEPNER C. et al 1980], [PILLET M. 2004], [PIZDEK T. 2001], [SHAININ R. 1993a], [SHAININ P. 1993b] La première colonne reprend les différentes phases, toutes méthodes confondues. Les étapes en italique correspondent à des suppléments ajoutés par certains auteurs par rapport à la présentation initiale des méthodes.

	Six Sigma	Shainin	GSD	Kepner Tregoe
<b>Choisir le problème</b>	<b>Reconnaître</b> [Harry et al, 2000] Identifier les problèmes liés aux systèmes clés de l'entreprise.	<b>Top 5</b> Le management doit sélectionner les cinq problèmes les plus importants pour chaque unité. Cette liste est publiée et connue de tous.		<b>Evaluation de situation</b> Prioriser les problèmes à traiter et mettre des actions en face de chacun.
<b>Définir le problème, préparer le travail</b>	<b>Définir</b> 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	<b>Définir le problème</b> 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	<b>Préparer le process GSD</b> Définir de façon quantitative le problème et ses conséquences pour les clients, déterminer une action immédiate pour contenir les conséquences du problème. <b>Etablir une équipe</b> Définir les rôles de chacun <b>Décrire le problème</b> <u>Outil</u> : Liste de questions type QQQQCP	<b>Analyse de Problème</b> Définir le problème « objet + défaut », identifier la divergence de la situation actuelle « est » par rapport à un résultat idéal « devrait être ».
(suite)	Six Sigma	Shainin	GSD	Kepner Tregoe
<b>Contenir</b>			<b>Développer une action temporaire pour contenir le problème</b> Définir, vérifier et implémenter une action temporaire préventive pour isoler les effets du problème.	
<b>Mesurer</b>	<b>Mesurer</b> Vérifier la capacité du moyen de mesure, évaluer le taux de défauts actuel et fixer celui à atteindre. <u>Outils</u> : Gage R&R	<b>Etablir un système de mesure adapté</b> Vérifier le système de mesure (justesse, répétabilité ...). <u>Outils</u> : Visual Scoring Transform, Resistance Limit Transform, Isoplot		
<b>Analyser</b>	<b>Analyser</b> 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).	<b>Générer des indices</b> Trier les causes potentielles par collecte de données bien planifiée. Interprétation des indices par les experts. <u>Outils</u> : Multi-vari, Diagramme de concentration de défauts, Faux-Jumeaux, Permutation non aléatoire de composants ... <b>Isoler le Red X</b> Lorsque l'on a atteint un nombre gérable de causes potentielles. <u>Outils</u> : Permutation non aléatoire de variables, Plan complet, Anciens contre	<b>Définir et vérifier les causes racines</b> 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 (conception robuste, benchmarking...).	<b>Décrire le problème</b> Décrire de manière factuelle et précise le « est » et le « n'est pas » du problème en terme d'objet, de localisation géographique et dans le temps. <u>Outil</u> : Analyse de problème : Est / N'est pas <b>Trouver la cause réelle</b> Lister les particularités et les changements pour déduire les causes possibles. La cause la plus probable d'une divergence est celle qui rend compte exactement de tous les éléments de l'énoncé

		Modernes		du problème.
<b>Corriger</b>	<b>Améliorer</b> Quantifier l'influence des variables clés du process sur les CTQ, identifier la cible et les limites acceptables (spécifications) pour ces variables, modifier le process en conséquence. Outils : Plans d'expériences (surface de réponse)	<b>Etablir une cible et des tolérances</b> Fixer une cible et des tolérances avec preuve statistique pour tous les X rouges. Outils : Spécigraphe, outils de méthodologie de surface de réponse	<b>Choisir et vérifier les actions correctives</b> Générer les solutions possibles et choisir la meilleure. <b>Implémenter et valider les actions correctives</b> Implémenter la solution retenue, stopper l'action temporaire pour contenir le problème.	<b>Analyse de Décision</b> Fixer et classer les objectifs de la décision. Lister les diverses options possibles. Confronter les options avec les objectifs fixés pour choisir l'option la meilleure.
<b>Contrôler</b>	<b>Contrôler</b> Assurer que les variables clés du process restent sous contrôle pour maintenir les gains sur le long terme. Outils : Cartes MSP	<b>Implémenter la maîtrise statistique des procédés</b> Veiller au maintien du X rouge sur sa cible. Outils : Certification de Process, Certification des opérateurs, Positrol, Precontrol.	<b>Implémenter et valider les actions correctives</b> Surveiller les résultats sur le long terme.	
<b>Pérenniser</b>	<b>Standardiser</b> [Harry and al, 2000] [Piller, 2004] Standardiser les bonnes pratiques (méthodes et processus).  <b>Intégrer</b> [Harry et al, 2000] Intégrer ces méthodes et processus dans le cycle de conception.		<b>Prévenir la récurrence</b> Modifier les politiques, pratiques et procédures concernées. Faire des recommandations d'amélioration systématique pour les cas de problèmes similaires.	<b>Analyse des problèmes potentiels</b> Etudier ses conséquences néfastes éventuelles et adopter les mesures nécessaires pour les empêcher de devenir des problèmes réels.
<b>Clôturer</b>		<b>Clôturer le projet</b> Récapituler la logique utilisée pour résoudre le problème. Outils : Arbre de la solution	<b>Remercier l'équipe</b> Reconnaître les contributions individuelles et collectives.	

**Tableau. 7 Rapprochement des méthodes de résolutions des problèmes Six Sigma [AVRILLON L. et al 2002]**

L'analyse de ce tableau nous montre que chacune des méthodes présente des étapes et des outils supplémentaires par rapport aux autres. Le DMAIC de Six Sigma propose par exemple de nombreux outils pour analyser des données conséquentes ou pour planifier au mieux des essais. L'approche de Kepner Tregoe permet quant à elle d'orienter la collecte de données. L'utilisation de telle ou telle méthode va donc dépendre du type de problème ou du type du contexte du problème à résoudre. Il n'y a pas de méthode idéale, universelle.

### 3.2 Définition de la méthode Six Sigma

- **Qu'est-ce que Six Sigma?**

Six Sigma est le système de management qui se développe le plus vite aujourd'hui dans l'industrie. Centré sur une puissante méthodologie de résolution de problème et d'optimisation des processus, Six Sigma a permis d'économiser des millions de dinars dans les sociétés qui ont appliqué la démarche ces dix dernières années [AZZABI L. et al 2007].

La puissance de Six Sigma vient de l'application d'outils statistiques dans le contexte d'une méthodologie structurée et facile à mettre en oeuvre. Ces outils, utilisés le plus souvent dans

un environnement opérationnel de production, s'appliquent également à tous les processus, y compris administratifs.

Cette démarche se décline de plusieurs façons, C'est:

- une certaine philosophie de la qualité orientée vers la satisfaction totale du client.
- un indicateur de performance permettant de savoir où se situe l'entreprise en matière de qualité.
- une méthode de résolution de problèmes par l'implication totale des hommes permettant de réduire la variabilité sur les produits et services.
- une organisation des compétences et des responsabilités des hommes de l'entreprise.
- un mode de management par la qualité qui s'appuie fortement sur une gestion par projet.
- en d'autres termes « Six Sigma » va au delà de la simple démarche de résolution de problème et devient une véritable stratégie pour l'entreprise [AZZABI L. et al 2007].

### **La définition d'une approche Six Sigma**

L'approche « *Six Sigma* » est une approche globale de l'amélioration de la qualité des produits et des services rendus aux clients. Partant de cette meilleure satisfaction des clients, « Six Sigma » apporte un accroissement de la rentabilité à l'entreprise avec les effets cumulé suivants: [AZZABI L. et al 2008 a]

- une amélioration de la disponibilité des machines et des installations et par conséquent une optimisation dans leur utilisation,
- une réduction des dépenses suite à une diminution des rebuts, retouches, des gaspillages et dysfonctionnements et plus généralement des coûts de non qualité,
- de meilleures parts de marché à la suite à la réduction des coûts de l'amélioration de la qualité des produits et des services,
- une augmentation de la satisfaction des clients et une plus grande fidélisation par l'amélioration de la qualité.

### ***3.3 Historique de la méthode Six Sigma***

Six Sigma est non seulement une méthode, mais aussi un système de management centré sur une puissante méthodologie de résolution de problème et d'optimisation des processus. Développée par Mikel Harry chez Motorola au milieu des années 80 [ROGER G. et al 2008], la méthodologie n'est devenue bien connue qu'après que Jack Welch, le président de General Electric, l'ait placée au coeur de sa stratégie d'entreprise en 1995. Depuis, de nombreuses entreprises ont fait connaître leur attachement à la démarche Six Sigma" : IBM,

Texas Instrument, ABB, Ford Motor Company, Sony, DuPont, Nokia, etc [PANDE P. et al 2000] [SANDERS D. et al 2000]. La puissance de Six Sigma vient essentiellement de l'application d'outils statistiques dans le contexte d'une méthodologie structurée et relativement facile à mettre en oeuvre. Ces outils, utilisés le plus souvent dans un environnement opérationnel de production, s'appliquent également à tous les processus, y compris administratifs.

### ***3.4 Pourquoi le Six Sigma?***

Tous les procédés, quels que soit leur degré de précision, sont incapables de produire toujours exactement le même produit. Il y aura toujours une petite variation entre les produits réputés identiques, et ce sont ces variabilités qui conduisent à la non qualité. Quelle que soit la machine étudiée et la caractéristique observée, on note toujours une dispersion dans la répartition de la caractéristique [AZZABI L. et al 2008 a].

L'origine du 6 Sigma est, en statistiques, la lettre grecque sigma  $\sigma$  désignant l'écart type ; « six sigma » signifie donc « six fois l'écart type ».

Un processus industriel ou un service comprend un certain nombre de tâches répétitives, l'exemple le plus caricatural étant la production d'une pièce en grande série. Une pièce ou un service est conforme si elle respecte un certain nombre de critères, mais les pièces ou prestations ne sauraient être strictement identiques. Une des préoccupations majeures de la gestion de la qualité est donc de maîtriser les conditions de production ou de prestation afin qu'il y ait le moins de rebut, le moins d'insatisfaction possible.

Prenons le cas d'une pièce mécanique dont la longueur nominale est  $L$ . La pièce est utilisable si la longueur est comprise entre  $L-\Delta L$  et  $L+\Delta L$  ( $\Delta L$  est la tolérance). Le processus de production, lui, produit des pièces dont la longueur varie, la longueur moyenne est  $L$ , et avec un écart type  $\sigma$  (on suppose que cette longueur suit une loi normale). En général, le processus est réglé afin que l'on ait  $\sigma = \Delta L/3$  ; on écrit en général plutôt  $\Delta L = 3 \cdot \sigma$ , mais c'est bien  $\Delta L$  qui est une contrainte (la pièce est utilisable ou pas), et  $\sigma$  qui est ajusté (les machines sont plus ou moins bien réglées). Ceci conduit à un taux de rebut de 0,3 %, soit 3 000 pièces au rebut pour une production de un million de pièces. Si l'on améliore le processus et que l'on diminue  $\sigma$  jusqu'à avoir  $\Delta L = 6 \cdot \sigma$ , on aura un taux de rebut de  $2 \cdot 10^{-9}$  (0,000 000 2 %), soit deux pièces au rebut par milliard produit [QUALITE ONLINE 2007].

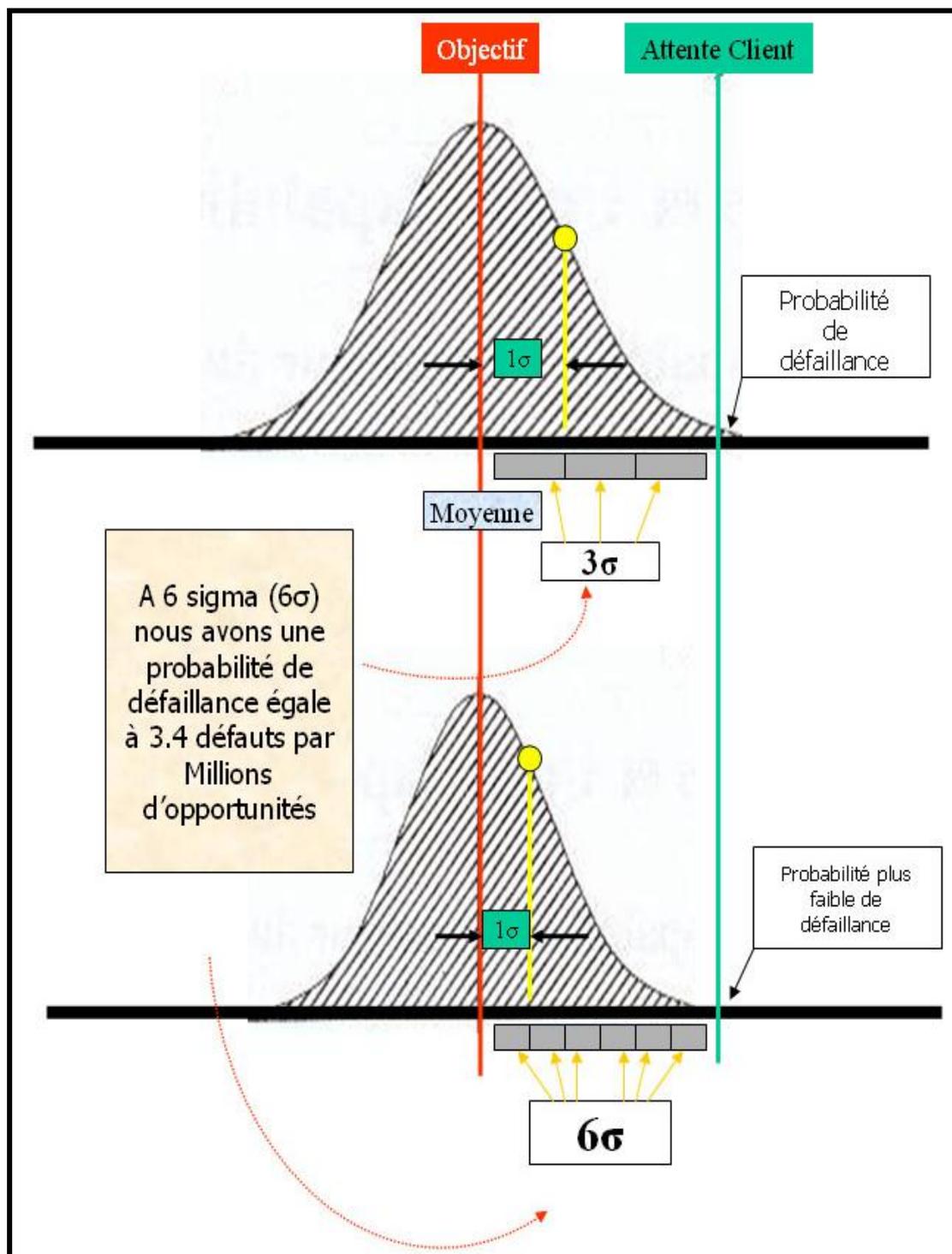


Figure. 35 La méthode Six Sigma

Six Sigma pourrait être classé parmi les méthodes de pilotage de type top-down [ECKES G. 2001], puisque c'est la hiérarchie qui initie et entretient la démarche. Mais, sa mise en œuvre particulière fait que cette approche est en fait exploitée et pilotée par les services qualité, habitués à évaluer les processus et leurs performances.

Au delà des principes de base que la démarche met en avant (la nécessité de recourir à la mesure pour comprendre les phénomènes, celle de disposer de données pertinentes et quantifiées, celle de devoir sortir de la pensée conventionnelle en changeant de questions pour changer de réponses), la méthode Six Sigma est fondée sur deux grands principes : **[SAHOOA A. et al 2008]**

- optimiser les résultats et la performance par le management des processus ;
- la nouveauté, c'est que la méthode s'applique à tous les processus de l'entreprise (faciliter la prise de commande des clients, réduire le délai de livraison, ...), et cela à la simple condition que le résultat du processus considéré puisse être associé à des données mesurables sur lesquelles des analyses statistiques pourront être menées ;
- réduire la variabilité des processus de manière à faire diminuer les non-conformités et les effets qu'ils induisent.

Pour Six Sigma, tous les processus ont de la variabilité et cette variabilité a un nombre réduit de causes premières (20% des causes, 80% des effets). Identifier ces causes, c'est se donner la possibilité de les contrôler, et donc d'améliorer rapidement, de façon continue et importante, les processus en éliminant leur variabilité. L'objectif est d'amener à six fois l'écart-type (ou sigma) de la courbe de production du processus entre la limite basse et la limite haute de la spécification client. Au final, c'est une apparition réduite à 3,4 défauts par millions d'opportunités qui est visée. Pour y parvenir, la démarche préconise de réaliser les étapes situées en amont de la maîtrise statistique des procédés (les cartes de contrôles qui servent à piloter le processus), avec en particulier, une définition précise des paramètres clés du processus et l'identification des activités à améliorer. Le Six Sigma apporte ainsi une valeur ajoutée dans l'analyse, en passant de la démarche classique de résolution pratique, sans caractérisation chiffrée du problème, à la recherche d'une solution déduite de l'analyse statistique d'un échantillon **[AZZABI L. et al 2008 b]**.

- l'objectif de Six Sigma est d'identifier des processus mal ciblés ou peu capables, les centrer et réduire leur dispersion ; alors le but de Six Sigma est d'améliorer rapidement, de façon continue et importante les processus en éliminant ces variabilités. Cette méthodologie est utilisée pour améliorer les processus, les produits et les services, pour réduire les coûts de toutes sortes et améliorer la qualité ; l'objectif est simple : satisfaire le client en ayant des processus sans défaut avec des outils avancés de progrès et réduire la variabilité ; de plus, le Six Sigma est un changement de culture positive et profonde avec des résultats financiers réels.

- « Six Sigma » qui fait quoi :

- **Le champion ou sponsor de l'équipe :**

-Le champion a de multiples responsabilités :

- participer à la sélection de l'équipe ;

- définir son orientation stratégique (définir les projets, l'objectif à atteindre, raison de création de l'équipe,...) ;

- fixer des objectifs aux *Black Belts* ;

- décrire à quoi peut mener le projet s'il réussit ;

- faciliter le déploiement de la philosophie Six Sigma.

- Le responsable de l'équipe (*Black Belt* ou *Green Belt*) :**

Le *Black Belt* est un responsable de la gestion tactique du travail de l'équipe. Il prend comme tâche l'organisation et la direction des réunions, il doit affirmer que chacun de l'équipe respecte le calendrier des tâches établi et guider l'équipe dans l'application de la méthode.

- **Le conseil de l'équipe (*Master Black Belt*)**

Le *Master Black Belt* ou animateur Six Sigma a pour rôle de piloter le groupe de travail, ce rôle peut prendre l'aspect éducatif à travers les formations rapides qu'il peut les faire, si nécessaire, en utilisant les outils Six Sigma afin d'aider l'équipe à résoudre des problèmes techniques.

### ***3.5 Les étapes de la méthode Six Sigma***

La mise en oeuvre de cette méthode s'effectue au cours de projets très encadrés et judicieusement choisis. Tous ces projets sont menés à partir de la réalisation de cinq étapes DM-A-I-C: [ROGER G. et al 2008] s'obtenir que par l'investissement dans un procédé nouveau.

#### ***3.5.1 Définir***

Cette première étape vise à dégager tous les problèmes et à les classer par ordre de priorité. Le problème est ensuite défini dans le temps et dans l'espace, généralement à l'aide d'un QQQQCP en vue de le formuler en termes de faiblesses et d'insatisfactions clients. Une charte d'équipe (*Project Charter*) est ensuite rédigée pour détailler l'ensemble des composantes du projet : département, description du projet, contexte, objectifs, résultats financiers, membres de l'équipe, bénéfices pour le client, planning, matériel requis... [AZZABI L. et al 2008 c]

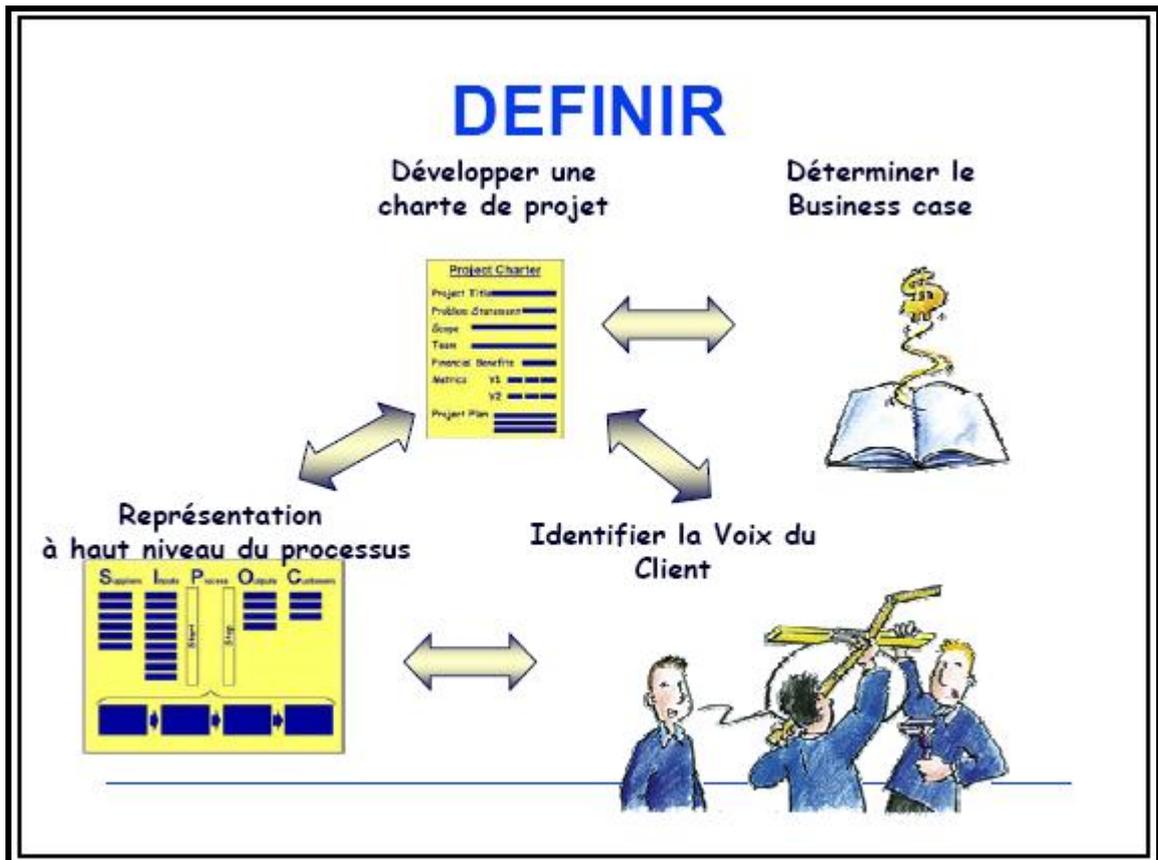


Figure. 36 Étape définir

### 3.5.2 Mesurer

Il s'agit ensuite de rechercher les données pertinentes caractérisant le processus concerné et de mesurer les résultats existants. L'étape donne lieu à une description de la situation actuelle où sont listées les variables qui participent au processus et où sont décrits précisément les problèmes rencontrés [AZZABI L. et al 2008 c].

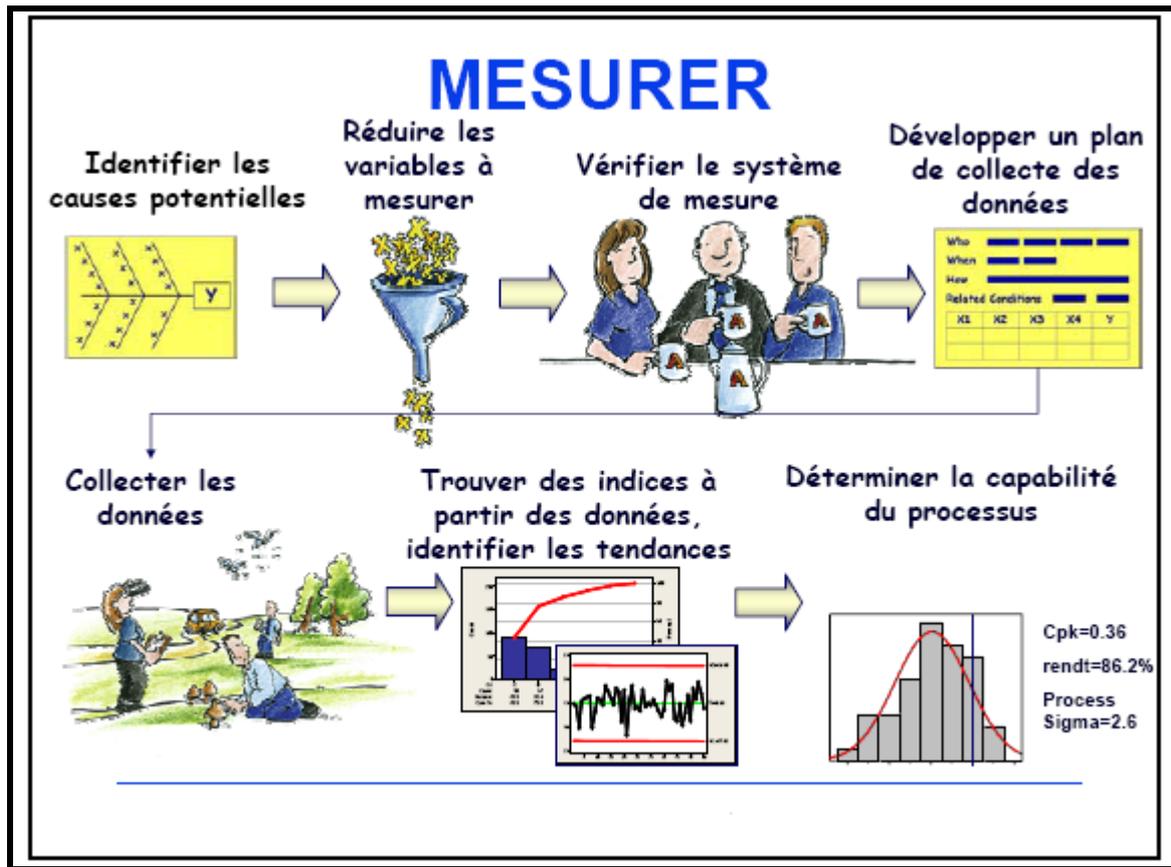


Figure. 37 Étape Mesurer

### 3.5.3 Analyser

Les informations cachées sont mises en évidence par une analyse statistique des données. Cette étape inclut la détermination ainsi que la formalisation des causes premières des problèmes rencontrés. Les dysfonctionnements sont ensuite confirmés par des tests réalisés sur le processus [AZZABI L. et al 2008 c].

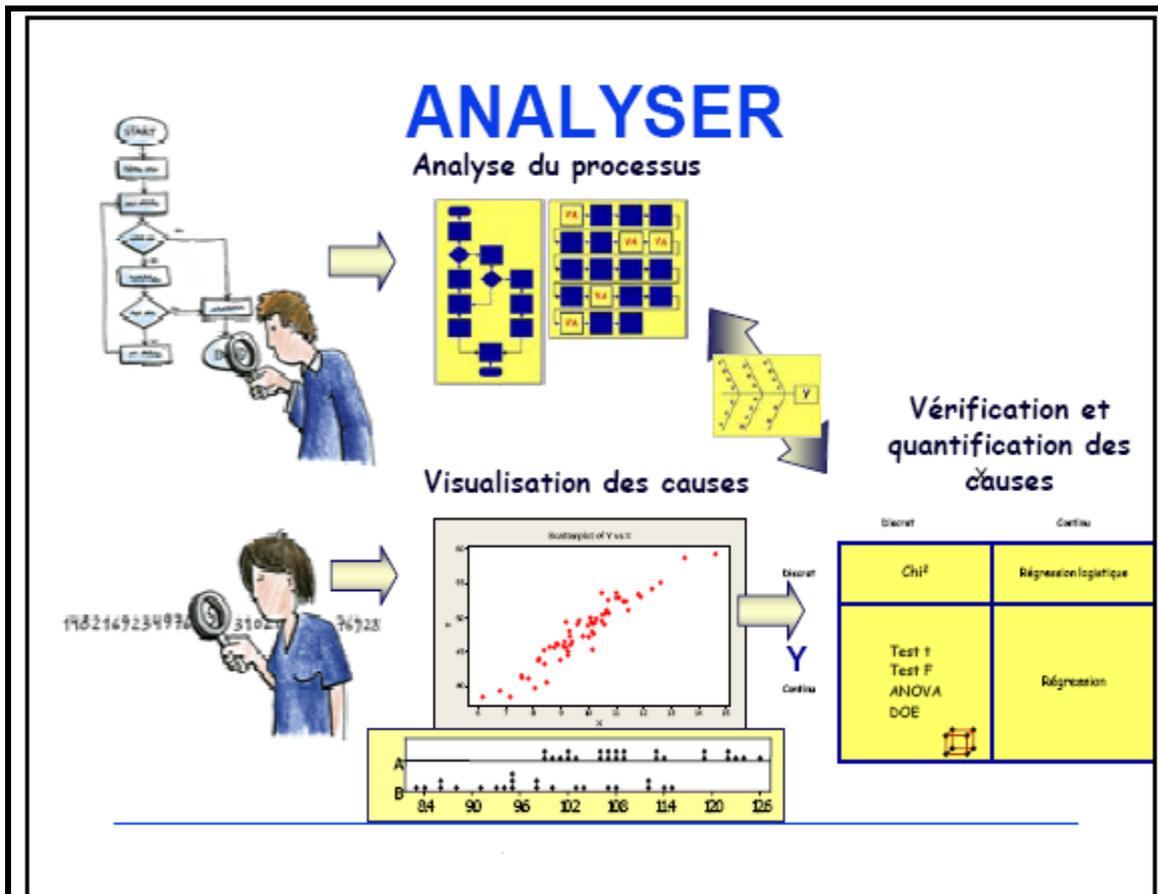


Figure. 38 Étape Analyser

### 3.5.4 Améliorer

Les solutions sont recherchées, mises en oeuvre puis validées. Un contrôle est effectué pour vérifier que les solutions implémentées agissent effectivement sur les causes identifiées [AZZABI L. et al 2008 c].

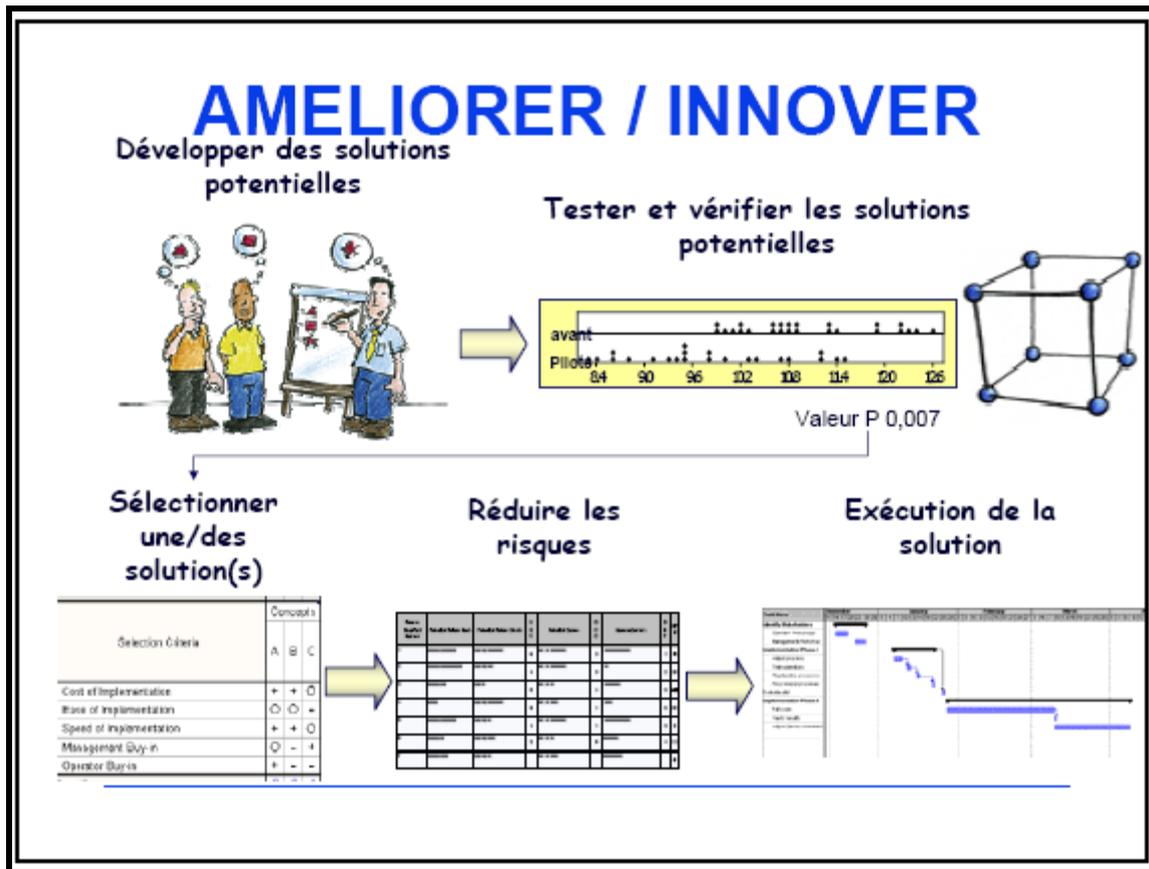


Figure. 39 Étape Améliorer

### 3.5.5 Contrôler

L'écart entre les données initiales et les résultats obtenus est analysé de manière à dresser un premier bilan des améliorations obtenues. Ce bilan permet également, au besoin, d'ajuster la solution en fonction des effets non prévus [AZZABI L. et al 2008 c].

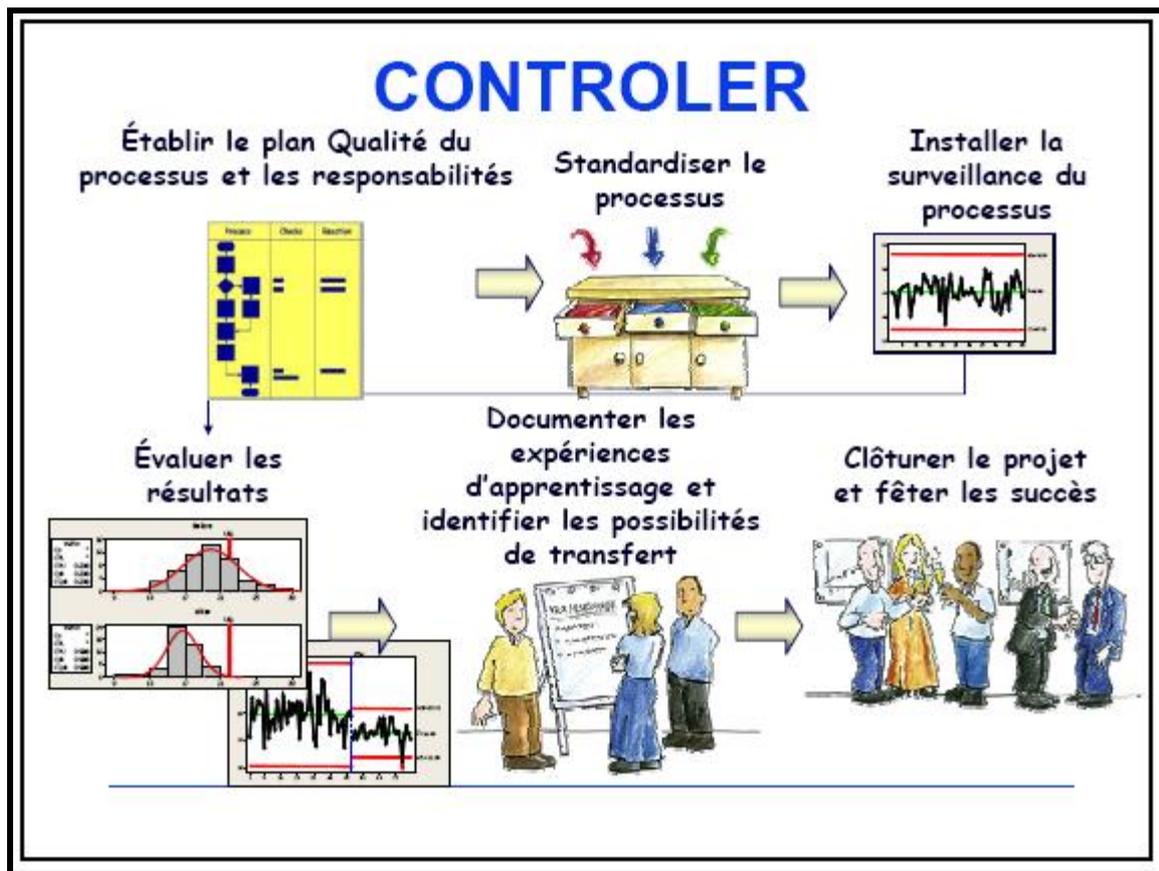


Figure. 40 Étape contrôler

Les nouvelles règles de travail sont ensuite formalisées et un audit régulier est planifié de manière à pérenniser les améliorations acquises.

L'application de la démarche requiert de nombreux outils s'appuyant sur des techniques statistiques (*MSP, PDCA, AMDEC, Résolution de problèmes, Plans d'expériences, ...*). De nombreux outils informatiques (*SEWSS, StatGraphics, WinSPC, Statistica, Minitab, ...*) et/ou outils d'analyse de processus peuvent donc être utilisés pour mener un projet Six Sigma.

L'application d'un projet Six Sigma s'appuie sur une organisation composée :

- De *Black Belts* : experts en outils qualité et/ou statistiques, ils sont chargés de piloter les projets d'amélioration à fort potentiel. Souvent ingénieurs ou responsables qualité, ils peuvent venir de tous les processus de l'entreprise
- De *Green Belts* : spécialistes de leur processus, ils interviennent sur des projets d'amélioration plus petits ou sur les sous-projets des Blacks Belts. Ils appliquent leur connaissance du Six Sigma en local à leurs processus.

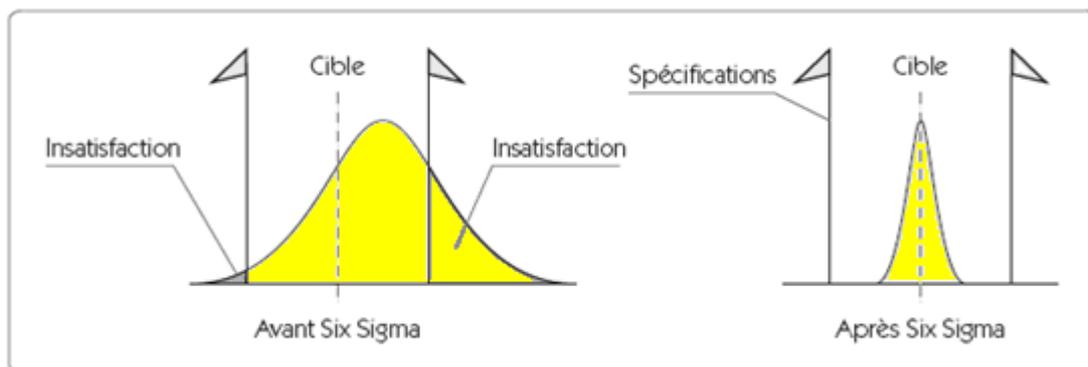
- De *Master Black Belts* : experts de la méthode Six Sigma, ils dirigent les *Black Belts* et assurent leur formation à Six Sigma. Ils ont généralement en charge la sélection des projets Six Sigma.
- De *Champions* ou *Sponsors* : ils ont en charge l'affectation des ressources aux projets Six Sigma et assurent la communication en interne et en externe sur l'avancement et les résultats des projets en cours.

## 4. Six Sigma un outil d'amélioration

Un des principes de base de Six Sigma est la réduction de la variabilité. En effet, l'insatisfaction d'un client résulte toujours d'un écart entre une situation attendue et une situation réelle. Cet écart provient en grande partie de la variabilité des processus, qui trouve son origine, notamment, dans :

- les variabilités sur les matériaux ;
- les variabilités dans les procédures ;
- les variabilités sur les conditions dans lesquelles évolue le processus... [PILLET. M 2004]

L'objectif de Six Sigma n'est autre que de concentrer les caractéristiques du produit vendu autour de la cible attendue par le client.



**Figure. 41 Six Sigma et la réduction de la variabilité [PILLET M. 2004]**

Cette approche globale se décline de plusieurs façons. Six Sigma, c'est :

- une certaine philosophie de la qualité tournée vers la satisfaction totale du client ;
- un indicateur de performance permettant de savoir où se situe l'entreprise en matière de qualité ;
- une méthode de résolution de problèmes en quatre à huit étapes selon les auteurs dont l'objectif est de : Définir, Mesurer, Analyser, Innover/Améliorer, Contrôler, Standardiser et Intégrer, approche qui permet de réduire la variabilité et d'atteindre la cible sur les produits ou dans les services ; [PILLET M. 2004]

- une organisation des compétences et des responsabilités des hommes de l'entreprise ;
- un mode de management par la qualité qui s'appuie fortement sur une gestion par projet.

Pour comprendre Six Sigma, on doit bien cerner ces différents aspects. En effet, l'application de Six Sigma peut prendre différentes dimensions, de la simple démarche de résolution de problèmes à une véritable stratégie pour l'entreprise. La différence entre ces deux applications extrêmes réside dans la démultiplication de la démarche et la structure qui est mise en place pour organiser et piloter les chantiers [AZZABI L. et al 2008 c].

Le premier point que l'on doit avoir à l'esprit dans une démarche Six Sigma est la satisfaction du client. Un projet Six Sigma doit apporter une amélioration significative au client. Pour cela, on doit s'intéresser à ce que souhaite réellement le client, non pas à ce qu'on pense qu'il souhaite. Il faut être capable de déterminer les caractéristiques critiques pour la qualité (*CTQ*, pour *Critical To Quality*) afin de fixer une cible et une plage de tolérance [PILLET M. 2004].

L'impact de Six Sigma dépasse la simple amélioration de la qualité des produits de l'entreprise, son objectif est financier. Six Sigma a pour objectif d'améliorer la performance globale de l'entreprise, par le biais de quatre actions spécifiques :

- L'augmentation de la satisfaction des clients et une plus grande fidélisation par une meilleure qualité ;
- La réduction des dépenses en abaissant fortement le nombre de rebuts, retouches et gaspillages ;
- L'optimisation de l'utilisation des actifs de l'entreprise en augmentant le taux de rendement synthétique (TRS) des moyens de production ;
- L'augmentation du chiffre d'affaires consécutif à la réduction des coûts et à l'amélioration de la qualité.

#### ***4.1 Six Sigma dans un contexte ISO 9000***

Six Sigma s'inscrit parfaitement dans cette dynamique de progrès en matière de qualité, et la façon dont on conçoit aujourd'hui Six Sigma traduit l'héritage de tous les progrès antérieurs.

Dans les différentes évolutions de l'ISO 87, 94, 2000, la façon d'aborder la qualité a profondément évolué et la dernière version offre un point de vue extrêmement favorable au développement de Six Sigma. En effet, alors que les versions 87 et 94 étaient tournées vers les principaux dysfonctionnements d'une entreprise, la version 2000 est résolument tournée vers la satisfaction du client au travers d'une organisation en processus [PILLET M. 2004].

Six Sigma donne le moyen de créer cette dynamique. Il peut représenter le moteur de l'ISO : à savoir, améliorer les processus en partant du besoin du client. Pour ce faire, Six Sigma va s'appuyer sur la décomposition en processus de l'ISO 9000, mais en allant beaucoup plus loin dans la description. On cherchera à mettre en évidence les caractéristiques essentielles dans ce domaine, tant au niveau de la sortie (les *CTQ* – pour *Critical To Quality*) que des entrées (les *X* essentiels).

Six Sigma est une méthode capable de résoudre des problèmes ponctuels afin d'améliorer la satisfaction des clients. Son fondement même est la réduction de la variabilité dans les processus. De ce point de vue, en forçant les entreprises à décrire leur fonctionnement, les démarches qualité fondées sur des référentiels ont le même objectif : réduire la variabilité... dans la méthode. En effet, lorsqu'aucun processus n'est pas décrit, il y a fort à parier que la façon de le conduire subira des variations dans le temps nuisibles à la satisfaction du client [PILLET M. 2004].

## ***4.2 Six Sigma dans un environnement Lean Management***

Le *Lean Management* a pour objectif d'améliorer la performance industrielle tout en dépensant moins. Pour atteindre ce niveau dans une entreprise, on doit s'appuyer sur un certain nombre de points clés :

- la suppression de tous les gaspillages ;
- une production en flux tendus ;
- une gestion de la qualité favorisant l'amélioration continue et l'amélioration par percée ;
- la réduction des cycles de développement des produits ;
- une attitude prospective vis-à-vis de ses clients.

Sur un poste de production, les sept principales sources de gaspillage sont identifiées : on les appelle les 7 Muda (gaspillage en japonais) [PILLET M. 2004].

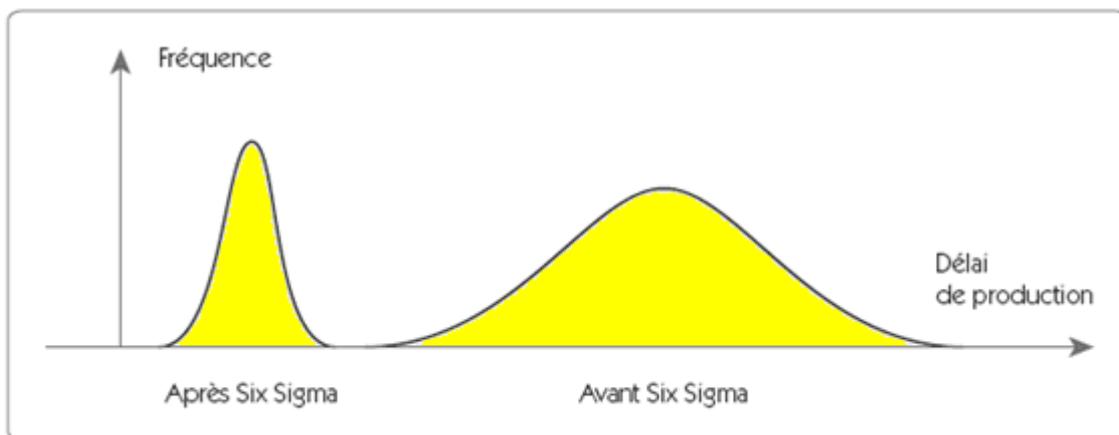
1. Surproduction : on continue à produire alors que l'ordre de fabrication est soldé.
2. Attentes : l'opérateur passe un pourcentage de temps important à attendre la fin des cycles de la machine. Les temps de cycles ne sont pas équilibrés, les processus ne sont pas en ligne.
3. Déplacements inutiles : par exemple lorsqu'une surproduction a été réalisée, on doit emmener le surplus dans le stock puis le ressortir, d'où deux déplacements sans apport de valeur ajoutée.
4. Opérations inutiles : tendance de tous les opérateurs à atteindre des niveaux de spécification qui vont au-delà des attentes des clients. Cela est particulièrement vrai pour des défauts visuels. Il en résulte une augmentation des temps de production, du nombre de retouches, de

rebuts, et donc des coûts. D'où l'intérêt de définir le niveau attendu pour chaque spécification et de se donner les moyens de mesurer correctement ces spécifications.

5. Stocks excessifs : outre les aspects coûts, les stocks excessifs conduisent à des gaspillages de temps pour retrouver la référence.

6. Gestes inutiles : par une mauvaise conception des postes de travail, on diminue considérablement l'efficacité de ces derniers en imposant des déplacements, des gestes, des transports inutiles.

7. Défauts : le processus génère de la non-valeur ajoutée, il faut attendre pour avoir de nouvelles matières premières, les défauts peuvent ne pas être vus alors que l'on passe à l'opération suivante [PILLET M. 2004].



**Figure. 42 Réduction des cycles de production avec Lean Six Sigma [PILLET M. 2004]**

La réduction de tous ces gaspillages doit se traduire par une réduction considérable des cycles de production. Certaines entreprises ont adopté *Lean Six Sigma* en tant que démarche globale. Cela consiste à adopter le *Lean Management* en le combinant avec la logique et la dynamique de progrès fournies par Six Sigma. L'approche Six Sigma apporte sa méthodologie rigoureuse dans l'approche de l'amélioration des délais de production et de réduction des gaspillages. Elle apporte également la structure managériale qui fait toute sa force. En effet, comme nous avons pu le souligner dans les premières lignes de ce chapitre, Six Sigma n'est pas qu'une méthode : c'est aussi une façon d'organiser l'entreprise afin que l'on puisse être en mesure de réaliser des « percées » [PILLET M. 2004].

### ***4.3 Intégrer Six Sigma dans une démarche de performance industrielle***

On vient de voir que Six Sigma s'intègre parfaitement dans un environnement qualité, dans un environnement *Lean Production* et même dans un environnement *Supply Chain*. C'est donc véritablement un outil de la performance industrielle !

En outre, la méthode Six Sigma est centrée sur la mesure de la performance, et comprend une panoplie entière de tests statistiques, des cartes de contrôles...

Aujourd'hui, pour continuer à jouer son rôle, l'entreprise doit être sans cesse en mouvement, s'adapter aux conditions changeantes, améliorer son niveau de qualité. Elle doit s'attaquer aux problèmes majeurs, éteindre des incendies, préparer les produits de demain mais avec des ressources limitées [PILLET M. 2004].

Pour tenir ce pari, il faut donc être « *Lean* » dans l'organisation. Il faut améliorer la productivité dans la conduite d'actions de progrès. Comment résoudre rapidement tous ces problèmes qui se posent ? Comment gérer l'ensemble des projets qui sont conduits dans l'entreprise ? Comment coordonner tous ces projets afin qu'ils restent cohérents avec la stratégie de l'entreprise ? [PILLET M. 2004] Répondre à toutes ces questions, c'est précisément l'objectif de la mise en place d'un programme Six Sigma. Mais pour réussir, il est important que les entreprises comprennent à quel point les valeurs et la philosophie de Six Sigma peuvent différer des croyances, valeurs et priorités sur lesquelles on met l'accent avant le déploiement de Six Sigma. Pour implémenter Six Sigma, il faut être ouvert, prêt au changement, avide d'apprendre. [AZZABI. L et al 2007 a] On ne change pas la culture par des incantations : les valeurs reposent sur des croyances et pour changer les valeurs il faut changer les croyances. Le cycle de changement commence par la mesure. [HARRY M. et al 2000] nous dit : « *De nouvelles mesures apportent de nouvelles données, de nouvelles données apportent de nouvelles connaissances, de nouvelles connaissances apportent de nouvelles croyances et de nouvelles croyances apportent de nouvelles valeurs.* » C'est en se fondant sur ces nouvelles valeurs que l'on pourra créer les changements profonds capables de mettre l'entreprise sur le chemin de la performance industrielle [PILLET M. 2004].

## **Conclusion**

Six Sigma est une démarche structurante et très efficace. Elle ne se déploie toutefois pas comme d'autres démarches ou méthodes participatives, car mal appréhendée par une partie de la population. En outre elle restitue une vision du terrain essentiellement à partir de données chiffrées et bien qu'apportant des améliorations et progrès conséquents, ceux-ci s'obtiennent plus par des ruptures en travaux dirigés qu'en amélioration continue et autonome.

La méthodologie Six Sigma a été conçue dans le but de permettre aux entreprises d'optimiser les processus afin d'éviter tout gaspillage et tout risque d'erreur. En effet, de nombreux responsables d'entreprises s'avouent déçus par les programmes qualité qu'ils ont lancés depuis de nombreuses années. Cercles de qualité, Qualité Totale ou encore Gemba Kaizen ont certes contribué à améliorer la qualité des produits. Mais le bilan est mitigé : l'énergie colossale investie dans ces programmes ne s'est pas traduite par une amélioration notable des résultats, et on observe une forte résistance au sein des entreprises face aux dérives bureaucratiques et à l'avalanche de procédures qui en résulte.

Cette méthode représente à cet égard un progrès important. Son objectif est en effet de réconcilier satisfaction du client et intérêt de l'entreprise. Six Sigma a ainsi permis à plusieurs groupes d'envergure mondiale, comme General Electric ou Motorola, d'atteindre le zéro défaut tout en améliorant considérablement leur rentabilité. Ces dernières se plaignaient des coûts excessifs engendrés par leurs démarches qualité. Elles s'interrogeaient, par exemple, sur la valeur ajoutée des démarches de certification. Pourtant, la qualité peut être un formidable levier de rentabilité. A condition toutefois de ne pas se tromper d'objectif. Une démarche qualité ne doit pas se résumer à assurer la conformité des produits.

Six Sigma vise à assurer le zéro défaut en tout point des processus clés pour la performance de l'entreprise. Comme nous l'avons vu, cette démarche consiste à identifier les processus vitaux pour augmenter la satisfaction du client et la rentabilité de l'entreprise, à les analyser en profondeur, puis à les optimiser jusqu'à atteindre le zéro défaut. On distingue quatre principales étapes : identifier les critères de qualité essentiels aux yeux des clients, comprendre l'impact des processus de l'entreprise sur ces critères, mesurer finement l'efficacité de ces processus, optimiser ces processus pour atteindre le zéro défaut sur les critères de qualité essentiels.

La réussite d'un projet Six Sigma requiert l'implication de toute l'entreprise. Les dirigeants des entreprises qui ont lancé des démarches Six Sigma ne manquent jamais de souligner l'énergie

considérable requise de tous les salariés. En effet, les processus optimisés traversent généralement l'ensemble de l'organisation : c'est pourquoi des individus sont concernés dans un grand nombre de départements. De plus, si les premiers résultats se manifestent rapidement, atteindre l'excellence suppose d'appliquer progressivement la démarche à l'ensemble de l'entreprise et de veiller à l'optimisation continue pour s'adapter aux changements de l'environnement.

La méthode Six Sigma repose en effet sur l'utilisation combinée de certains concepts et outils qualité qui doivent être déjà présents dans l'entreprise. En fait, Six Sigma ne propose en effet pas de nouveaux outils ou concepts qualité (la plupart existait bien avant la méthode), mais, et c'est en cela que la méthode est révolutionnaire, propose une méthodologie intégrant de manière cohérente l'ensemble de ces outils et concepts.

# Chapitre 2

## L'approche multicritère d'aide à la décision

### Sommaire

---

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>81</b>
1. Définition et concept fondamentaux .....	82
1.1. Aide à la décision .....	82
1.2. Type de la problématique de décision.....	84
1.3. Les actions .....	84
1.4. Le paradoxe de Condorcet.....	85
1.5. Types de critères.....	86
2. Panorama des méthodes multicritère .....	87
2.1. Les méthodes élémentaires.....	88
2.1.1 La méthode catégorique .....	88
2.1.2 Le cost ratio method .....	89
2.1.3 Méthode de la somme pondérée.....	89
2.1.4 Méthode conjonctive .....	90
2.1.5 Méthode disjonctive .....	90
2.1.6 Méthode de MaxMin.....	91
2.1.7 Méthode Lexicographique.....	91
2.2. Les méthodes d'optimisation mathématiques .....	92
2.2.1 Goal Programming .....	93
2.2.2 La méthode du critère globale .....	94
2.2.3 La programmation mathématique à objectif multiple.....	94
2.2.4 $\epsilon$ - Constraint Method.....	95
2.2.5 Compromise programming .....	95

2.3. Les méthodes d'aide à la décision multicritère .....	96
2.3.1 Méthode de l'approche du critère unique de synthèse .....	97
2.3.2 Les méthodes de l'approche de surclassement .....	108
3. Procédure de choix d'une méthode multicritère d'aide à la décision .....	123
3.1. Caractérisation des inputs.....	125
3.2. Caractérisation des outputs.....	126
3.3. Procédure de choix d'une méthode de sélection .....	127
4. Critique des méthodes d'aide à la décision multicritère et d'optimisation mathématique multicritère.....	129
4.1. Avantages et inconvénients des méthodes d'aide à la décision multicritère ..	129
4.2. Avantages et inconvénients des méthodes d'optimisation mathématique multicritère .....	131
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>132</b>

---

## Introduction

L'aide à la décision déborde aujourd'hui le strict cadre du décideur traditionnel qui s'isole pour prendre une décision. À cet effet, plusieurs raisons peuvent être évoquées : l'évolution économique et concurrentielle, la modification de la structure hiérarchique, la maîtrise de la complexité, l'amélioration de l'efficacité, l'évolution technologique, ... En effet, L'aide à la décision au sein des organisations nécessite une synergie d'efforts de plusieurs membres ayant différents intérêts, compétences et expériences afin que chacun d'eux mette à contribution son savoir-faire. D'ailleurs, c'est grâce à cette synergie que les membres peuvent atteindre des résultats supérieurs à ceux qu'ils auraient pu réaliser individuellement. Pour l'ensemble de ces raisons, plusieurs travaux de recherche ont été entrepris pour améliorer le fonctionnement et la performance des groupes dans la résolution d'un problème de décision. Ces travaux ont essayé d'une part, de structurer ce processus en différentes étapes et d'autre part, d'élaborer un ensemble d'outils et de méthodes permettant à un groupe d'individus de progresser dans la résolution d'un problème de décision. Dans la littérature, ces travaux ont souvent étudié la décision en groupe selon trois grandes perspectives : [MARTEL J. et al 1999]

- Une perspective *structurelle* : les travaux développés selon cette perspective s'intéressent essentiellement aux structures et aux règles de fonctionnement des groupes restreints. Ainsi, ils cherchent à apporter des éléments de réponses aux questions relatives à la structuration des processus de décision en groupe, à la résolution des problèmes reliés aux interactions interpersonnelles, à la compréhension des attitudes et des comportements des individus dans ces processus ;
- Une perspective *mathématique* : les travaux développés selon cette perspective s'intéressent aux problèmes reliés à l'agrégation des préférences individuelles en vue d'établir une préférence collective ou de consensus. De ce fait, ils cherchent essentiellement à développer de nouvelles procédures d'agrégation qui peuvent être appliquées dans divers contextes décisionnels ;
- Une perspective *technologique* : les travaux développés selon cette perspective s'intéressent aux apports des Nouvelles Technologies de l'Information (NTI) pour supporter la prise de décision en groupe. Ainsi, ils cherchent, par exemple, à développer des outils permettant de faciliter l'accès des membres à l'information appropriée, la communication, la collaboration et l'interaction entre ces derniers.

L'approche de l'analyse multicritère, ou encore appelée « analyse à objectifs multiples », se distingue de l'approche classique de la recherche opérationnelle par le fait qu'il ne s'agit pas de répondre à un problème d'optimisation d'une seule fonction objectif (encore appelée « fonction économique »), mais à un problème plus proche de la réalité où plusieurs fonctions objectifs doivent être prises en compte.

## **1. définition et concepts fondamentaux**

### ***1.1 Aide à la décision***

[ROY B. 1985] définit l'aide à la décision ainsi :

L'**aide à la décision** est l'activité, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à prescrire, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part.

Selon cette définition, une activité d'aide à la décision s'articule autour d'un processus de décision. En effet, [MARTEL J. 1999] soutient le fait qu'une activité d'aide à la décision implique un minimum d'insertion dans le processus de décision. Pour [ROY B. 1992], un "problème" de décision n'est pas un objet qui préexiste.

La formulation qu'on en donne ne peut pas, en général, être totalement objective et ne peut être envisagée indépendamment des rapports entre l'individu et la réalité. Il ajoute qu'il est normal que cette formulation évolue au fur et à mesure de l'avancement dans le processus de décision.

Dans ce sens, [LANDRY M. 1998] remarque que le succès d'une démarche d'aide à la décision dans une organisation nécessite la compréhension de l'ensemble du processus de décision dans lequel s'insère cette aide, ce qui implique une capacité à appréhender adéquatement le problème qui justifie l'origine et qui alimente par la suite ce processus.

Toute activité d'aide à la décision fait intervenir un décideur et assez souvent un homme d'étude. Le décideur (decision-maker en anglais), est un intervenant principal à qui on s'adresse.

L'aide à la décision occupe une place centrale dans le processus de décision. La notion de décideur "désigne en dernier ressort l'entité qui apprécie le "possible" et les finalités, exprime les préférences et est sensé les faire prévaloir dans l'évolution du processus" [ROY B. 1985].

Remarquons que dans cette thèse on se met dans un cadre de mono-décideur, où la décision relève d'une seule entité. Néanmoins, en pratique la décision concerne souvent plusieurs parties, que ce soient plusieurs personnes individuelles ou des entités.

Historiquement, le concept de la décision multicritère est parvenu essentiellement suite au paradoxe de vote de Condorcet en 1785. Ainsi, Condorcet montre comment le vote majoritaire peut conduire à une préférence collective non transitive, en particulier cyclique [NURMI H.1999]. Dans son Essai sur l'application de l'analyse à la probabilité des décisions rendues à la pluralité des voix, le Marquis de Condorcet montre que le vote à la pluralité, c'est-à-dire le vote à la majorité simple, ne donne pas toujours des résultats satisfaisants lorsque les votants doivent choisir entre trois options ou plus. Il se peut dans certains cas que le résultat de l'élection ne corresponde pas aux souhaits des électeurs. Il est aisé de voir d'abord que la manière employée dans les élections ordinaires est défectueuse [NURMI H.1987].

Il existe donc une règle implicite de liberté des choix (dans la littérature arrowienne, d'"unrestricted domain") ou règle U. Si un tel profil "révèle" un choix illogique, alors profitant de cette règle U et abusant de la propriété axiomatique de non-validité (faux pour au moins une assignation), il sera possible de généraliser l'impossibilité à l'ensemble du système [NIOU E.2001].

Traditionnellement, l'activité de l'aide à la décision se base sur l'idée de l'existence d'une fonction objectif (ou un critère) bien définie et unique et qui s'impose aux yeux de tous pour caractériser la bonne direction dans laquelle il convenait de faire évoluer le système dont on s'intéressait [ROY B. 1988]. En procédant ainsi, on a l'avantage d'aboutir à un problème "bien posé" mathématiquement dans ce sens qu'il est posé en des termes tels que la solution optimale, est entièrement déterminée par sa formulation [MARTEL J. 1999].

Néanmoins, en pratique les conséquences sont suffisamment complexes, c'est le cas surtout dans le cadre spatial, pour qu'une seule fonction objective (un seul critère) ne puisse appréhender adéquatement toute l'information nécessaire à la comparaison globale des différentes alternatives d'action possibles [MARTEL J. 1999], ces conséquences sont multiples et s'apprécient en des termes forts variés (économiques, techniques, de confort, ...).

Pour [BOUYSSOU D. 1993], l'argument réaliste selon lequel la réalité étant multidimensionnelle, il est naturel que l'on prenne en compte plusieurs points de vue pour aider à la décision et donc qu'on utilise des méthodes multicritères, ne peut à lui seul justifier d'adopter une démarche multicritère pour aider à la décision. Utiliser un tel argument

conduirait à voir le monocritère comme un cas limite et dégénéré du multicritère. Toujours selon [BOUYSSOU D. 1993], adopter une démarche multicritère, ce n'est pas postuler que "dans la réalité" un seul critère est à l'œuvre mais c'est, plus simplement, vouloir aider à la décision en n'exhibant qu'un seul critère. Il y a, selon lui, à la base d'une démarche multicritère en aide à la décision, un "acte de foi" consistant à croire que construire explicitement plusieurs critères peut avoir un "rôle positif" dans le processus de modélisation.

## ***1.2. Types de la problématique de décision***

[ROY B. 1985] a proposé quatre problématiques décisionnelles de référence :

**(1) La problématique de choix (P. $\alpha$ )** : il s'agit de choisir un sous-ensemble d'actions aussi restreint que possible en vue d'un choix final d'une seule action, ce sous-ensemble contenant des « meilleures » actions (optima) ou à défaut, des actions « satisfaisantes » (satisfecums).

**(2) La problématique du tri (P. $\beta$ )** : il s'agit de trier les actions d'après des normes ou à élaborer une procédure d'affectation. Le résultat du tri est une affectation de chaque action à une catégorie. Les catégories étant définies a priori.

**(3) La problématique de rangement P. $\gamma$**  : elle consiste à ranger les actions selon un ordre de préférence décroissante.

**(4) La problématique de description P. $\delta$**  : son objectif est d'éclairer la décision par une description, dans un langage approprié, des actions et de leurs conséquences.

## ***1.3 Les actions***

L'ensemble des actions peut être :

- défini en extension : (par énumération de ses éléments) lorsqu'il est fini et suffisamment petit pour que l'énumération soit possible.
- défini en compréhension : lorsqu'il est infini ou fini mais trop grand pour que l'énumération soit possible.
- stable : il est défini a priori et n'est pas susceptible d'être changé en cours de procédure.
- évolutif : il peut être modifié en cours de procédure.
- globalisé : chaque élément de A est exclusif de tout autre.
- fragmenté : les résultats du processus de décision font intervenir des combinaisons de plusieurs éléments de A.

## 1.4 Le paradoxe de Condorcet

C'est historiquement le premier exemple de paradoxe de vote. Condorcet montre comment le vote majoritaire peut conduire à une préférence collective non transitive, en particulier cyclique [CONDORCET. 1785].

Dans son Essai sur l'application de l'analyse à la probabilité des décisions rendues à la pluralité des voix [BORDA, J. 1784], le Marquis de Condorcet montre que le vote à la pluralité, c'est-à-dire le vote à la majorité simple, ne donne pas toujours des résultats satisfaisants lorsque les votants doivent choisir entre trois options plus. Il se peut dans certains cas que le résultat de l'élection ne corresponde pas aux souhaits des électeurs.

Chronologiquement, il semble que Condorcet ait été précédé en cela par Borda [BORDA, J. 1784]. En 1770, ce dernier proposait déjà une solution aux problèmes de la règle majoritaire avec la fameuse règle de Borda. Il s'agit, pour chaque candidat, de classer les  $m$  candidats selon sa préférence. Un candidat classé à la place  $k$  reçoit alors  $a+b(m-k)$  points. « Les quantités  $a$  &  $b$ , peuvent être tout ce qu'on voudra, on pourra donc supposer  $a = 1$  &  $b = 1$  ». Chaque candidat reçoit alors  $m$  points à chaque fois qu'il est classé en première place,  $m-1$  lorsqu'il est classé à la deuxième, etc. Le candidat élu est celui qui a reçu le plus de points. Exposée devant l'Académie des Sciences en juin 1770, cette méthode ne sera publiée qu'en 1784 dans « Mémoire sur les élections au scrutin », Mémoires de l'Académie Royale des Sciences pour 1781. Il y critique déjà la difficulté pratique d'effectuer les comparaisons par paires entre tous les candidats, cette façon étant depuis appelée procédure de Condorcet. [CONDORCET 1785]

Définition (Vainqueur de Condorcet) : Une alternative qui bat toutes les autres en duel est appelée vainqueur de Condorcet (VC). Un cycle peut cependant exister parmi les candidats moins bien classés. On pourrait arguer que cela n'en est pas moins dommageable. En réalité, le but d'un vote, plus que d'obtenir une préférence sociale totale c'est-à-dire le classement complet des préférences de la société, est d'obtenir un choix entre plusieurs alternatives ou candidats.

À la limite, s'il existe une alternative largement en tête et que les autres sont toutes ex æquo, ce n'est pas gênant du moment qu'il s'agit de n'élire qu'un candidat. Le but du vote n'est jamais, du moins au niveau politique, de déterminer la pire des alternatives, mais toujours la meilleure. Un cycle n'est donc problématique que lorsqu'il concerne le « haut » des préférences, ce qu'on appelle top cycle en anglais.

## 1.5 Types de critères

Un **critère** permet d'évaluer et de comparer des actions potentielles selon un objectif bien défini. A chaque critère est associée une donnée descriptive unique.

Il existe plusieurs types de critères :

- *Le vrai critère* : Nous parlons de vrai critère lorsque l'action qui reçoit la meilleure note sera préférée à l'autre. Il n'y a indifférence que si les deux notes sont égales.

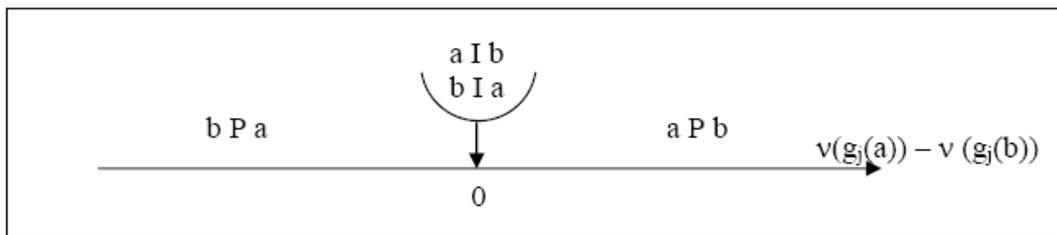


Figure. 43 Le vrai critère

- *Le quasi-critère* : Nous parlons de quasi-critère lorsqu'il y a une plage d'indifférence  $[-q, q]$ .

Il y a indifférence entre les actions a et b lorsque l'écart de leur évaluation tombe dans la plage  $[-q, q]$ .

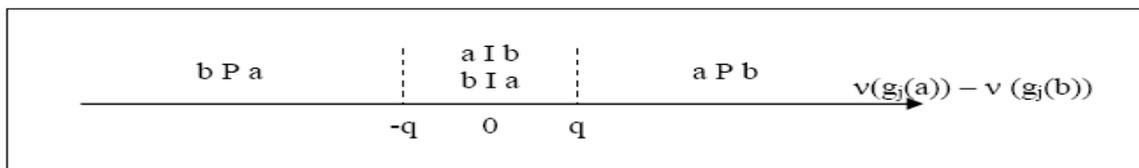


Figure. 44 Le quasi critère

- *Le pré-critère* : Un pré-critère est un vrai critère auquel on a introduit une plage de préférence faible.

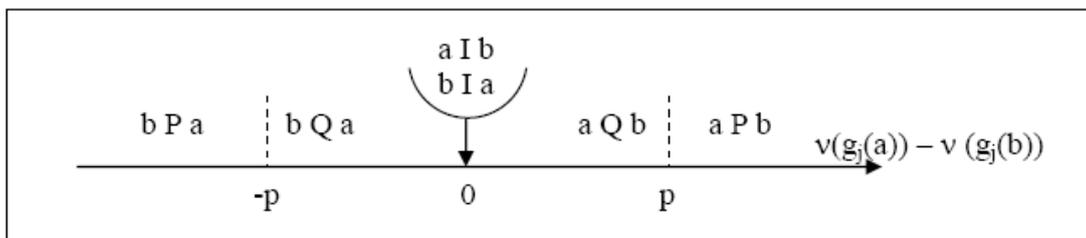


Figure. 45 Le pré- critère

L'aspect compensatoire d'une méthode traduit la plus ou moins grande possibilité de contrebalancer un désavantage sur un critère [COLSON G. et al 1989] déclarent que toute méthode de décision multicritère peut être soit :

- Compensatoire : dans ce cas, on admet une compensation absolue entre les différentes évaluations. Ainsi, une bonne performance sur un critère peut être facilement contrebalancée par une faible performance sur un autre critère. Plusieurs méthodes figurent dans cette catégorie par exemple la méthode de la somme pondérée.
- Non compensatoire : aucune compensation n'est acceptée entre les différentes dimensions. Le décideur peut énoncer que les dimensions sont suffisamment importantes pour refuser toute sorte de compensation ou de compromis. On peut citer la méthode lexicographique.
- Partiellement compensatoire : dans ce cas, une sorte de compensation est acceptée entre les différentes dimensions ou critères. La plupart des méthodes multicritères se trouvent dans cette catégorie. Le problème majeur est d'évaluer le degré de compensation de chacune des méthodes [ZELENY M. 1982].

## **2. Panorama des méthodes multicritère**

L'optimisation unicritère, c'est-à-dire celle qui ne prend en compte qu'un seul critère, n'est en fait, en général, qu'une simplification des problèmes qui se passent dans la vie courante.

En effet, la plupart des problèmes de décision auxquels nous sommes confrontés sont multicritères.

Dans les problèmes de production, on ne vise pas uniquement un bénéfice maximum mais également des coûts de production minimaux, un développement maximum de certains produits compte tenu d'une stratégie de marché, la minimalisation d'investissements nouveaux, la minimalisation des risques d'exportation, ...

L'optimisation multicritère constitue cependant un problème dont la solution est mathématiquement impossible ! Ce n'est en effet que dans des cas exceptionnels que l'on pourra trouver une solution qui optimise tous les critères simultanément.

Les méthodes d'analyse multicritère ou, plus exactement, les méthodes d'aide multicritère à la décision sont des techniques assez récentes et en plein développement. Par leur manière d'intégrer tout type de critères, ces procédures semblent mieux permettre de se diriger vers un judicieux compromis plutôt qu'un optimum souvent désuet » [BEN MENA S. 2005].

Les méthodes multicritères semblent donc mieux refléter la réalité humaine qui est à points de vue multiples. Elle constitue une sorte de prolongement de la recherche opérationnelle, mais certainement pas une rivale qui cherche à l'éliminer.

Nous pouvons distinguer trois classes de méthodes multicritères: les méthodes élémentaires, les méthodes d'optimisation mathématiques et les méthodes d'aide à la décision multicritères. Le choix de l'une ou de l'autre des trois classes de méthodes peut dépendre soit des données dont on dispose pour traiter le problème multicritères considéré, soit de la façon avec laquelle le décideur modélise ses préférences :

- **Les méthodes élémentaires ou les méthodes d'aide à la décision multicritères** : ces méthodes sont utilisées quand le problème posé possède plusieurs solutions. Dans ce cas, le problème considéré se réduit au choix de la meilleure solution. Néanmoins, le choix de la meilleure solution est conditionné par la façon avec laquelle le décideur exprime ses préférences, ce qu'on appelle en théorie de la décision, la modélisation des préférences. C'est ce qui différencie les deux types de méthodes. En effet, dans les méthodes d'aide à la décision multicritères, le décideur peut se montrer indifférent entre deux solutions possibles.
- **Les méthodes d'optimisation mathématiques** : ce type de méthode permet le traitement de problèmes avec contraintes mais dont les solutions ne sont pas connues. Les modèles obtenus peuvent être linéaires, linéaires avec variables entières, linéaires mixtes, quadratiques, non linéaires, ...
- **Les méthodes d'aide à la décision multicritères (MADMC)** : ce type de méthode permet aux décideurs de faire un bon «choix ». Pour certain expert du domaine, ce choix existe dans l'esprit du décideur, et le processus d'aide à la décision doit le faire ressortir pour d'autres, le processus d'aide à la décision doit créer ce choix. [CAILLET. R 2003]

## 2.1. Les méthodes élémentaires

### 2.1.1 La méthode catégorique : (Categorical method)

La méthode catégorique consiste à faire une évaluation des performances de chaque action par rapport à chaque critère, et ce en affectant un « grade » : un terme catégorique simple, par exemple « Bon », « insatisfaisant », « neutre ». On effectue dans une deuxième étape la somme des évaluations de chaque action pour obtenir un score global par action.

Cependant, la méthode catégorique est l'une des méthodes les plus simples pour traiter un problème de sélection. Elle est facile à mettre en oeuvre. Toutefois, elle fait appel à des jugements basés sur la mémoire et l'expérience du décideur.

La méthode catégorique permet la classification des actions les unes par rapport aux autres. La méthode catégorique utilise le même ordre d'importance pour tous les critères. La méthode catégorique est compensatoire [TIMMERMAN E. 1986].

### ***2.1.2 Le Cost-ratio Method***

La méthode consiste à déterminer un coût global par produit : c'est la somme des coûts d'acquisition et des coûts internes relatifs à la qualité, au délai et aux services associés.

La méthode «cost-ratio » se présente comme suit :

**-Etape 1 :** Déterminer les coûts internes associés à la qualité, au délai et aux services.

**-Etape 2 :** Convertir ces coûts en des ratios traduisant les pourcentages de ces coûts par rapport au coût d'acquisition.

**-Etape 3 :** Faire la somme des ratios relatifs à chacun des coûts pour obtenir un ratio global (c'est la pénalité globale).

**-Etape 4 :** Appliquer le ratio global au coût unitaire d'acquisition du produit pour obtenir un coût net ajusté.

Par ailleurs, la méthode « Cost Ratio » est plus précise que la méthode catégorique. Sa mise en place reste très complexe car elle exige une compréhension du système des coûts. Le cost-ratio method est une méthode compensatoire [TIMMERMAN E. 1986].

### ***2.1.3 La méthode de la somme pondérée (the linear averaging method or weighted point method)***

Cette méthode consiste à se fixer un ensemble de critères et à les classer en affectant à chacun d'eux un poids. La méthode de la somme pondérée se présente comme suit :

**-Etape 1 :** Identifier les critères pertinents à la problématique ;

**-Etape 2 :** Arranger les éléments identifiés en catégories homogènes ;

**-Etape 3 :** Affecter des poids (traduisant l'importance relative des critères) aux critères listés ;

**-Etape 4 :** Construire une matrice pour procéder à une moyenne linéaire ;

**-Etape 5 :** Développer des procédures spécifiques pour mesurer les performances des actions ;

**-Etape 6 :** Évaluer chaque action (fournisseur) sur chacun des critères en se référant aux procédures développées à l'étape précédente ;

**-Etape 7 :** Calculer le score global (weighted-ratings) pour chaque action.

La méthode de la somme pondérée est l'une des méthodes les plus utilisées. Elle a l'avantage d'être facile à comprendre et à mettre en oeuvre. Toutefois, sa difficulté réside dans la définition de procédures de conversion des évaluations qualitatives en des évaluations quantitatives. La méthode de la somme pondérée est compensatoire [TIMMERMAN E. 1986].

#### 2.1.4. Méthode conjonctive

La méthode conjonctive consiste à se fixer des niveaux minima d'acceptation sur chacun des critères. Les actions qui ne respectent pas ces niveaux minima d'admissibilité seront écartées.

La méthode conjonctive se présente comme suit :

**-Étape 1 :** Fixer un niveau minimal  $e_j^0$  pour chaque critère j (niveau de coupe),

**-Étape 2 :** Vérifier pour chaque action si sa performance sur chaque critère égale ou excède ce niveau minimal fixé ( $e_{ij} > e_j^0$ ).

La procédure conjonctive est facile à utiliser. Elle permet la mesure des critères sur des échelles hétérogènes. Elle exige de fixer des seuils d'admissibilité pour chaque critère. La méthode conjonctive permet d'extraire un ensemble d'actions jugées assez bonnes parmi toutes les actions possibles. Par ailleurs, elle n'assure pas la comparaison des bonnes actions les unes par rapport aux autres : elle est ainsi totalement non compensatoire. Dans le cas où le décideur est intéressé par le choix d'une seule action, il doit appliquer une autre méthode de sélection aux résultats obtenus par l'application de la méthode conjonctive.

**Étape 3 :** Rejeter les actions qui ne respectent pas les exigences minimales [TIMMERMAN E. 1986].

#### 2.1.5. Méthode disjonctive

La méthode disjonctive consiste à se fixer des niveaux de satisfaction désirés pour chacun des critères et à sélectionner les actions qui ont les évaluations les plus élevées sur n'importe lequel des critères. Elle conduit à sélectionner les actions qui ont des performances exceptionnelles sur certains critères.

La méthode disjonctive se présente comme suit :

**-Étape 1 :** Fixer un niveau désiré  $e_j^*$  pour chaque critère,

**-Étape 2 :** Pour chaque action i, vérifier si sa performance sur au moins un critère est égale ou excède ce niveau désiré ( $\exists j / e_{ij} > e_j^*$ ),

**-Etape 3 :** Rejeter les actions qui ne satisfont pas cette condition.

La procédure disjonctive est facile à utiliser. Elle permet la mesure des critères sur des échelles hétérogènes. La méthode disjonctive est totalement non compensatoire.

Puisqu'il est très rare qu'une action soit la meilleure sur tous les critères, le résultat de l'application de la méthode disjonctive est souvent un ensemble d'actions et non pas une solution unique. Ainsi, dans le cas où le décideur est intéressé par le choix d'une seule action, il doit appliquer une autre méthode de sélection aux résultats obtenus par l'application de la méthode disjonctive.

### **2.1.6. Méthode du « MaxMin »**

La méthode « MaxMin » est utilisée pour choisir une action (considérée comme la meilleure action) parmi un ensemble d'actions et ce selon l'expression suivante :

$$a^* = \{a_i \in A, \text{Miax} (M_{\text{jin}}(g_j[a_i])) , i = 1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n\}$$

Le terme « MaxMin » indique que la procédure cherche à sélectionner le maximum (selon les actions) des évaluations minimums (selon les critères). Ainsi, la performance globale d'une action est déterminée par sa pire performance, «la force d'une chaîne correspond à celle de son maillon le plus faible». Cette procédure est appropriée dans le cas où le décideur a une attitude pessimiste [GUITOUNI A. 1998].

La procédure MaxMin exige que les critères d'évaluation des actions soient commensurables. Une façon de faire est la normalisation. La méthode est facile à appliquer. Elle est totalement non compensatoire.

### **2.1.7 Méthode lexicographique**

La méthode lexicographique s'applique dans certaines situations où on est en mesure d'établir une relation de dominance dictatoriale entre les critères ( $g^{(1)} \gg g^{(2)} \gg g^{(3)} \gg \dots \gg g^{(n)}$ ). Ainsi, on ne tiendra compte des critères les moins importants que lorsque les comparaisons effectuées sur ceux de plus grande importance ne permettent pas la discrimination entre les actions.

**-Etape 1 :** Ranger les critères par ordre d'importance,

**-Etape 2 :** Comparer toutes les actions par rapport au critère le plus important,

**-Etape 3 :** Choisir celle(s) qui a (ont) la meilleure performance par rapport au critère retenu (le plus important en premier lieu),

**-Étape 4** : Si plus d'une action sont retenues et s'il reste des critères non encore considérés, alors procéder de la même manière sur la base du critère suivant en terme d'importance.

La méthode lexicographique a le mérite d'être facile à utiliser. Elle permet la mesure des critères sur des échelles hétérogènes. Par ailleurs, elle n'exige pas de fixer des coefficients d'importance pour les critères. La méthode lexicographique est totalement non compensatoire [GUITOUNI A . 1998].

## ***2.2 Les méthodes d'optimisation mathématiques***

Les méthodes d'optimisation mathématique sont les plus utilisées, dans le domaine de la recherche scientifique, pour traiter le problème de sélection. Le problème est souvent formalisé sous la forme d'une ou de plusieurs fonctions objectifs et d'un ensemble de contraintes à respecter. Les modèles obtenus peuvent être linéaires, linéaires avec variables entières, linéaires mixtes, quadratiques, non linéaires... et ce en fonction du problème à formaliser.

Les méthodes d'optimisation mathématique sont souvent exploitées en deux étapes :

Étape de modélisation : elle consiste à formaliser le problème étudié en un modèle d'optimisation.

Étape de résolution : elle consiste à résoudre le modèle proposé.

Le problème de sélection est multicritère dans le sens où l'évaluation d'une action se fait souvent en considérant plusieurs critères à la fois. Dans cette section, on se limite à la présentation de méthodes d'optimisation mathématique permettant l'intégration de plusieurs critères. Cette intégration se fait de trois façons différentes :

(1) L'agrégation des critères en une seule fonction objective (Compromise Programming, Goal Programming, méthode du critère global...).

(2) L'optimisation d'un critère dans la fonction objectif et l'intégration des autres critères dans les contraintes du modèle ( $\epsilon$ -Constraint Method).

(3) La formulation du problème en un programme mathématique à objectifs multiples [HILLIER F. et al 2001].

### 2.2.1 Goal Programming(GP)

L'essence du goal programming (GP) réside dans le concept de satisfaction d'objectifs: on se fixe un but  $b_j$  à atteindre pour chacun des critères, et on procède de la manière suivante (selon la variante du GP) :

(1) *Variante 1 (Standard Goal Programming)* : il s'agit de minimiser la somme des valeurs absolues des écarts par rapport aux buts [CHARNES A. et al 1961].

(2) *Variante 2 (MinMax Goal Programming)* : il s'agit de minimiser l'écart maximum par rapport aux buts [FLAVELL R. 1976].

(3) *Variante 3 (Lexicographic Goal Programming)* : il s'agit de minimiser la somme des écarts par rapport aux buts d'une manière lexicographique [IJIRI Y. 1965] .Pour ce faire, on procède comme suit :

**Etape 1** : Classer les critères par ordre d'importance.

**Etape 2** : Sélectionner les actions qui minimisent l'écart par rapport au premier critère seulement – appelle ce sous-ensemble d'actions  $A_1$ .

**Etape 3** : Parmi les actions de  $A_1$ , sélectionner celles qui minimisent la somme des écarts (ou bien la somme pondérée des écarts) par rapport aux 2 premiers critères (les 2 critères ayant les plus grandes importances)- le sous-ensemble obtenu est  $A_2$ .

**Etape 4** : Procéder de la même manière pour obtenir un sous-ensemble  $A_3$  à partir des actions de  $A_2$ .

**Etape 5** : Continuer la procédure de proche en proche et arrêter lorsque la condition d'arrêt (obtention du nombre d'actions désirées ou bien arrêt au  $k^{\text{ème}}$  critère ou bien ...) est satisfaite.

La représentation algébrique du LGP s'écrit comme suit :

La formulation du modèle standard du Goal Programming est comme suit [OGRYCZAK W. 2001]:

$$\begin{aligned} & \text{Min}_{\underline{x} \in A} \sum_{i=1}^p (\delta_i^+ + \delta_i^-) \\ & \text{Sujet à : } C_l(\underline{x}) \leq 0, l = 1, 2, \dots, L \\ & g_i(\underline{x}) - \delta_i^+ + \delta_i^- = b_i, i = 1, 2, \dots, n \\ & \delta_i^+, \delta_i^- \geq 0 \end{aligned}$$

Avec :  $\delta_i^+$  : l'écart positif de  $\underline{x}$  par rapport au but.

$\delta_i^-$  : L'écart négatif de  $\underline{x}$  par rapport au but.

$g_i(\underline{x})$  : L'évaluation de la solution  $x$  par rapport au critère  $i$ .

$C_1(\underline{x})$ : système de contraintes relatives au problème.

Le produit des déviations positifs et négatifs ( $\delta_i^+ \times \delta_i^-$ ) est toujours nul, car les vecteurs  $\delta_i^+$  et  $\delta_i^-$  ne peuvent être actifs (c'est-à-dire une solution de base) simultanément. En d'autres termes, pour un objectif  $i$  quelconque, nous ne pouvons être en même temps en dessous ( $\delta_i^-$ ) et en dessus ( $\delta_i^+$ ) du but fixé  $g_i$  [JAHANSHAHLOO G. et al 2008].

Dans le Goal Programming standard, le décideur est principalement appelé à fixer des buts pour les objectifs qu'il a préalablement déterminés. Son implication dans le processus décisionnel s'arrête en général à ce stade.

Le modèle du Goal Programming a connu plusieurs variantes. A titre d'indications, nous citons: le GP pondéré, le GP lexicographique, le GP minimax, le GP non linéaire, le GP incluant des fonctions de satisfaction, le GP avec intervalles, le GP flou, le GP interactif [KETTANI O. et al 2004].

### **2.2.2 La méthode de critère global**

La méthode du critère global développée par VINCKE 1989 s'articule dans une optique de minimisation des écarts par rapport à la solution idéale sans procéder à une articulation a priori des préférences. Sa formulation algébrique est la suivante :

$$\text{Min}_{\underline{x} \in A} \sum_{j=1}^n \left[ \frac{g_j(\underline{x}^*) - g_j(\underline{x})}{g_j(\underline{x}^*)} \right]^r$$

Avec,  $g_j(\underline{x}^*)$  : est l'évaluation de la meilleure des solutions sur le critère  $j$ .

Si  $r$  est un entier pair, alors le décideur est indifférent par rapport aux écarts positifs et négatifs.

Si  $r$  est un entier impair, alors le décideur est sensible aux écarts positifs et négatifs [HAMMAMI A. 2003].

### **2.2.3 La Programmation Mathématique à Objectifs Multiples (PMOM)**

La programmation mathématique à objectifs multiples développée par [STEWART S. and al 1991] est une technique qui prend en compte plusieurs fonctions économiques, chacune jouant le rôle d'un critère (on parle aussi de fonction critère). Chacune de ces fonctions possède un optimum, qui ne sera- en général - pas celui des autres fonctions. Ainsi, une solution optimale n'existe pas; car ce qui est optimal selon un critère ne l'est pas selon les autres critères. Il va donc falloir choisir une solution de compromis : solution jugée satisfaisante.

La formulation algébrique d'une programmation mathématique à objectifs multiples (PMOM) est la suivante : [HAMMAMI A. 2003]

$$\begin{aligned} & \text{Optimiser } \underline{g}(\underline{x}) \\ & \underline{x} \\ \text{Sujet à : } & c_l(\underline{x}) \leq 0, l = 1, 2, \dots, L \\ & \underline{g} = \{g_1, g_2, \dots, g_n\} \end{aligned}$$

Dans un PMOM, on s'intéresse essentiellement à la détermination de l'ensemble des solutions efficaces.

#### **2.2.4 $\varepsilon$ - Constraint Method**

La méthode du  $\varepsilon$ - Constraint développée par VANHENTENRYCK 1989 consiste à transformer un programme d'optimisation multi-objectif en un problème d'optimisation mono-objectif comportant des contraintes supplémentaires. La formulation mathématique de la méthode est la suivante : [HAMMAMI A. 2003]

$$\begin{aligned} & \text{Min}_{\underline{x} \in A} g_1(\underline{x}) \\ \text{Sujet à : } & c_l(\underline{x}) \leq 0, l = 1, 2, \dots, L \\ & g_j(\underline{x}) \leq \varepsilon_j, j = 2, \dots, n \\ & \varepsilon_j \geq 0, j = 2, 3, \dots, n \end{aligned}$$

La méthode du  $\varepsilon$ - Constraint est facile à mettre en place. Elle exige de fixer un seuil de performance sur n-1 critères.

#### **2.2.5 Compromise Programming (CP)**

La technique compromise programming (CP) développée par [ZELENY M. 1973] s'articule autour d'une optique de minimisation des écarts par rapport à la solution idéale tout en procédant à une articulation a-priori des préférences ( $\alpha_j$ ). Sa formulation algébrique est la suivante :

$$\text{Min}_{\underline{x} \in A} \left[ \sum_{j=1}^n \alpha_j^r \left[ \frac{g_j(\underline{x}) - g_j(\underline{x}^*)}{g_j(\underline{x}^*) - g_j(\underline{x}^*)} \right]^r \right]^{1/r}$$

Avec,  $g_j(\underline{x}^*)$  : est l'évaluation de la meilleure des solutions sur le critère j.

$g_j(\underline{x}^*)$  : est l'évaluation de la pire des solutions sur le critère j.

Par sa définition, la fonction objective de la technique de compromise programming n'exige pas de normalisation des évaluations. En effet, les évaluations sont d'une certaine façon normalisées puisque la performance d'une action par rapport à un critère est divisée par le terme  $g_j(\underline{x}^*) - g_j(\underline{x}^*)$ , et par conséquent le terme  $\frac{g_j(\underline{x}) - g_j(\underline{x}^*)}{g_j(\underline{x}^*) - g_j(\underline{x}^*)}$  n'a pas d'unité [ANDRE F J. et al 2007].

### 2.3 Les méthodes d'aide à la décision multicritère (MADMC)

[GUITOUNI A. 1998] stipule que le processus d'aide multicritère à la décision peut généralement être vu comme un processus récursif (itératif), non linéaire, composé de cinq étapes principales :

- (1) La structuration de la situation (problème) de décision ;
- (2) L'articulation et la modélisation des préférences au niveau de chaque point de vue (modélisation des préférences locales) ;
- (3) L'agrégation de ces préférences locales en vue d'établir un ou plusieurs systèmes relationnels de préférences globaux ;
- (4) L'exploitation de cette agrégation ;
- (5) La recommandation.

La structuration de la situation consiste à :

- Déterminer le type de problématique à résoudre : problématique de choix, problématique de tri, problématique de rangement ou problématique de description,
- Déterminer l'ensemble des actions à étudier,
- Recenser les critères selon lesquels les actions seront évaluées,
- Déterminer les évaluations de chacune des actions sur chacun des critères.

L'articulation et la modélisation des préférences consiste à :

- Définir les types de critères : vrai critère, pseudo critère, quasi critère, critère gaussien,...
- Définir l'ordre d'importance des critères ainsi que leur poids si besoin est,
- Définir, et ce selon la méthode d'agrégation retenue, les fonctions d'utilité partielle, les fonctions de valeur, les comparaisons par paires d'actions...

L'agrégation des préférences locales consiste à traiter les évaluations partielles des actions sur les différents critères afin de générer une évaluation globale.

L'exploitation consiste à exploiter les résultats obtenus à l'étape d'agrégation des préférences locales pour choisir, ranger ou trier les actions.

Selon [ROY B. 1985], dans certains contextes décisionnels, une modélisation élaborée des préférences du décideur est requise. Selon la manière d'agrégation des préférences du décideur, il est possible de distinguer les approches :

- L'approche du critère unique de synthèse évacuant l'incomparabilité. Ces approches sont exploitées dans le cas où le décideur est capable de juger toute paire d'actions {a, b} et ce selon un des cas suivant : soit a est préférée à b, soit b est préférée à a, soit le décideur est indifférent entre a et b. Il n'y a donc pas d'incomparabilité entre deux actions.
- L'approche du surclassement de synthèse. Ces approches permettent l'incomparabilité entre actions. Certaines sont caractérisées par des structures de préférences fortes, faible, indifférence, incomparabilité.
- L'approche du jugement local interactif. Ces approches sont caractérisées par une interaction continue entre l'homme d'étude et le décideur tout au long du processus d'aide à la décision.

### ***2.3.1 Méthodes de l'approche du critère unique de synthèse***

#### **- La méthode TOPSIS: Technique for Order by Similarity to Ideal Solution**

L'idée fondamentale de cette méthode qui est développée par HWANG et YOON T 1981 consiste à choisir une solution qui se rapproche le plus de la solution idéale (meilleure sur tous les critères) et de s'éloigner le plus possible de la pire solution (qui dégrade tous les critères)

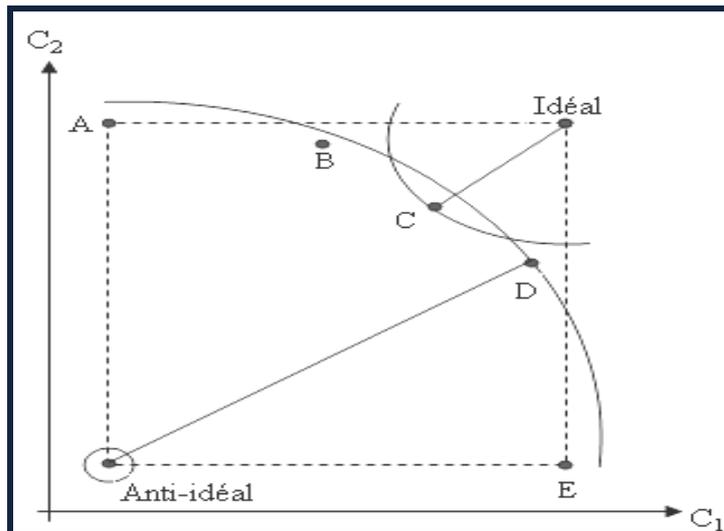


Figure. 46 Illustration des distances à l'idéal et à l'anti-idéal [MÉNDEZ M. et al 2006]

Sur cette figure cinq alternatives A, B, C, D, E deux critères C1 et C2, et les points idéaux (c'est la solution optimale), et anti idéal sont représentés. En utilisant la distance euclidienne habituelle avec des poids égaux, on constate que C est le point le plus proche de l'idéal, alors que D est le plus éloigné de l'anti-idéal. TOPSIS résout ce dilemme du choix entre idéal et anti idéal en utilisant pour chaque alternative les distances pondérées à l'idéal et à l'anti idéal [POMEROL J. et al 1993] [MÉNDEZ M. et al 2006].

Les étapes de la méthode TOPSIS sont comme suit :

- **Etape 1** : Normaliser les performances

$$e'_{ij} = \frac{g_j(a_i)}{\sqrt{[g_j(a_i)]^2}}$$

Avec:  $i=1, 2, \dots, m;$

$j=1, 2, \dots, n;$

$g_j(a_i)$  correspondent aux valeurs déterministes des actions  $i$  pour le critère  $j$ .

- **Etape 2** : Calculer le produit des performances normalisées par les coefficients d'importance relative des attributs :

$$e''_{ij} = \pi_j \times e'_{ij}$$

$$\sum_{j=1}^n \pi_j = 1$$

Avec:  $i=1, 2, \dots, m$ ;  
 $j=1, 2, \dots, n$ ;  
 $\pi_j$  est le poids du  $j^{\text{ième}}$  critère.

- **Etape 3 :** Déterminer les solutions idéal ( $a^*$ ) et les solutions anti-idéal ( $a^*$ ).

$$a^* = \{\max_i e''_{ij}, i=1, 2, \dots, m \text{ et } j=1, 2, \dots, n\};$$

$$a^* = \{e^*_j, j=1, 2, \dots, n\} = \{e^*_1, e^*_2, \dots, e^*_n\};$$

$$e^*_j = \max_i \{e''_{ij}\}.$$

$$a^* = \{\min_i e''_{ij}, i=1, 2, \dots, m \text{ et } j=1, 2, \dots, n\};$$

$$a^* = \{e_{j^*}, j=1, 2, \dots, n\} = \{e_{1^*}, e_{2^*}, \dots, e_{n^*}\};$$

$$e_{j^*} = \min_i \{e''_{ij}\}.$$

- **Etape 4 :** Calculer la distance euclidienne par rapport aux profils ( $a^*$ ) et ( $a^*$ ).

$$D^*_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (e''_{ij} - e^*_j)^2},$$

$$\forall: i=1, 2, \dots, m$$

$$D_{i^*} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (e''_{ij} - e_{j^*})^2},$$

$$\forall: i=1, 2, \dots, m$$

- **Etape 5 :** Calculer un coefficient de mesure du rapprochement au profil idéal.

$$C^*_i = \frac{D_{i^*}}{D^*_i + D_{i^*}}$$

$$\forall: i=1, 2, \dots, m, \text{ et } 0 \leq C^*_i \leq 1$$

- **Etape 6 :** Ranger les actions en fonction des valeurs décroissantes de  $C^*_i$  [YANG T. et al 1996].

La méthode TOPSIS permet d'ordonner les actions. Son grand apport est l'introduction des notions d'idéal et d'anti-idéal. Elle est facile à appliquer. En outre, elle est sensible à la volonté du décideur.

Toutefois, certaines limites caractérisent cette méthode : les attributs doivent être de nature cardinale, les préférences sont fixées a priori. Par ailleurs, si toutes les actions sont mauvaises, la méthode propose la meilleure action parmi les mauvaises. La méthode TOPSIS est partiellement compensatoire.

### - La méthode SMART : Simple Multi-Attribute Rating Technique

La méthode SMART développée par [EDWARDS.W 1971] consiste à utiliser la forme additive pour l'agrégation des évaluations sur les différents critères. Ceci a été justifié par le

fait qu'on obtient d'aussi bonnes approximations avec la forme additive qu'avec d'autres formes non linéaires qui sont beaucoup plus complexes.

La méthode SMART se présente comme suit :

- **Etape 1** : Mettre les critères selon l'ordre décroissant d'importance ;
- **Etape 2** : Déterminer le poids de chaque critère ;
- **Etape 3** : Normaliser les coefficients d'importance relative entre 0 et 1 : faire la somme des coefficients d'importance et diviser chaque poids par cette somme.
- **Etape 4** : Mesurer la localisation de chaque action sur chaque critère  $u_j(a_i)$  . Les évaluations des actions se font sur une échelle variant de 0 (minimum plausible) à 100 (maximum plausible).
- **Etape 5** : Déterminer la valeur de chaque action selon la somme pondérée suivante :

$$u_j(a_i) = \sum_{j=1}^n \pi_j u_j(a_i)$$

$\forall: i=1, 2, \dots, m$

- **Etape 6** : Classer les actions selon l'ordre décroissant de  $u_j(a_i)$

Cependant la méthode SMART est facile à exploiter. Elle exige une articulation a priori des préférences, et une évaluation des actions sur une échelle unique (échelle cardinale). La méthode SMART utilise la forme additive, elle est ainsi compensatoire.

### **-La méthode MAVT : Multiple Attribute Value Theory**

La méthode MAVT développée par KEENEY et RAIFA en 1976 repose sur l'idée fondamentale suivante : tout décideur essaie inconsciemment (ou implicitement) de maximiser une fonction  $V = V[g_1, \dots, g_n]$  qui agrège tous les attributs. La particularité de la méthode MAVT réside dans l'idée de construction d'une fonction de valeur partielle pour chaque attribut. La meilleure action sur un attribut aura une valeur partielle (par rapport à l'attribut étudié) égale à 1 et la pire des actions aura une valeur partielle égale 0. En posant des questions au décideur, nous construisons les fonctions de valeur partielle. Nous construisons ensuite, et ce en fonction des caractéristiques des préférences du décideur, la fonction de valeur  $V$ . La méthode MAVT s'applique dans un contexte caractérisé par un ensemble d'actions explicite, une articulation a priori des préférences et un univers déterministe (les évaluations des actions par rapport à chaque attribut sont certaines).

**[HWANG C. et al 1981]**

Cette méthode est d'inspiration anglo-saxonne et est notamment utilisée aux Etats-Unis dans des problèmes d'aide à la décision, des problèmes d'économie, de finance et d'actuariat [VINCKE P. 1994].

Les étapes de la méthode MAVT sont comme suit :

**-Etape 1 :** Évaluer chacune des actions selon chaque critère (construire la matrice de décision: tableau multicritère).

	$g_1$	$g_j$		$g_n$
$a_1$	..	..	..	..
	..	..	..	..
	..	..	..	..
$a_i$	..	$g_j(a_i)$	..	..
	..	..	..	..
$a_m$	..	..	..	..
	$v_1(g_1)$	$v_j(g_j)$	..	$v_n(g_n)$

**Figure. 47** Matrice de décision

**-Etape 2 :** Construire des fonctions de valeur partielle pour chaque critère (traduire le tableau multicritère en utilisant les valeurs).

	$v_1(g_1)$	$v_j(g_j)$		$v_n(g_n)$
$a_1$	..	..	..	..
$a_i$	..	$v_j(g_j(a_i))$	..	..
	..	..	..	..
$a_m$	..	..	..	..

**Figure. 48** Matrice des fonctions de valeur partielle

**- Etape 3 :** Établir les poids des critères.

**- Etape 4 :** Calculer l'évaluation globale pour chaque action en utilisant une forme d'agrégation appropriée  $v [g_1(a_i), \dots, g_n(a_i)] = f\{v_1[g_1(a_i)], \dots, v_n[g_n(a_i)]\}$

- **Etape 5** : Déterminer la meilleure action (l'action qui maximise la valeur  $V$  : celle qui a le plus grand score).

- **Etape 6** : Faire des analyses de sensibilité [GUITOUNI A. 2000].

La méthode MAVT est une procédure très exigeante de point de vue informationnel. Par ailleurs, la construction des fonctions de valeur n'est pas toujours une tâche évidente. La méthode MAVT exige une articulation a-priori des préférences, et une évaluation des actions sur des échelles cardinales (on utilise les loteries pour déterminer les fonctions de valeur). La construction de la fonction analytique  $V$  est une tâche ardue. L'exploitation de la forme additive n'est possible que sous des hypothèques très restrictives du point de vue théorique ([POMEROL J. et al 1993] , [ KEENEY R . et al 1976]). La structure de préférence utilisée dans la méthode MAVT est du type  $\{P,I\}$ . La méthode MAVT est partiellement compensatoire.

### - **La méthode MAUT : Multiple Attribute Utility Theory**

La méthode MAUT développée par [ KEENEY R . et al 1976] repose sur la même idée que la méthode MAVT. En revanche, elle s'applique dans le cas où les évaluations des actions par rapport aux attributs sont imprégnées d'incertitude (aléatoire). A ce moment, on parle de fonction d'utilité et non plus de fonction de valeur.

La méthode MAUT s'applique alors dans un contexte caractérisé par un ensemble d'actions explicite (fini), une articulation a priori des préférences, et un univers incertain (les évaluations des actions par rapport à chaque attribut sont incertaines).

La méthode MAUT repose sur la même idée que la méthode MAVT. En revanche, elle s'applique dans le cas où les évaluations des actions par rapport aux attributs sont imprégnées d'incertitude (aléatoire).

L'idée est assez simple, le décideur doit associer une utilité à chacune des actions considérées. Ainsi, l'utilité  $V_A(x_1, x_2, \dots, x_n)$  associé à l'action  $A$ , évalué sur les critères  $1, 2, \dots, n$ , peut se décomposer sous la forme :  $V_A(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n (x_i)$ , ( $V_i(x_i)$  étant l'utilité générée au vu du critère  $i$ , si l'action considérée à la performance  $x_i$ ), à condition que les critères considérés soient indépendants [ANANDA J. et al 2005].

Comme la méthode MAVT, la méthode MAUT est très exigeante d'un point de vue informationnel. Les fonctions d'utilité sont difficiles à concevoir. En outre, MAUT exige plusieurs vérifications telles que l'indépendance mutuelle au sens de l'utilité.

La méthode MAUT exige une articulation a-priori des préférences, et une évaluation des actions sur des échelles cardinales (on utilise les loteries pour déterminer les fonctions de

valeur). La structure de préférence est du type {P,I}. La méthode MAUT est partiellement compensatoire.

**- La méthode UTA : Utility Theory Additive**

La méthode UTA par JACQUET-LAGREZE ET SISKOS en 1982 se base sur l'idée suivante : nous supposons que le décideur connaît bien un sous ensemble d'actions  $A'$  ( $A' \subset A$ ). Nous cherchons à estimer la fonction d'utilité (ayant une forme additive) en s'approchant le plus possible des jugements portés par le décideur sur le sous-ensemble  $A'$ . Pour ce faire, on sélectionne un sous-ensemble  $A'$  ( $A' \subset A$ ) d'actions que le décideur connaît bien et on demande ensuite au décideur de :

- Classer les actions de  $A'$ ,
- Donner les critères significatifs  $1, 2, \dots, j, \dots, n$  ;
- Donner les évaluations des actions de  $A'$  par rapport aux critères  $1, 2, \dots, j, \dots, n$  (matrice des jugements), cette étape consiste à déterminer la fonction d'utilité totale qui colle le mieux avec les données (classement des actions et la matrice des jugements).

La fonction d'utilité obtenue peut être considérée comme une estimation, à un terme d'erreur près, de la vraie fonction d'utilité :

$$U(a_i) = \sum_{j=1}^n U'_j(e_{ij}) + \sigma(a_i)$$

Où :  $U'_j(e_{ij})$  désigne l'utilité de l'action  $a_i$  sur le critère  $j$ , et  $\sigma(a_i)$  désigne l'erreur associée à l'estimation de  $U_j(a_i)$ .

La méthode UTA s'applique en procédant comme suit :

**-Etape 1 :** Déterminer les évaluations extrêmes  $e^*_j$  et  $e_{j^*}$  et écrire les valeurs des actions de  $A'$  selon l'expression de  $U(a_i)$ .

**-Etape 2 :** Écrire la contrainte de normalisation des poids des critères

$$\sum_{j=1}^n U'(e^*_j) = 1$$

**-Etape 3 :** Diviser, pour chaque critère  $j$ , l'intervalle  $[e^*_j, e_{j^*}]$  en  $\alpha_j$  intervalles notés  $[e^l_j, e^{l+1}_j]$ , avec  $e^l_j = e_{j^*} + \frac{l-1}{\alpha_j} (e^*_j - e_{j^*})$ ,  $l = 1, 2, \dots, \alpha_j$ .

**-Etape 4 :** Appliquer la transformation ci-après

$U'_j(e^{l+1}_j) - U'_j(e^l_j) > 0, \forall j, l$  où  $[e^l_j, e^{l+1}_j]$  est un intervalle de valeurs de  $g_j$ . Ce qui revient à dire que les fonctions d'utilité partielle sont monotones.

**-Etape 5 :** Déterminer les valeurs  $U'_j(e^l_j)$  dans la méthode UTA, on détermine les  $U'_j(e^l_j)$  et on effectue des interpolations linéaires entre ces points. En d'autres termes, si

$Z_j \in [e^{l_j}, e^{l+1_j}]$ , on aura  $U'_j(Z_j) = U'_j(e^{l_j}) + \frac{z_j - e^{l_j}}{e^{l+1_j} - e^{l_j}} [U'_j(e^{l+1_j}) - U'_j(e^{l_j})]$

**-Étape 6 :** Formuler le problème sous la forme d'un programme linéaire en se basant sur l'ensemble  $A$ .

**-Étape 7 :** Résoudre le programme linéaire et appliquer la fonction d'utilité obtenue à l'ensemble des actions de  $A$  [BEUTHE M. et al 2000].

### **-La méthode AHP : Analytic Hierarchy Process**

La méthode «A.H.P» (analytic hierarchy process) développée par SAATY en 1980 ou encore "méthode hiérarchisation multicritères" ; est une méthode d'aide à la décision multicritère développée de "THOMAS SAATY" vers la fin des années 70, elle a été utilisée avec succès dans les domaines de planification telle que planification stratégique, choix de projet, choix d'équipement, choix d'investissement... [AZZABI. L et al 2007 b].

Cette méthode part des matrices de comparaisons binaires pour arriver après des étapes à évaluer un vecteur de poids qui nous permet de comparer le choix de notre problème de décision.

La méthode AHP consiste à représenter un problème de décision par une structure hiérarchique reflétant les interactions entre les divers éléments du problème, à procéder ensuite à des comparaisons par paires des éléments de la hiérarchie, et enfin à déterminer les priorités des actions. Les étapes de la méthode AHP sont comme suit :

**-Étape 1 :** Construction de la matrice carrée  $U = (u_{ij})$  d'ordre  $m$  si les entités comparées sont des critères, ou d'ordre  $n$  si les entités comparées sont des alternatives.

Cette matrice des jugements par paires d'entités doit être positive et vérifier la condition de réciprocité. C'est-à-dire qu'on doit avoir [SAATY T. 2007]:

$$u_{ij} > 0 \text{ et } u_{ij} \cdot u_{ji} = 1.$$

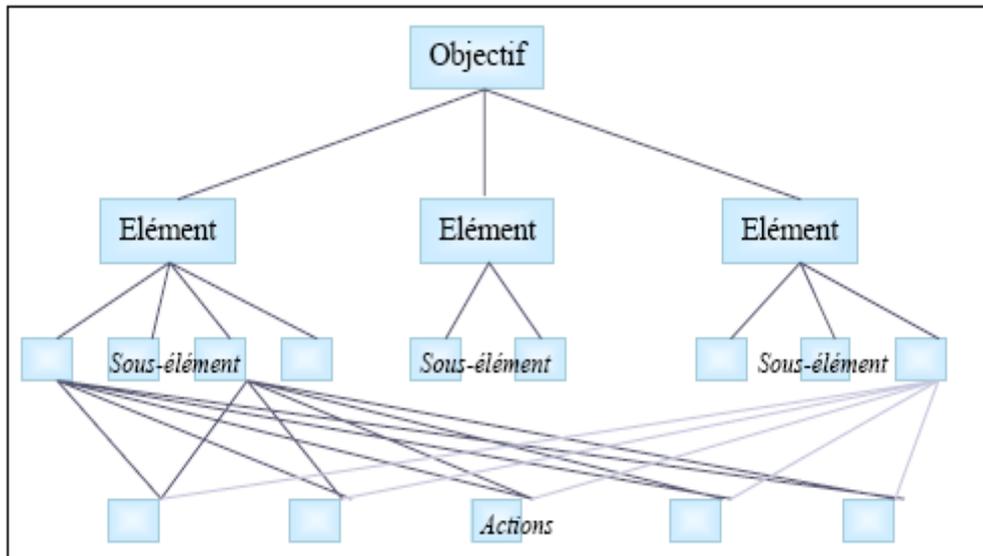


Figure. 49 Structure hiérarchique d'un problème selon la méthode AHP

**-Étape 2 :** Procéder à des comparaisons par paires des éléments de chaque niveau hiérarchique par rapport à un élément du niveau hiérarchique supérieur. Cette étape permet de construire des matrices de comparaisons. Les valeurs de ces matrices sont obtenues par la transformation des jugements en valeurs numériques selon l'échelle de Saaty (Echelle de comparaisons binaires), tout en respectant le principe de réciprocity [AZZABI. L et al 2008 d].

Déterminons ainsi la priorité relative  $w_i$  de chaque entité mesurée selon l'échelle de ratio, en calculant le vecteur propre de la matrice  $\mathbf{U} = (u_{ij})$  par la résolution du système :

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n u_{ij} w_j = \lambda_{\max} w_i \text{ pour } i=1, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n w_i = 1 \end{cases}$$

Degree d'importance	Definition	Explication
1	Importance égale des deux éléments	Deux éléments contribuent à la propriété
3	Faible importance d'un élément par rapport à un autre	L'expérience et l'appréciation personnelle favorisent légèrement un élément à un autre
5	Importance forte ou déterminante d'un élément par rapport à autre	L'expérience et l'appréciation personnelle favorisent fortement un élément à un autre
7	Importance attestée d'un élément par rapport à un autre	un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique
9	Importance absolue d'un élément par rapport à un autre	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible
2,4,6,8	Valeurs intermédiaires entre deux valeurs voisines	un compromise est nécessaire entre deux appréciations
réciprocité	Si l'élément i se voit attribuer l'un des chiffres précédents lorsque elle est comparée à l'élément j, j aura donc la valeur inverse lorsque on la compare à i	

**Tableau. 8** Echelle de Saaty [SAATY T. 2003]

**-Etape 3 :** Déterminer l'importance relative des éléments en calculant les vecteurs propres correspondants aux valeurs propres maximales des matrices de comparaisons.

**-Etape 4 :** La validité de l'estimation des priorités  $w_i$  dépend du degré de consistance de la matrice des jugements par paires. Pour vérifier cette consistance, on applique la démarche suivante :

(1) Calcul de l'indice de cohérence  $C.I.$  en utilisant successivement les relations :

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ij} w_j$$

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

(2) Détermination du coefficient  $\alpha$  par la lecture de la table des ratios aléatoires à l'aide du nombre d'entités  $n$ .

(3) Détermination du ratio de cohérence  $C.R.$  en utilisant la relation :

$$C.R. = \frac{C.I.}{\alpha}$$

Si  $C.R. > 0.10$  alors il est nécessaire d'ajuster les jugements en procédant à une nouvelle consultation du décideur et des experts.

Si  $0 < C.R. \leq 0.10$  les ajustements à apporter aux jugements seraient faibles par rapport aux composantes réelles du vecteur propre  $w$ . Dans ce cas on conclut à la validité du classement obtenu.

Si  $C.I. = 0$ , donc  $C.R. = 0$ , du fait que  $\lambda_{\max} = n$ , alors les jugements sont totalement consistants et le classement obtenu peut être adopté. Néanmoins et dans tous les cas, seule l'analyse de sensibilité peut apporter une confirmation définitive de la validité du classement.

Si on se situe au Niveau 1, répéter le Bloc de calcul des priorités pour chaque critère sur la base des comparaisons par paires des alternatives [AZZABI L. et al 2010].

$n$ (alternatives)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ratio de consistance aléatoire ( $\alpha$ )	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

**Tableau. 9 Ratios aléatoires**

Ainsi les points forts de la méthode AHP sont la modélisation du problème de décision par une structure hiérarchique et l'utilisation d'une échelle sémantique pour exprimer les préférences du décideur [AYADI. D et al 2008 b]. Bien qu'elle soit très populaire, la méthode AHP a fait l'objet de plusieurs critiques :

- Un grand nombre d'éléments dans le problème de décision fait exploser le nombre de comparaisons par paires.
- Le problème de renversement de rang (deux actions peuvent voir leur ordre de priorité s'inverser suite à une modification (ajout ou suppression d'une ou de plusieurs actions) de l'ensemble des actions.
- L'association d'une échelle numérique à l'échelle sémantique est restrictive et introduit des biais. La méthode AHP a fait l'objet de plusieurs extensions telles que la prise en compte de l'incertitude (AHP stochastique) et du flou (AHP flou) dans l'expression des jugements [AZZABI L. et al 2008 b].

**- La méthode EVAMIX : EVALuation of MIXed Criteria**

La méthode EVAMIX développée par VOOGD 1983 représente les évaluations ordinales et cardinales. Afin d'évaluer une action par rapport à une autre, on calcule deux indices de

dominance, le premier pour les évaluations ordinales et le second pour les évaluations cardinales. Ces deux indices sont par la suite normalisés puis combinés pour donner une mesure globale de la dominance. Enfin, un score global par action est calculé, ce qui permettra de classer les actions.

**-Etape 1 :** Calculer les indices de dominance (de l'action  $i$  par rapport à l'action  $k$ )  $\alpha_{ik}$  et  $\beta_{ik}$  respectivement pour les attributs ordinaux ( $O$ ) et cardinaux ( $C$ ).

$$\begin{cases} \alpha_{ik} = \sqrt[p]{\sum_{j \in O} [\pi_j \cdot v(e_{ij}, e_{kj})]^p} \\ \beta_{ik} = \sqrt[p]{\sum_{j \in C} [\pi_j \cdot v(e_{ij}, e_{kj})]^p} \end{cases}, \text{ avec } v(e_{ij}, e_{kj}) = \begin{cases} 1, \text{ si } e_{ij} > e_{kj} \\ 0, \text{ si } e_{ij} \approx e_{kj} \\ -1, \text{ si } e_{ij} < e_{kj} \end{cases}$$

**-Etape 2 :** Normaliser les indices de la manière suivante :

$$\begin{cases} \delta_{ik} = \frac{\alpha_{ik}}{\sum_i \sum_k |\alpha_{ik}|} \\ \mu_{ik} = \frac{\beta_{ik}}{\sum_i \sum_k |\beta_{ik}|} \end{cases}$$

**-Etape 3 :** Calculer la dominance  $D_{ik}$  globale de l'action  $i$  par rapport à l'action  $k$ . C'est simplement la somme pondérée des indices de dominance normalisés.

$$D_{ik} = \delta_{ik} \cdot \sum_{j \in O} \pi_j + \mu_{ik} \sum_{j \in C} \pi_j$$

**-Etape 4 :** Calculer le score global par action comme suit :

$$D_i = \sum_{k=1; k \neq i}^n D_{ik}$$

Où  $n$  est le nombre d'actions, et  $D_i$  permet de ranger les actions [VOOGD H. 1983].

### **2.3 .2 Les méthodes de l'approche de surclassement :**

#### **-Les méthodes PROMETHEE: Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation**

Le principe de la méthode PROMETHEE développées par [BRANS J P. et al 1986] consiste à établir un processus de comparaison numérique de chaque action par rapport à toutes les autres actions. Ainsi il est possible de calculer le plus (mérite) ou le moins (démérite) de chaque action par rapport à toutes les autres.

Le résultat de cette comparaison permet le classement ordonné des actions.

La mise en oeuvre de la méthode peut être ramenée à l'exécution des trois étapes suivantes:

**-Etape 1 :** Choix de critères généralisés A chaque critère  $C_1, C_2, \dots, C_m$  sera associé un critère généralisé choisi sur base d'une fonction de préférence et les effets d'échelle seront éliminés.

**-Etape 2 :** Détermination d'une relation de surclassement. Dans une deuxième phase, il convient de déterminer une relation de surclassement par le biais d'un indice de préférence (par exemple: l'écart maximum entre 2 actions) qui quantifiera les préférences du décideur.

**-Etape 3 :** Evaluation des préférences L'évaluation de la préférence du décideur par la prise en compte des flux entrant et sortant [AYADI. D et al 2010].

*-Choix des fonctions de préférence*

Rappelons que le contexte de mise en œuvre de la suite PROMETHEE nécessite la disposition de poids de l'importance relative et d'une fonction de préférence, attachés à chaque critère, et que nous avons formalisés de la sorte :

- $\{w_k\}_{k=1\dots m}$  désigne le vecteur des poids relatifs des critères, avec :  $w_k \geq 0$  et  $\sum_{k=1}^m w_k = 1$ .
- $\{f_k\}_{k=1\dots m}$  désigne le vecteur des fonctions de préférence du décideur, individu ou groupe d'individus.

Dans le cas de PROMETHEE,  $f_k$  est une fonction croissante des écarts de jugement. Si  $(A_i, A_j)$  désigne une paire d'alternatives,  $x_{ij}^k = V_{ik} - V_{jk}$  et  $f_k(x_{ij}^k)$  désigne la mesure de la préférence du décideur, de l'alternative  $A_i$  par rapport à l'alternative  $A_j$ , alors la fonction  $f_k(x_{ij}^k)$  est parfois représentée de façon commode par  $f_k(A_i, A_j)$  et vérifie :  $0 \leq f_k(x_{ij}^k) \leq 1, \forall k$  ; avec comme cas particuliers :

-Si  $f_k(A_i, A_j) = 0$  alors il n'existe pas de préférence de  $A_i$  sur  $A_j$  ;

-Si  $f_k(A_i, A_j) = 1$  alors  $A_i$  est préférée à  $A_j$  ; i.e.  $A_i \succ A_j$ .

Les cinq formes standards que peut prendre la fonction de préférence sont décrites ci-dessous, étant entendu que le décideur est libre de choisir une autre forme plus conforme à son système de valeurs, à condition qu'elle soit croissante en  $x_{ij}^k$  [AZZABI L. et al 2009 a].

- *Forme 1 : Vrai-critère*

Il s'agit du critère au sens classique, puisque aucun paramètre supplémentaire n'est exigé en dehors des poids. L'indifférence entre  $A_i$  et  $A_j$  est vérifiée dès que  $x_{ij}^k = 0$ , et les situations de préférence de l'une sur l'autre quand  $x_{ij}^k \neq 0$ .

Dans ce cas, on a :

$$f_k(x_{ij}^k) = \begin{cases} 0 & \forall x_{ij}^k \leq 0 \\ 1 & \forall x_{ij}^k > 0 \end{cases}$$

- *Forme 2 : Quasi-critère*

La construction de la fonction de préférence exige l'introduction d'un seuil qui détermine l'intervalle d'indifférence, le domaine de préférence stricte et permet d'établir un ordre partiel sur l'ensemble des alternatives. Bien que considéré comme un simple paramètre, ce seuil est semblable au seuil d'indifférence tel que défini pour ELECTRE.

Dans ces conditions, on a :

$$f_k(x_{ij}^k) = \begin{cases} 0 & \forall x_{ij}^k \leq S_k \\ 1 & \forall x_{ij}^k > S_k \end{cases}$$

- *Forme 3 : Fonction de préférence linéaire*

Cette forme repose sur l'hypothèse que le décideur, dans certains cas, considère que sa préférence croît progressivement jusqu'à atteindre une certaine valeur  $S_k$  à partir de laquelle, elle devient stricte.

Autrement dit :

$$f_k(x_{ij}^k) = \begin{cases} \frac{x_{ij}^k}{S_k} & \text{pour } x_{ij}^k \leq S_k \\ 1 & \text{pour } x_{ij}^k \geq S_k \end{cases}$$

- *Forme 4 : Critère de niveau*

Cette quatrième forme des fonctions de préférence suggère l'introduction de deux paramètres  $S_k$  et  $P_k$  qui établissent deux niveaux de préférence et bien sûr un niveau d'indifférence. Cela nous rappelle le système de préférences associé à un pseudo-critère tel que défini dans ELECTRE et qui introduit une zone de préférence faible entre l'indifférence et la préférence stricte. Mais ici, la préférence faible est considérée comme une *intensité* et non comme une zone tampon perçue comme marquant un flottement entre les deux.

Au plan formel, l'expression de la fonction de préférence associée à un critère de niveau est :

$$f_k(x_{ij}^k) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{pour } x_{ij}^k \leq S_k \\ \frac{1}{2} & \text{pour } S_k < x_{ij}^k \leq S_k + P_k \\ 1 & \text{pour } x_{ij}^k > S_k + P_k \end{array} \right\}$$

- *Forme 5 : Fonction de préférence linéaire combinée à une zone d'indifférence.*

Globalement, c'est une extension de la forme 4, qui prévoit que dans l'intervalle séparant les deux seuils  $S_k$  et  $P_k$ , la fonction de préférence est linéaire et croît progressivement jusqu'à atteindre la somme des deux seuils.

Cette propriété se traduit par la formulation :

$$f_k(x_{ij}^k) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{pour } x_{ij}^k \leq S_k \\ \frac{x_{ij}^k - P_k}{P_k} & \text{pour } S_k \leq x_{ij}^k \leq S_k + P_k \\ 1 & \text{pour } x_{ij}^k \geq S_k + P_k \end{array} \right\}$$

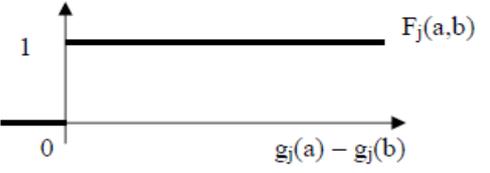
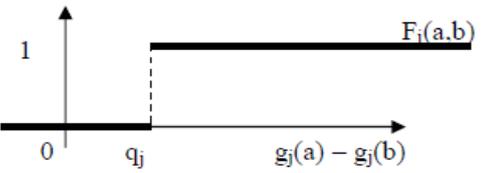
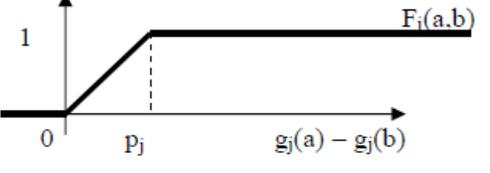
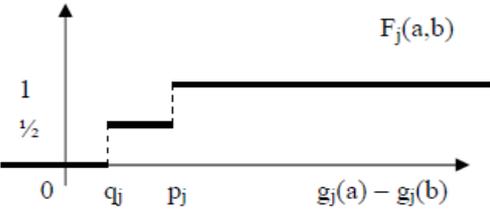
- *Forme 6 : Critère gaussien*

La fonction de préférence est de type gaussien et croît avec l'écart de jugement.

$$f_k(x_{ij}^k) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{pour } x_{ij}^k \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{x_{ij}^k}{2\sigma^2}} & \text{pour } x_{ij}^k \geq 0 \end{array} \right\}$$

La valeur de  $\sigma$  en Statistiques représente la distance entre l'origine et le point d'inflexion de la courbe de Gauss. Dans ce cas précis, elle est fixée par le décideur. Tous les seuils, ainsi que le paramètre  $\sigma$  sont considérés comme constants dans PROMETHEE [AZZABI L. et al 2009 b].

Les types de fonction de préférence utilisés sont donnés ci après :

<p><b>1<sup>ère</sup> forme : Vrai-critère</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Préférence stricte immédiate.</li> <li>• Pas de paramètres à déterminer.</li> </ul> $F_j(a,b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_j(a) > g_j(b) \\ 0 & \text{si } g_j(a) \leq g_j(b) \end{cases}$
<p><b>2<sup>ème</sup> forme : Quasi-critère</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Il existe un seuil d'indifférence (quasi-critère) qui doit être fixé.</li> </ul> $F_j(a,b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_j(a) - g_j(b) > q_j \\ 0 & \text{si } g_j(a) - g_j(b) \leq q_j \end{cases}$
<p><b>3<sup>ème</sup> forme : Pré-critère</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La préférence croit jusqu'à un seuil de préférence qui doit être fixé.</li> </ul> $F_j(a,b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_j(a) - g_j(b) > p_j \\ \frac{g_j(a) - g_j(b)}{p_j} & \text{si } 0 < g_j(a) - g_j(b) \leq p_j \\ 0 & \text{si } g_j(a) - g_j(b) \leq 0 \end{cases}$
<p><b>4<sup>ème</sup> forme : Pseudo-critère 1</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Il existe un seuil d'indifférence et un seuil de préférence à fixer (pseudo-critère); entre les deux, la préférence est moyenne.</li> </ul> $F_j(a,b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_j(a) - g_j(b) > p_j \\ \frac{1}{2} & \text{si } q_j < g_j(a) - g_j(b) \leq p_j \\ 0 & \text{si } g_j(a) - g_j(b) \leq q_j \end{cases}$

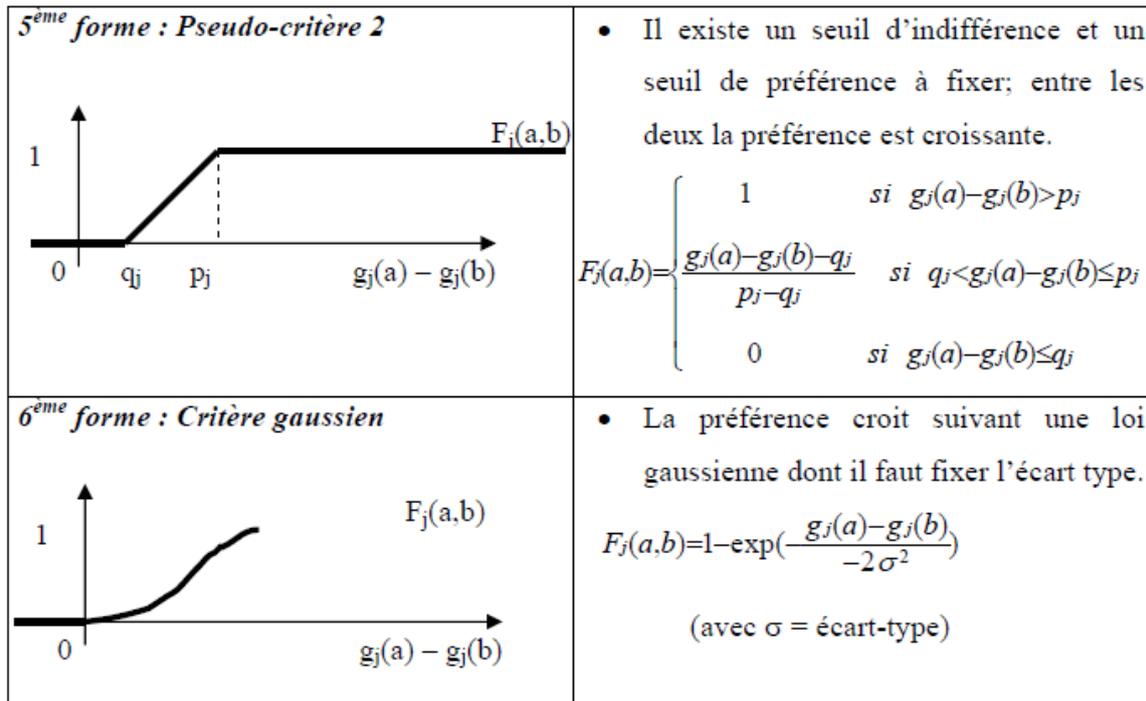


Figure. 50 Différents types de critères [VINCKE P. 1989]

La fonction type I est généralement employée lorsque les données présentent un caractère discret tel un classement ou ordinal ou encore une valeur de type tout ou rien.

La fonction type II est employée lorsque les seuils d'indifférence sont clairement apparents dans les données du problème posé.

La fonction type III est généralement employée lorsque les données sont telles que les écarts entre elles présentent un caractère continu, ou encore lorsque toutes les valeurs intermédiaires entre les valeurs maximales et minimales de ces écarts sont possibles.

La fonction type IV est parfois employée dans des cas d'espèce, en particulier lorsqu'on peut affirmer qu'un candidat n'est à la fois ni strictement préféré à un autre, ni indifférent. Ce candidat caractérisé par un écart donné par rapport à un autre se verra attribuer 1/2 point.

La fonction type V est employée lorsque les seuils d'indifférence et de préférence stricte sont clairement apparents dans les données du problème multicritère posé.

La fonction type VI (distribution gaussienne) est la fonction la plus employée dans les applications pratiques et est particulièrement indiquée en cas d'un nombre de candidats suffisamment élevé (en principe minimum 30). Dans ce cas il convient de calculer l'écart type  $\sigma$  de cette distribution.

Description de la procédure :

**-Étape 1 :** Détermination des matrices des préférences

$$F^k = \{f_{ij}^k\}_{k=1\dots m} \quad \text{et} \quad f_{ij}^k = f_k(x_{ij}^k) \quad \text{pour} \quad (i=1,\dots,n; j=1,\dots,n; k=1,\dots,m)$$

**-Étape 2 :** Détermination des vecteurs des puissances et des faiblesses des alternatives

Puissance de l'alternative  $A_i$  :

$$\phi_i^+ = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij}^k \cdot w_k$$

Faiblesse de l'alternative  $A_i$  :

$$\phi_i^- = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ji}^k \cdot w_k$$

Aller à l'Étape 5, Pas (1)

**-Étape 3 :** Détermination de la matrice des flux nets partiels

Il est possible de définir un *flux net partiel*  $\phi_i^k$  de l'alternative  $A_i$  pour le critère  $C_k$  qui peut servir à la conduite d'analyses par critère, via, par exemple, de représentations graphiques, mais aussi pour déterminer autrement les flux nets agrégés.

$$\phi_i^k = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n \{f_{ij}^k - f_{ji}^k\}$$

Aller à l'Étape 5, Pas (3) ou continuer.

**-Étape 4 :** Détermination du vecteur des flux nets agrégés

Le flux net agrégé associé à l'alternative  $A_i$  est déterminé directement à partir de sa puissance et sa faiblesse ou en passant par la somme pondérée des flux nets partiels.

$$(1) \phi_i = \phi_i^+ - \phi_i^-$$

$$(2) \phi_i = \sum_{k=1}^m \phi_i^k \cdot w_k$$

**-Étape 5a :** Formation des classements PROMETHEE I

Formation du classement par puissance décroissante  $Z_1$  et du classement par faiblesse croissante  $Z_2$ .

Le classement final  $Z$  est obtenu par l'intersection de  $Z_1$  et  $Z_2$  :  $Z = Z_1 \cap Z_2$ .

C'est-à-dire que si une relation entre  $A_i$  et  $A_j$  (indifférence ou préférence) est vraie dans  $Z_1$  et  $Z_2$ , elle est vraie aussi dans  $Z$ . Si ce n'est pas le cas,  $A_i$  et  $A_j$  sont incomparables.

On peut aussi utiliser la procédure de synthèse de deux classements pour déterminer un pré ordre partiel et un pré ordre total. Le *pré ordre partiel* obtenu  $Z$  permet de mettre en évidence

des relations d'indifférence, de préférence stricte et d'incomparabilité, par paire d'alternatives [AZZABI L. et al 2008 a].

*Etape 5b : Formation des classements PROMETHEE II*

Formation du classement final par flux net agrégé décroissant.

Le pré ordre complet obtenu met en évidence l'indifférence et la préférence stricte par paire d'alternatives :

- Indifférence :  $A_i = A_j \Rightarrow \Phi_i = \Phi_j$
- Préférence stricte :  $A_i > A_j \Leftrightarrow \Phi_i > \Phi_j$

Analyse du couple  $(A_i, C_k)_{i=1\dots n; k=1\dots m}$

Représentation du profil de chaque alternative  $g_i(C_k, \phi_i^k)$  et analyse de performance.

Les méthodes PROMETHEE sont faciles et compréhensibles par l'utilisateur. D'autres variantes des méthodes PROMETHEE ont déjà vu le jour : PROMETHEE III (conduit à un ordre d'intervalle), PROMETHEE IV (Lorsque l'ensemble des solutions admissibles est un continuum) et enfin PROMETHEE V (cette méthode a été conçue pour des choix multicritères avec contraintes de segmentation).

**-Les méthodes ELECTRE : ÉLImination Et Choix Traduisant la REalité**

- **ELECTRE I** : La procédure d'exploitation multicritère ELECTRE I, dans sa version initiale, est fondée sur deux notions de base : l'indice de concordance et l'indice de discordance. Si on considère l'hypothèse « l'alternative  $A_i$  surclasse l'alternative  $A_j$  », c'est-à-dire que  $A_i$  est au moins aussi bonne que  $A_j$ , on dit qu'un critère est *concordant* s'il vérifie cette hypothèse, sinon on dit qu'il est *discordant*.

Dans ces conditions la validité de l'hypothèse de surclassement est caractérisée par l'importance des critères concordants par rapport aux critères discordants, ce que vise la détermination des indices [AYADI D. et al 2008 c].

- **Etape 1** : Calculer L'indice de concordance

A chaque couple d'actions  $(a_i, a_k)$ ; on associe l'indice de concordance suivant :

$$C(a_i, a_k) = \sum_{j: (a_j \succeq a_k)} \pi_j \quad \text{avec} \quad \sum_{j=1}^n \pi_j = 1$$

- **Etape 2** : Calculer L'indice de discordance

A chaque couple d'actions  $(a_i, a_k)$ ; on associe l'indice de discordance suivant :

$$D(a_i, a_k) = \begin{cases} 0 & \text{si } \{j: e_{ij} < e_{kj}\} = \emptyset \\ \frac{1}{E} * \text{Max}_{\{j: e_{ij} < e_{kj}\}} |e_{kj} - e_{ij}| & \text{sinon} \end{cases}$$

Avec :  $E$  est l'étendue de la plus grande échelle associée à l'un des critères.

- **Etape 3** : Construire les relations de surclassement :

On conclut au surclassement de  $a_k$  par  $a_i$  si un test de concordance et un test de non discordance sont satisfaits :

$$\text{si } (C(a_i, a_k) \geq c) \text{ et } D(a_i, a_k) \leq d \Leftrightarrow a_i S a_k$$

Si l'un ou l'autre des tests ou les deux ne sont pas satisfaits, on se trouve dans une situation d'incomparabilité.

$$\text{si } (C(a_i, a_k) \leq c) \text{ ou } D(a_i, a_k) \geq d \Leftrightarrow a_i R a_k$$

$c$  : est le seuil de concordance : il est relativement grand.  $c \in [1/2, 1]$

$d$  : est le seuil de discordance : il relativement petit.

- **Etape 4** : Exploiter les relations de surclassement :

Cette étape consiste à déterminer le sous-ensemble d'actions  $N$  appelé noyau tel que toute action qui n'est pas dans  $N$  est surclassée par au moins une action de  $N$  et les actions de  $N$  sont incomparables entre elles.

- **ELECTRE II** : La méthode Electre II utilise le même indice de concordance que Electre I. Toutefois, on associe trois seuils à cet indice ( $0.5 < c_3 < c_2 < c_1 \leq 1$ ). L'indice de discordance ne change pas non plus dans sa définition (Electre I), mais on le calcule pour chaque critère discordant, et on lui donne 2 seuils (2 seuils par critère :  $0 < d_{j1} < d_{j2} < E_j$ ) [TAYEB L. et al 2008].

La méthode Electre II se présente comme suit :

On attribut à chaque critère  $j$ , un poids  $\pi_j$  d'autant plus grand que le critère est important.

- **Etape 1** : Calculer les indices de concordance

A chaque couple d'actions  $(a_i, a_k)$ ; on associe l'indice de concordance suivant :

$$C(a_i, a_k) = \sum_{j: (e_{ij} > e_{kj})} \pi_j \quad \text{avec } \sum_{j=1}^n \pi_j = 1$$

- **Etape 2 :** Calculer les indices de discordance

A chaque couple d'actions  $(a_i, a_k)$ ; et pour tout critère  $j$ , on associe l'indice de discordance suivant :

$$D_j(a_i, a_k) = \begin{cases} 0 & \text{si } e_{ij} \geq e_{kj} \\ e_{kj} - e_{ij} & \text{si } e_{ij} < e_{kj} \end{cases}$$

- **Etape 3 :** Construire les relations de surclassement :

On conclut au surclassement fort de  $a_k$  par  $a_i$  ( $a_i S^F a_k$ ) si un test de concordance et un test de non discordance sont satisfaits :

$$\text{si } \left( \frac{\sum_{j:\Delta_j>0} \pi_j}{\sum_{j:\Delta_j<0} \pi_j} \right) > 1 \text{ et } \begin{cases} \text{si } (C(a_i, a_k) \geq c_1) \text{ et } (D(a_i, a_k) \leq d_{j2} \quad \forall j) \\ \text{ou} \\ \text{si } (C(a_i, a_k) \geq c_2) \text{ et } (D(a_i, a_k) \leq d_{j1} \quad \forall j) \end{cases} \Leftrightarrow a_i S^F a_k$$

On conclut au surclassement faible de  $a_k$  par  $a_i$  ( $a_i S^f a_k$ ) si les tests de concordance et de non discordance suivants sont satisfaits :

$$\text{si } \left( \frac{\sum_{j:\Delta_j>0} \pi_j}{\sum_{j:\Delta_j<0} \pi_j} \right) > 1 \text{ et si } (C(a_i, a_k) \geq c_3) \text{ et } (D(a_i, a_k) \leq d_{j2} \quad \forall j) \Leftrightarrow a_i S^f a_k$$

Si aucun des deux tests précédents n'est satisfait, alors on conclut à l'incomparabilité des actions  $a_i$  et  $a_k$  ( $a_k R a_i$ ).

- Etape 4 :** Exploiter les relations de surclassement :

On établit deux pré-ordres totaux  $P_1$  et  $P_2$ , ainsi qu'un pré-ordre partiel  $P$ .

- Le premier pré-ordre total  $P_1$  est obtenu par « classement direct » en utilisant uniquement les surclassements forts : la première classe est celle des actions non surclassées : c'est à dire celles auxquelles aboutit un chemin de longueur nulle. La deuxième classe est celle des actions auxquelles aboutit un chemin de longueur 1, et ainsi de suite.
- Le second pré-ordre  $P_2$  est obtenu par « classement inverse » : on classe cette fois les actions en fonction de la longueur des chemins – toujours en surclassement fort- qui en sont issus. On utilise ensuite les surclassements faibles pour départager les actions à l'intérieur des classes.

- Le pré-ordre  $P$  est l'intersection de  $P_1$  et  $P_2$ .

- **ELECTRE III** : On attribut à chaque critère  $j$ , un poids  $\pi_j$  d'autant plus grand que critère est important [TAYEB L. et al 2008].

La méthode Electre III se distingue des méthodes Electre I et II par l'exploitation de pseudo-critères : on peut alors se trouver dans une situation d'indifférence, de préférence faible ou de préférence stricte lors de la comparaison des écarts de préférence de deux actions selon un critère.

- **Etape 1** : Calcul de l'indice de concordance

$$C(a_i, a_k) = \sum_{j=1}^n \pi_j \cdot \delta_j(a_i, a_k) \quad \text{où} \quad \delta_j(a_i, a_k) = \begin{cases} 1 & \text{si} \quad -q_j \leq \Delta_j \\ \frac{\Delta_j + p_j}{p_j - q_j} & \text{si} \quad -p_j < \Delta_j < -q_j \\ 0 & \text{si} \quad \Delta_j \leq -p_j \end{cases}$$

Avec :  $\Delta_j = e_{ij} - e_{kj}$  et  $q_j, p_j$  sont les seuils de discrimination.

- **Etape 2** : Calcul de l'indice de discordance (par critère)

$$D_j(a_i, a_k) = \begin{cases} 0 & \text{si} \quad -p_j \leq \Delta_j \\ \frac{\Delta_j + p_j}{v_j - p_j} & \text{si} \quad -v_j < \Delta_j < -p_j \\ 1 & \text{si} \quad \Delta_j \leq -v_j \end{cases}$$

Avec :  $v_j$  étant le seuil de veto du critère  $j$ .

- **Etape 3**: Déterminer les degrés de crédibilité des surclassements :

$$\sigma(a_i, a_k) = \begin{cases} C(a_i, a_k) & \text{si} \quad D_j(a_i, a_k) \leq C(a_i, a_k) \quad \forall j \\ C(a_i, a_k) \cdot \prod_{j: D_j(a_i, a_k) > C(a_i, a_k)} \frac{1 - D_j(a_i, a_k)}{1 - C(a_i, a_k)} & \text{si} \quad \exists j: D_j(a_i, a_k) > C(a_i, a_k) \end{cases}$$

Cette étape nous permet de déterminer des relations de surclassement valuées  $\in [0,1]$ , pour toute paire d'actions  $(a_i, a_k)$ .

- **Etape 4:** Exploiter les relations de surclassement :

Cette étape consiste à déterminer un rangement des actions. Pour ce faire, on joue sur le niveau de signification du degré de crédibilité et on procède à des distillations successives descendantes et ascendantes qui aboutissent à deux rangements (pré-ordre complet).

- **ELECTRE IS :** Les propriétés des critères comprennent les poids, un seuil de préférence, un seuil d'indifférence et un seuil de veto.

Les seuils peuvent varier le long de l'échelle des critères et on peut agir sur le seuil de veto pour augmenter ou diminuer l'importance de l'ensemble des critères concordants, qu'on désigne sous le vocable de « coalition concordante ».

La démarche de mise en œuvre d'ELECTRE IS est décrite ci-dessous.

- **Etape 1 :** Calcul de l'indice de concordance

$$C(a_i, a_k) = \sum_{j=1}^n \pi_j \cdot \delta_j(a_i, a_k) \quad \text{où} \quad \delta_j(a_i, a_k) = \begin{cases} 1 & \text{si} \quad -q_j \leq \Delta_j \\ \frac{\Delta_j + p_j}{p_j - q_j} & \text{si} \quad -p_j < \Delta_j < -q_j \\ 0 & \text{si} \quad \Delta_j \leq -p_j \end{cases}$$

Avec :  $\Delta_j = e_{ij} - e_{kj}$  et  $q_j, p_j$  sont les seuils de discrimination.

- **Etape 2 :** Calcul de l'indice de discordance

A chaque couple d'actions  $(a_i, a_k)$ ; on associe l'indice de discordance suivant :

$$D(a_i, a_k) = \begin{cases} 0 & \text{si} \quad \{j: e_{ij} < e_{kj}\} = \emptyset \\ \frac{1}{E} * \text{Max}_{\{j: e_{ij} < e_{kj}\}} |e_{kj} - e_{ij}| & \text{sinon} \end{cases}$$

$E$  est l'étendue de la plus grande échelle associée à l'un des critères.

- **Etape 3 :** Construire les relations de surclassement

$$\begin{cases} \text{si} & ( C(a_i, a_k) \geq c ) \text{ et } D_j(a_i, a_k) \leq ( v_j - D), \forall j ) & \Leftrightarrow (a_i S a_k) \\ \text{si non} & & \Leftrightarrow (a_i R a_k) \end{cases}$$

$$\text{avec } D = q_j * \frac{1 - C(a_i - a_k)}{1 - c}$$

- **Etape 4** : Exploiter les relations de surclassement : Cette étape consiste à déterminer le noyau du graphe de surclassement.
- **ELECTRE IV** : Les conditions d'application d'ELECTRE IV sont identiques à celles d'ELECTRE III à la différence près que cette méthode ne tient pas compte des poids des critères. Cela peut être très utile dans les cas où il n'est pas possible de les déterminer de façon relativement précise, ou lorsque le décideur ne souhaite pas faire une différenciation entre les critères en terme d'importance.

Il est clair qu'en l'absence des poids, on ne peut considérer l'indice de crédibilité tel qu'utilisé dans ELECTRE III, comme un moyen sûr de vérifier la solidité d'un surclassement, même en cherchant à attribuer aux critères des poids égaux à une certaine valeur, ce qui revient finalement à les intégrer dans le processus [TAYEB L. et al 2008].

La méthode Electre IV se présente comme suit :

**-Etape 1** : Évaluer toute paire d'actions selon chaque critère

Pour chaque paire d'actions confrontée au jugement d'un critère, on se demande simplement laquelle des deux actions est préférée à l'autre selon ce critère. C'est à ce niveau qu'interviennent les seuils  $(q_j, p_j, v_j)^4$ .

- **Etape 2**: Déterminer les relations de surclassement de toute paire d'actions.

- **Etape 3**: Exploiter les relations de surclassement [HAMMAMI A. 2003].

**- La méthode MACBETH : Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique**

La méthode MACBETH est une méthode multicritère de décision. Elle permet de traduire les jugements sémantiques énoncés par un décideur sur une échelle numérique à travers des comparaisons par des experts de différentes situations.

Le principe de la méthode est d'exploiter une expertise humaine sous forme de comparaisons. Par exemple, si l'expert préfère le choix A au choix B selon le critère i alors  $P_i^A > P_i^B$ . Cet ordre est transformé en informations quantitatives concernant les expressions de performances

( $P_i^A = \dots P_i^B = \dots$ ). Une démarche similaire est menée pour déterminer les poids  $W_i$  de la moyenne pondérée, sur la base de la comparaison de projets particuliers, comme nous le verrons ultérieurement [CLIVELLE V. et al 2006].

La méthode préconise une procédure structurée en 4 étapes principales schématisées dans la figure 57.

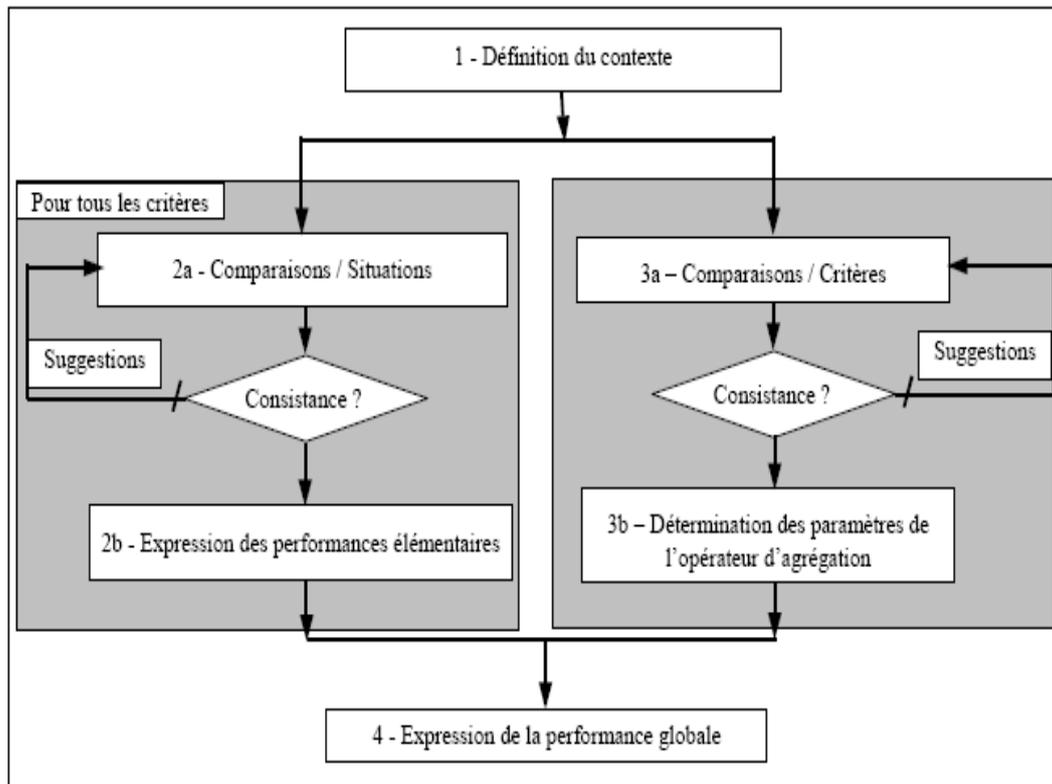


Figure. 51 La procédure MACBETH adaptée par [BANA E COSTA .CA et al 1999]

Après une définition du contexte où sont retenus les critères et les situations envisagées (étape 1), la méthode permet aux experts de définir en parallèle les vecteurs d'expressions élémentaires (étape 2) et les paramètres de l'opérateur d'agrégation (étape 3). Lorsque ces 2 types d'information sont disponibles, MACBETH fournit les expressions de performance correspondantes (étape 4). Les experts peuvent revenir sur leurs comparaisons si des contradictions sont détectées (consistance) ou si les résultats obtenus ne les satisfont pas [BANA E COSTA C. et al 2003].

La méthode MACBETH est en effet une procédure interactive qui consiste à demander au décideur de juger verbalement la différence d'attractivité entre deux actions  $x$  et  $y$  de  $S$  (avec  $x$  est plus attractive que  $y$ ) en utilisant les catégories sémantiques suivantes :

$C_0$	Différence d'attractivité <b>nulle.</b>
$C_1$	Différence d'attractivité <b>très faible.</b>
$C_2$	Différence d'attractivité <b>faible.</b>
$C_3$	Différence d'attractivité <b>modérée.</b>
$C_4$	Différence d'attractivité <b>forte.</b>
$C_5$	Différence d'attractivité <b>très forte.</b>
$C_6$	Différence d'attractivité <b>extrême.</b>

**Tableau. 10 Catégorie de jugement**

Durant ce processus interactif, une matrice de jugements catégoriques sera construite. Par exemple si le décideur évalue les 6 actions A, B, C, D, E et F selon le critère Qualité, on aura une matrice à l'image de celle présentée ci-dessous [CLIVELLE V. et al 2006].

Supposons que  $X = \{A, B, C, D, E, F\}$  et que **J** ait formulé les jugements suivants :

Qualité	A	B	C	D	E	F
<b>A</b>	<b>Nulle</b>	<b>Faible</b>	<b>Faible</b>	<b>Modérée</b>	<b>Modérée</b>	<b>Très forte</b>
<b>B</b>		<b>Nulle</b>	<b>Faible</b>	<b>Modérée</b>	<b>Extrême</b>	<b>Extrême</b>
<b>C</b>			<b>Nulle</b>	<b>Forte</b>	<b>Très forte</b>	<b>Extrême</b>
<b>D</b>				<b>Nulle</b>	<b>Très forte</b>	<b>modérée</b>
<b>E</b>					<b>Nulle</b>	<b>Très forte</b>
<b>F</b>						<b>Nulle</b>

**Tableau. 11 Matrice des jugements du décideur par rapport au critère qualité**

Les termes «faible » en ligne A – colonne B signifient que J a dit que A P (préféré) B.

Les termes « très forte » en ligne A – colonne F signifient que J a dit que A P F.

La méthode MACBETH traite des informations semblables à celles récapitulées à la matrice des jugements ci-dessus. Elle associe un score à chacune des actions et fait en sorte que la différence des scores des actions D et E est supérieure à la différence des scores des actions B et C. Par ailleurs, étant donnée la relation de préférence P et la matrice des jugements, MACBETH vérifie l'existence d'une échelle numérique  $\Phi$  sur S qui satisfait les deux conditions suivantes :

• **Condition 1 : (Condition ordinale)**

$$\forall x, y \in S : \Phi(x) > \Phi(y) \Leftrightarrow x \text{ est plus attractive que } y.$$

• **Condition 2 : (Condition sémantique)**

$\forall k, k'$  appartenant au tableau des catégories sémantique, et  $\forall$  le choix de décideur soit  $x, y, w, z$  avec le couple de choix  $(x, y)$  qui appartient à  $C_k$  (catégories sémantique), et le couple  $(w, z)$  qui appartient à  $C_{k'}$ (catégories sémantique), avec  $k \geq k' + 1$  ce qui signifie que la différence entre l'échelle numérique de  $x$  et de  $y$  soit supérieur à la différence entre l'échelle numérique de  $w$  et de  $z$ .

En résumé :  $\forall k, k' \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}, \forall x, y, w, z \in S$  avec  $(x, y) \in C_k$  et  $(w, z) \in C_{k'}$  :

$$k \geq k' + 1 \Rightarrow \Phi(x) - \Phi(y) > \Phi(w) - \Phi(z)$$

Si ces deux conditions ne sont pas satisfaites, alors les jugements sémantiques ne peuvent être représentés sur une échelle (intervalle) numérique. Dans ce cas, on dit que la matrice des jugements est incompatible avec la construction d'une échelle cardinale sur  $S$ . Les cas d'incompatibilité seront traités plus en détail au paragraphe intitulé « Traitement des cas d'incompatibilité ».

En revanche, si les conditions (1), (2) sont satisfaites, alors la matrice des jugements est dite consistante [AYADI. D et al 2009].

### 3. Procédure de choix d'une méthode d'aide à la décision multicritère (MADMC)

D'après l'étude des méthodes MADMC présentée aux paragraphes précédents, nous constatons que ces méthodes se différencient par la façon de modéliser les préférences du décideur, la décision de pondérer ou non les critères ainsi que les attentes du décideur relatives aux résultats de l'application d'une MADMC (rangement d'action, possibilité d'avoir des incomparabilités entre actions, ...).

Inputs	Outputs						
	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7
I1							
I2							
I3				ELECTRE IV			
I4							
I5							
I6							
I7							
I8							
I9							
I10							
I11							
I12							
I13							
I14							
I15							
I16							
I17				ELECTRE II	MACBETH	ELECTRE I	
I18			PROMETHEE II	PROMETHEE I			ELECTRE TRI
I19			EVAMIX	ELECTRE III		ELECTRE IS	
I20	MAUT TOPSIS		MAVT SMART UTA				
I21	AHP						
I22							
I23							

**Tableau. 12 Classification des MADMC selon la matrice inputs/outputs  
[HAMMAMI A. 2003]**

La description des différents inputs et outputs de la matrice ci-dessus dépasse le cadre de cette section. Nous nous limitons à expliciter les inputs et outputs correspondant à des cases pleines de la matrice.

### 3.1 Caractérisation des inputs

Inputs	Signification
I1	n structures $\{P_j, I_j\}$ <sup>5</sup> de préordres.
I3	n structures $\{P_j, I_j\}$ de semiordres et/ou structures $\{P_j, I_j, Q_j\}$ <sup>6</sup> de pseudo-ordres plus des seuils de véto $v_j$ .
I4	n fonctions d'utilité ( $u_j$ ) (d'utilité (valeur) partielle) exprimées sur des échelles intervalles.
I10	n structures $\{P_j, I_j\}$ de semiordres et/ou structures $\{P_j, I_j, Q_j\}$ de pseudo-ordres et une relation de préordre complet ( $\succ$ ) sur les attributs (critères).
I12	n fonctions d'utilité ( $u_j$ ) (d'utilité (valeur) partielle) exprimées sur des échelles intervalles et une relation de préordre complet ( $\succ$ ) sur les attributs.
I16	n structures $\{P_j, I_j\}$ de semiordres et/ou structures $\{P_j, I_j, Q_j\}$ de pseudo-ordres plus des seuils de veto $v_j$ définies sur des évaluations distributionnelles plus une relation de préordre complet ( $\succ$ ) sur les attributs.
I17	n structures $\{P_j, I_j\}$ de préordres plus un vecteur de coefficients d'importance relative ( $\Pi$ ) des attributs.
I18	n structures $\{P_j, I_j\}$ de semiordres et/ou structures $\{P_j, I_j, Q_j\}$ de pseudo-ordres plus un vecteur de coefficient d'importance relative ( $\Pi$ ) des attributs.
I19	n structures $\{P_j, I_j\}$ de semiordres et/ou structures $\{P_j, I_j, Q_j\}$ <sup>7</sup> de pseudo-ordres plus des seuils de veto $v_j$ plus un vecteur de coefficient d'importance relative ( $\Pi$ ) des attributs.
I20	n fonctions d'utilité ( $u_j$ ) (d'utilité (valeur) partielle) exprimées sur des échelles intervalles plus un vecteur de coefficient d'importance relative ( $\Pi$ ) des attributs.
I21	n fonctions d'utilité ( $u_j$ ) (d'utilité (valeur) partielle) exprimées sur des échelles ratios plus un vecteur de coefficient d'importance relative ( $\Pi$ ) des attributs.
I24	n structures $\{P_j, I_j\}$ de semiordres et/ou structures $\{P_j, I_j, Q_j\}$ de pseudo-ordres plus des seuils de veto $v_j$ définies sur des évaluations distributionnelles plus un vecteur de coefficient d'importance relative ( $\Pi$ ) des attributs.

Tableau. 13 Caractérisation des inputs [HAMMAMI A. 2003]

Avec :

<sup>5</sup>  $\{P_j$  : relation de préférence stricte,  $Q_j$  : relation de préférence faible,  $I_j$  : relation d'indifférence }

<sup>6</sup>  $\{P_j, I_j, Q_j\} \equiv \{ \succ, \sim, \succ^f \}$

<sup>7</sup>  $\{P_j, I_j, Q_j\} \equiv \{ \succ, \sim, \succ^f \}$

### 3.2 Caractérisation des outputs

Outputs	Signification
O1	<i>Évaluation globale</i> (un score global par exemple) : cette situation traduit la volonté de construire un critère unique de synthèse. Le score global est de niveau cardinal.
O2	<i>Un rangement global des actions en considérant un seuil d'indifférence</i> ( $\{>, \sim\}$ : une structure de semiordre total) : l'introduction de seuils permet d'introduire des nuances ou limiter certaines conclusions (de surclassement) par exemple.
O3	<i>Un rangement total des actions avec possibilité d'ex æquo</i> ( $\{>, \sim\}$ : une structure de préordre total) : l'objectif dans ce cas est souvent le rangement des actions de la meilleure à la moins bonne. Dans ce cas, toutes les actions sont comparables; il est possible de les discriminer.
O4	<i>Un rangement partiel des actions en considérant l'incomparabilité</i> ( $\{>, \sim, >^f, ?\}$ <sup>8</sup> : une structure de préordre partiel) : cet output reprend l'idée de l'output précédent tout en considérant qu'il est possible de ne pas pouvoir discriminer entre certaines actions : on accepte l'incomparabilité.
O5	<i>Choix de la meilleure action</i> ou d'une classe d'équivalence des meilleures actions.
O6	<i>Choix d'un sous-ensemble d'actions</i> parmi lesquelles se trouve(nt) la (les) meilleure(s) action(s).
O7	<i>Tri ordonné</i> : affecter les actions à des catégories pré-définies et ordonnées.

**Tableau. 14** Caractérisation des outputs [HAMMAMI. A 2003]

Avec :

<sup>8</sup>  $\{>, \sim, >^f, ?\}$  : {Préférence forte, Indifférence, Préférence faible, incomparabilité}

Les MADMC se différencient par les informations utilisées à l'entrée (Input) et les résultats obtenus à la sortie (Output). Ainsi, la définition des inputs et des outputs permet de classer les MADMC, ce qui aidera à la conception d'une procédure de choix d'une MADMC. En effet, cette idée est à la base de la classification des MADMC proposée dans [GUITOUNI A. et al 1999] et que nous retenons pour concevoir une procédure de choix d'une MADMC. [GUITOUNI A. et al 1999] ont défini 24 inputs et 7 outputs. Ce qui correspond à une matrice de taille (24 x 7). Les MADMC ont été placées dans les cases correspondantes de la matrice. [HAMMAMI A. 2003].

Dans [GUITOUNI A. et al 1999], trois relations de propagation ont été définies. Elles permettent de propager une MADMC qui se trouve dans une case à d'autres (Exemple : les méthodes TOPSIS et AHP ont été associées naturellement aux case (I20, O1) et (I21, O1). L'application d'une des relations de propagation a permis de placer ces méthodes respectivement dans les cases (I20, O3) et (I21, O3). Cette propagation s'explique par la raison suivante : rien n'empêche d'utiliser les scores obtenus par les actions pour faire un classement de ces mêmes actions). Cependant, même avec les relations de propagation, on ne peut propager une MADMC vers n'importe quelle position de la matrice.

### 3.3 Procédure de choix d'une méthode de sélection

Dans le Tableau 15, nous récapitulons les différences entre les méthodes d'optimisation mathématique et les méthodes d'aide à la décision multicritère, et ce afin de servir de base au développement d'une procédure de choix d'une méthode de sélection.

Les méthodes d'optimisation mathématique (MOM)	Les méthodes d'aide à la décision multicritère (MADMC)
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Il n'est pas nécessaire que les solutions soient connues a priori. Elles seront déterminées lors de l'application de ces méthodes et ce à l'étape de résolution.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ces méthodes s'appliquent à un ensemble de solutions (actions) connues a priori.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Le nombre de solutions peut être fini ou infini</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Le nombre de solutions est fini</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Les évaluations des actions doivent être cardinales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Les évaluations des actions peuvent être ordinales, cardinales ou mixtes.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tous les critères sont du type vrai critère</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Plusieurs types de critères peuvent être considérés (vrai critère, pseudo critère, quasi critère, ...)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dans leur version standard, ces méthodes ne traitent que les problèmes de choix. Toutefois, elles sont facilement adaptables pour traiter les problèmes de rangement ou de tri.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ces méthodes traitent des problèmes de choix, de rangement, et de tri</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Les préférences du décideur peuvent être exprimées a priori ou a posteriori et ce selon la méthode.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Les préférences du décideur peuvent être exprimées a priori ou a posteriori et ce selon la méthode.</li> </ul>

Tableau. 15 Tableau comparatif des MOM et des MADMC [HAMMAMI. A 2003]

De plus les MOM permettent la résolution et la sélection simultanément et les MADMC ne permettent que la sélection d'une solution parmi plusieurs.

Nous présentons ci après un synoptique pour la procédure proposée pour l'aide au choix d'une méthode de sélection.

Dans le cas où l'ensemble des actions est connu a priori, nous pouvons placer les méthodes mathématiques (nous considérons l'idée conceptuelle à la base de chacune des méthodes) dans la matrice des inputs/outputs présentée au paragraphe précédent.

Inputs	Outputs						
	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7
I21	-La méthode du critère global -La programmation mathématique à objectifs multiples -La méthode du $\epsilon$ - Constraint programming -La technique compromise programming -Le Goal Programming						

**Tableau. 16 Positionnement des méthodes d'optimisation mathématique sur la matrice inputs/outputs [HAMMAMI A. 2003]**

La classification des MADMC selon le couple (input / output) rend le choix plus facile à faire Il suffit de se placer dans la case correspondante pour savoir qu'elles sont les méthodes susceptibles d'être appliquées au problème. La question qui se pose dès lors sera la suivante : comment faire pour choisir, parmi plusieurs méthodes se trouvant dans une même case, la méthode que le décideur souhaiterait appliquer ? Pour répondre à cette question, nous étudions les cases regroupant plusieurs méthodes une à une. Les cases contenant des méthodes non explicitées dans ce rapport ne feront pas l'objet d'une étude même case [HAMMAMI A. 2003].

## 4. Critiques des méthodes d'aide à la décision multicritère et d'optimisation mathématique multicritère

Les méthodes d'aide à la décision multicritère et d'optimisation mathématique multicritère constituent chacune des avantages et des inconvénients dans leurs applications et diffère selon le besoin d'utilisation, cependant elles permettent tous d'aider le décideur à faire un choix judicieux et une meilleure sélection.

### 4.1 Avantages et inconvénients des méthodes d'aide à la décision multicritère

Méthodes	Avantages	Inconvénients
<b>TOPSIS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'apport de la méthode TOPSIS est l'introduction des notions d'idéal et d'anti-idéal.</li> <li>• Elle est facile à appliquer.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les attributs doivent être de nature cardinale, les préférences sont fixées a priori.</li> <li>• Si toutes les actions sont mauvaises, la méthode propose la meilleure action parmi les mauvaises.</li> </ul>
<b>SMART</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode SMART est facile à exploiter.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elle exige une articulation a-priori des préférences, et une évaluation des actions sur une échelle unique.</li> </ul>
<b>MAVT</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode MAVT est très pratique pour les problèmes d'aide à la décision, les problèmes d'économie, de finance et d'actuariat.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• C'est une procédure très exigeante de point de vue informationnel. Par ailleurs, la construction des fonctions de valeur n'est pas toujours une tâche évidente.</li> <li>• La construction de la fonction analytique V est une tâche ardue.</li> <li>• L'exploitation de la forme additive n'est possible que sous des hypothèques très restrictives du point de vue théorique.</li> </ul>
<b>MAUT</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode MAUT permet les évaluations des actions par rapport aux attributs qui sont imprégnées d'incertitude (aléatoire).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• C'est une procédure très exigeante de point de vue informationnel. Par ailleurs, la construction des fonctions de valeur n'est pas toujours une tâche évidente.</li> <li>• La construction de la fonction analytique V est une tâche ardue.</li> <li>• L'exploitation de la forme additive n'est possible que sous des hypothèques très restrictives du point de vue théorique.</li> </ul>
<b>UTA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dans UTA, les fonctions d'utilité partielles découlent toutes à la fois de la préférence globale exprimée par le décideur.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode UTA exige des données cardinales, une articulation a-priori des préférences, une famille de vrai-critères.</li> <li>• UTA exige l'indépendance au sens des préférences.</li> </ul>
<b>AHP</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• la méthode AHP permet la modélisation du problème de décision par une structure hiérarchique.</li> <li>• Elle utilise une échelle sémantique pour exprimer les préférences du décideur.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un grand nombre d'éléments dans le problème de décision fait exploser le nombre de comparaisons par paires.</li> <li>• Le problème de renversement de rang (deux actions peuvent voir leur ordre de priorité s'inverser suite à une modification (ajout ou suppression d'une ou de plusieurs actions) de</li> </ul>

		<p>l'ensemble des actions.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• L'association d'une échelle numérique à l'échelle sémantique est restrictive et introduit des biais.</li> </ul>
<b>EVAMIX</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode EVAMIX est facile à mettre en œuvre.</li> <li>- Elle a l'avantage de traiter les évaluations ordinales et cardinales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode EVAMIX exige une articulation a-priori des préférences, et une structure de préférence du type <math>\{P,I\}</math>.</li> </ul>
<b>PROMETHEE I</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode PROMETHEE I construit une relation de surclassement évaluée traduisant une intensité de préférence.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'indifférence est en pratique très rare vu les nombreux calculs pour obtenir les flux.</li> </ul>
<b>PROMETHEE II</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode PROMETHEE II construit un pré-ordre total excluant l'incomparabilité et réduisant fortement l'indifférence.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode PROMETHEE II apparaît clairement comme une méthode d'utilité, les comparaisons 2 à 2 ne servant qu'à masquer le calcul du score final <math>\Phi(a)</math> de chaque action.</li> </ul>
<b>PROMETHEE III</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode PROMETHEE III introduit des seuils d'indifférence sur les flux, ce qui minimise les nombreux calculs pour l'obtention de ces flux.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dans cette méthode les seuils d'indifférences n'ayant pas d'interprétation concrète pour le décideur, ils font l'objet de calculs statistiques qui rendent la méthode moins "accessible".</li> </ul>
<b>PROMETHEE IV</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode PROMETHEE IV a un intérêt plutôt théorique et concerne des ensembles infinis d'actions.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode nécessite le calcul d'intégrales au lieu de sommes.</li> </ul>
<b>ELECTRE I</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode ELECTRE I est utilisée pour des problématiques de sélection.</li> <li>• Elle introduit la notion de noyau qui permet de restreindre le domaine de l'étude pour s'intéresser uniquement aux meilleures actions.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elle exige de traduire les performances des actions en notes, ce qui suscite une gêne chez certains utilisateurs qui y voient une perte de maîtrise de leurs données.</li> </ul>
<b>ELECTRE II</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode ELECTRE II relève des problématiques de classement.</li> <li>• Elle vise à classer les actions depuis les meilleurs jusqu'aux moins bonnes, en tolérant les ex-aequo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Il est difficile de déterminer le pré-ordre partiel <math>P</math> car les rangs des actions bougent beaucoup entre le classement direct et le classement inverse.</li> <li>• Elle exige des évaluations cardinales et une articulation a priori des préférences.</li> </ul>
<b>ELECTRE III</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode ELECTRE III relève des problématiques de classement. Le but est de classer les actions des meilleures aux moins bonnes.</li> <li>• L'originalité de cette méthode est d'admettre une part de flou dans les choix du décideur, et l'introduction d'un seuil véto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elle exige un grand nombre de paramètres techniques.</li> <li>• Elle est jugée trop complexe et parfois difficile à interpréter.</li> </ul>
<b>ELECTRE IV</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode ELECTRE IV relève des problématiques de classement.</li> <li>• Elle associe à chaque critère des seuils de préférences, mais l'originalité réside dans le fait de supprimer la pondération attachée à chaque critère.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elle exige un grand nombre de paramètres techniques.</li> </ul>
<b>ELECTRE Is</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode ELECTRE Is est utilisée pour des problématiques de sélection.</li> <li>• Elle introduit la notion de noyau qui permet de restreindre le domaine de l'étude pour s'intéresser uniquement aux meilleures actions.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elle exige de traduire les performances des actions, ce qui suscite une gêne chez certains utilisateurs qui y voient une perte de maîtrise de leurs données.</li> </ul>
<b>ELECTRE TRI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relève des problématiques d'affectation.</li> <li>• Le but est de classer les actions qui seront proposées au décideur dans une des catégories prédéfinies.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elle exige un grand nombre de paramètres techniques.</li> </ul>
<b>MACBETH</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode MACBETH permet de combiner deux types d'information une information sur les préférences révélées par le décideur, une information sur l'importance des critères et leurs interactions, limitées aux paires de critères.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• les échelles de La méthode MACBETH ne sont pas bornées.</li> <li>• Dans la méthode MACBETH, la détermination des constantes d'échelle suit le même processus que pour la détermination des échelles d'attractivité.</li> </ul>

**Tableau. 17 Les avantages et inconvénients des méthodes d'aide à la décision multicritère**

## 4.2. Avantages et inconvénients des méthodes d'optimisation mathématique multicritère

Méthodes	Avantages	inconvénients
<b>La méthode du critère globale</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•La méthode du critère global a l'avantage d'avoir une fonction objective facile à formuler.</li> <li>•La normalisation des évaluations est faite implicitement par la définition même de la fonction objective.</li> <li>•La méthode du critère global n'exige pas une articulation a- priori des préférences.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Elle génère une solution médiocre si toutes les actions ne sont pas bonnes.</li> </ul>
<b>PMOM</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•La méthode PMOM constitue un axe de recherche très porteur du domaine de la recherche opérationnelle et de l'analyse de la décision.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Elle exige une articulation a posteriori des préférences.</li> <li>•Le traitement d'un programme mathématique à objectifs multiples peut, à tort, nous paraître aisé.</li> </ul>
<b><math>\epsilon</math>- Constraint Method</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•La méthode du <math>\epsilon</math>- Constraint est facile à mettre en place.</li> <li>•Elle fixe le seuil de performance sur n-1 critères.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•le principal inconvénient de cette méthode est le fait qu'elle soit gourmande en temps de calcul s'il y a trop de contraintes.</li> </ul>
<b>Compromise Programming</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Le compromise programming a l'avantage d'avoir une fonction objectif facile à formuler.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•la résolution du modèle Compromise Programming peut être beaucoup plus difficile dans le cas où on dispose d'un ensemble de contraintes à respecter.</li> <li>•Le défaut du Compromise Programming est de proposer une action médiocre si toutes les actions ne sont pas bonnes.</li> <li>•Le Compromise Programming exige une articulation a- priori des préférences.</li> </ul>
<b>Goal Programming</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Le Goal Programming a l'avantage d'aborder les problèmes sous l'angle de satisfaction d'objectifs.</li> <li>•Le Goal Programming s'avère utile pour modéliser des problèmes qui n'ont pas de solution optimale.</li> <li>•un modèle Goal Programming qui permet de choisir l'action qui se rapproche le plus de ces souhaits.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Le Goal Programming dans sa forme standard peut générer des solutions non « performantes » dans le cas où les objectifs sur les critères sont fixés de façon pessimiste.</li> </ul>

Tableau. 18 Les avantages et inconvénients des méthodes d'optimisation mathématique multicritère

## **Conclusion**

Nous avons étudié les méthodes de traitement d'un problème multicritère. Nous avons présenté les méthodes multicritères d'aide à la décision. Nous avons montré l'impact de la modélisation des préférences du décideur sur le choix d'une méthode d'agrégation.

L'analyse multicritère semble être un outil parfaitement adapté pour intégrer de nouveaux facteurs, difficilement quantifiables et de grande importance dans la prise de décision.

Il ne faut toutefois pas considérer l'analyse multicritère comme un outil magique, permettant de résoudre l'épineux problème de la pondération. La pondération restera subjective, mais l'analyse multicritère peut permettre de faciliter cette étape, et d'appliquer au problème de pondération une légitimité plus importante. On peut utiliser certains logiciels pour structurer le raisonnement menant à une pondération. Ainsi, le logiciel MACBETH, qui par étapes permet de créer une pondération. L'analyse multicritère est avant tout un outil permettant et aidant les décideurs à faire un choix réfléchi et structuré. Mener de front, deux analyses multicritères l'une avec une méthode compensatoire, et l'autre avec une méthode non compensatoire, permettrait d'avoir un point de vue plus large quand aux choix considérés.

Ainsi, dans ce qui suit, dans notre modèle de recherche nous sommes basés sur l'application des méthodes multicritères de surclassement telle que : AHP et MACBETH ; et aussi la programmation mathématique.

# Chapitre 3

## Construction d'une démarche Six Sigma basée sur Approche Multicritère d'Aide à la Décision pour l'amélioration d'un système de production

### Sommaire

---

INTRODUCTION.....	134
1. Démarche de recherche.....	135
2. La proposition d'une méthode Six Sigma et approche multicritère d'aide à la décision .....	137
2.1. Etape 1 : Définir.....	137
2.1.1 La conduite de l'étape.....	137
2.1.2 Identifier les CTQ .....	138
2.2. Etape 2 : Mesurer.....	142
2.2.1 La conduite de l'étape.....	148
2.2.2 Le concept de la capabilité(aptitude).....	149
2.3. Etape 3 : Analyser.....	150
2.3.1 Les causes de variation .....	151
2.3.2 La méthode MACBETH.....	153
2.4. Etape 4 : Innover/Améliorer .....	153
2.4.1 La génération des solutions.....	153
2.4.2 Contribution à l'élaboration d'une démarche globale d'aide à la décision pour améliorer un processus de production .....	154
2.5. Etape 5 : Contrôler.....	165
2.5.1 Les différentes natures de contrôle de variable .....	166
2.5.2 Les cartes de contrôles.....	168
CONCLUSION.....	170

---

## Introduction

Chaque période nous amène de nouvelles méthodes, de nouveaux outils et de nouvelles démarches. Plusieurs démarches sont apparues et ont marqué l'histoire de la qualité. On peut citer le contrôle qualité, l'assurance qualité, le TQM (Total Quality Management) ...La stratégie Six Sigma est l'une des dernières démarches qualité qui se développent rapidement dans le monde des affaires.

Six Sigma est le système de management qui se développe le plus vite aujourd'hui dans l'industrie. Centré sur une puissante méthodologie de résolution de problème et d'optimisation des processus, Six Sigma a permis d'économiser des millions de dinars dans les sociétés qui ont appliqué la démarche ces dix dernières années.

La puissance de Six Sigma vient de l'application d'outils statistiques dans le contexte d'une méthodologie structurée et facile à mettre en œuvre. Ces outils, utilisés le plus souvent dans un environnement opérationnel de production, s'appliquent également à tous les processus, y compris administratifs [ECKES G. 2005].

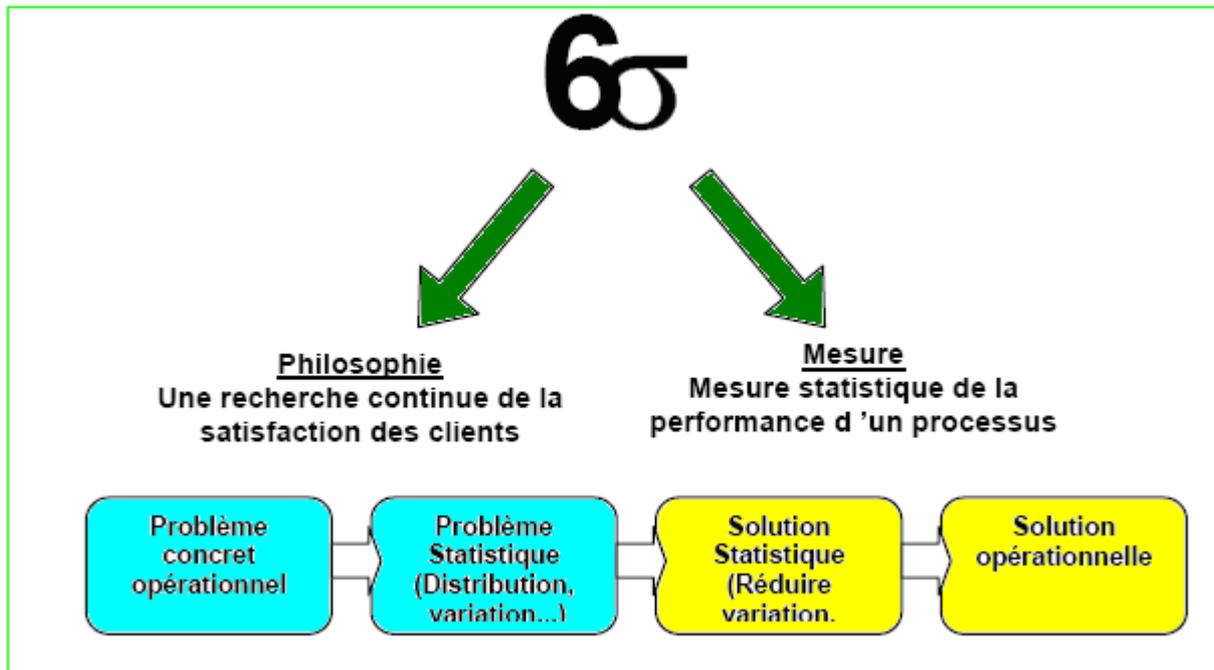


Figure. 52 Philosophie Six Sigma

La démarche 6 Sigma possède l'avantage de mixer à la fois la formalisation des processus par une cartographie précise et une analyse de la variabilité des paramètres par analyse statistique.

Tous les procédés, quel que soit leur degré de précision, sont incapables de produire toujours exactement le même produit. Il y aura toujours une petite variation entre les produits réputés identiques, et ce sont ces variabilités qui conduisent à la non qualité [PILLET M. 2005].

Quelles que soient la machine étudiée et la caractéristique observée, on note toujours une dispersion dans la répartition de la caractéristique.

Ces variations proviennent de l'ensemble du procédé de production. L'analyse de ces procédés permet de dissocier 5 éléments source de cette dispersion, on les désigne généralement par les «5 M ». Ces 5 causes fondamentales sont responsables de dispersion et donc de non qualité.

Alors le but de Six Sigma est d'améliorer rapidement, de façon continue et importante les processus en éliminant ces variabilités. Cette méthodologie est utilisée pour améliorer les processus, les produits et les services, pour réduire les coûts de toutes sortes et améliorer la qualité [ECKES G. 2005].

## **1. Démarche de recherche**

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.

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

Comment une entreprise peut elle évaluer judicieusement la performance de son système de production en sélectionnant tous les problèmes dans les 5 M et en identifiant les causes réelles en minimisant les essais ?

L'objectif de nos travaux est donc de répondre à la question précédente.

Pour apporter une solution à cette problématique nous avons vu qu'il faut proposer une méthode adaptée et adaptable aux différents problèmes rencontrés dans les 5 M de processus de production.

L'étude bibliographique des méthodes et des outils existants (outils qualité et outils multicritère d'aide à la décision) de résolution des problèmes nous aide à orienter la structure de résolution de problèmes présentée dans la partie suivante.

La structure de notre proposition se base essentiellement sur la méthode Six Sigma et les outils multicritères d'aide à la décision.

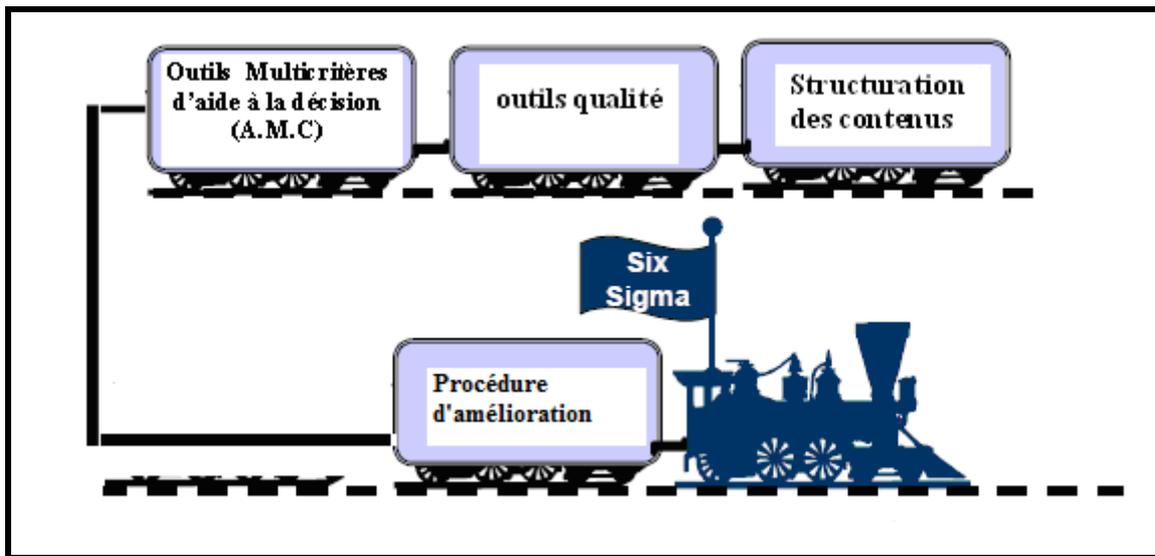


Figure. 53 Six Sigma et outils multicritères d'aide à la décision

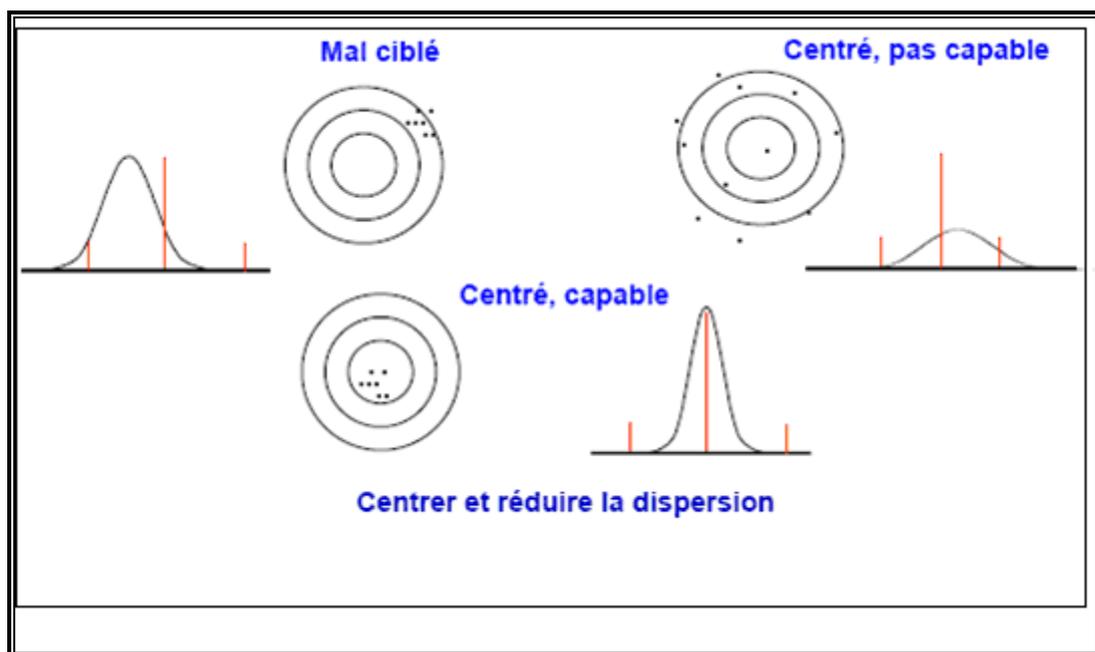


Figure. 54 Différents types d'états de processus

La méthode Six Sigma sur les notions de client, processus et mesure; il s'appuie en particulier sur :

1. les attentes mesurables du client (CTQ - Critical To Quality),
2. des mesures fiables permettant à évaluer la performance du processus métier de l'entreprise,
3. des outils statistiques pour analyser les causes sources influant sur la performance,
4. des solutions attaquant ces causes sources.
5. des outils pour contrôler que les solutions ont bien l'impact escompté sur la performance.

La méthode se base ainsi sur 5 étapes qui se contractent dans l'acronyme DMAAC (ou DMAIC en anglais) pour Définir, Mesurer, Analyser, Améliorer et Contrôler.

On retrouve dans quelques étapes possède des outils qualité et des outils multicritères d'aide à la décision différents qui sont regroupés dans une démarche cohérente [LAMPRECHT J. 2003].

## **2. La proposition d'une méthode Six Sigma et A.M.C. «Les étapes Six Sigma»**

### ***2.1 Étape 1: Définir***

Pour obtenir les niveaux de capabilité relatifs à six écarts types de la moyenne, l'approche « *Six Sigma* » propose une méthodologie d'amélioration qui se décline en cinq étapes DMAIC. Cette approche aborde l'amélioration de la production selon les méthodes de résolution des problèmes. La phase de départ consiste à évaluer la situation actuelle du fonctionnement de l'entreprise et à se fixer des objectifs concrets d'amélioration.

L'objectif à atteindre doit être concret et clairement défini, même si ce n'est pas toujours facile. Il faut que toutes les énergies des membres de l'entreprise soient focalisées sur la résolution d'un problème. Le processus d'identification des problèmes doit être mis en oeuvre méthodiquement jusqu'à la découverte du problème réel et plusieurs idées seront testées avant de parvenir à la meilleure solution.

Cette étape nous permet de rédiger la charte du projet en définissant les acteurs du projet, le cadre du projet, et les objectifs à atteindre.

#### ***2.1.1 La conduite de l'étape***

##### **- Prédéfinition du projet**

Il s'agit de l'identification :

- D'un vrai problème : l'existence d'un écart remarquable entre ce qui est attendu et ce qui est mesuré.
- D'un vrai client : un client motivé par la réduction de l'écart.
- Des gains significatifs : justifiant le temps et l'énergie que l'on va dépenser.
- D'un périmètre limité : garantissant une durée d'action entre six mois et un an.

Cette sous étape aide tout d'abord à identifier les projets susceptibles d'être conduits, ensuite de les classer en fonction du potentiel de gain et de difficulté qu'ils présentent, et enfin

sélectionner le bon projet en fonction des critères qui sont en adéquation avec la stratégie de l'entreprise.

#### **- Définition du projet**

Après avoir sélectionné le problème sur lequel on doit se ponctuer, on cherche dans cette étape à parfaitement décrire qui est le client, quelle est son insatisfaction et quelle est la grandeur Y qui permet de traduire cette insatisfaction. Ce travail doit impliquer le plus rapidement possible l'équipe du projet. La première phase de la définition sera donc la formation de l'équipe.

Cette étape consiste à identifier les différents acteurs du projet qui sont :

- **Le Master Black Belt** ou « pilote » qui va conduire le projet en maîtrisant la méthode Six Sigma.
- **Le champion** qui va déployer le Six Sigma et libérer les ressources nécessaires.
- **Le Black Belt** (ou **green Belt**) qui a un rôle de direction et d'organisation.
- **L'équipe** composée de personnes formées à la méthode Six Sigma [PILLET M. et al 2004].

La mise en oeuvre de Six Sigma nécessite une très importante formation spécifique pour chaque acteur du projet. Cette formation se fait par une introduction à la méthode, l'exposé des différents outils qui seront utilisés et des revues qui seront réalisées entre chaque étape de la démarche.

Après avoir défini et formé l'équipe du projet, on va présenter les outils les plus souvent utilisés pour mener cette étape « *définir* ».

### **2. 1.2 Identifier les CTQ**

#### **- écouter la voix du client**

Le but du Six Sigma est d'atteindre la satisfaction du client et pour se faire il faut se mettre à son écoute à travers une étude complète du marché pour bien identifier ses besoins. Donc il faut:

- Identifier les différentes catégories de clients potentiels.
- Analyser les produits.
- Ecouter la voix des personnes intéressées, directement ou indirectement, par le produit.
- Identifier toutes les attentes clients par rapport au produit.

Cette étude doit couvrir les aspects techniques et émotionnels.

Une bonne écoute du client permet de compléter les colonnes du diagramme CTQ.

**- le diagramme CTQ (Critical To Quality)**

But de l'outil : le diagramme CTQ a pour objectif de décomposer le besoin du client en exigences (Qualité, coût, délais) qui doivent pouvoir être mises en face des caractéristiques que l'on sait évaluer par une mesure.

Les CTQ sont très importants, car le respect des spécifications portées sur ces caractéristiques formera le socle de la démarche.

**- cartographier le processus**

La cartographie du processus est un excellent moyen de réaliser une phase d'analyse d'un processus de production.

Son but c'est d'illustrer les flux physiques et les flux d'informations depuis les approvisionnements en matières premières jusqu'au client.

**- cartographie Lean Six Sigma**

Dans une démarche Lean Six Sigma, la cartographie consiste à suivre l'ensemble du processus pour identifier les foyers importants de perte de performance sur chaque étape.

On cherchera à identifier :

- Tous les délais.
- Tous les temps de cycle, de valeur ajoutée.
- Tous les rebuts, retouches
- Temps de changement de séries.
- Tous les problèmes rencontrés.

**- définir les limites du projet**

Les limites du projet se sont les périmètres qui doivent être défini.

Lorsqu'on énonce un problème, on s'engage directement à rechercher une solution sans avoir positionné correctement le problème. Pour cela, on utilise plusieurs outils de base de la qualité qui nous permettent de remonter les causes qui sont à la racine du problème.

**- définir les gains et les coûts**

Au départ du projet Six Sigma, on doit tenir compte du contrôle de gestion et suivre les gains et les coûts.

- **Définir les coûts prévisionnels**

Les coûts prévisionnels peuvent être directs et indirects tels que :

- Temps passé par les membres du groupe de travail ;
- Récolte de données sur le terrain ;
- Ralentissement et arrêt de production pour cause d'essais ou de modification de processus ;
- Essais et contrôles nécessaires dans le projet ;...

On ne peut pas fixer au départ les coûts qui seront engagés mais la liaison entre la gestion du projet et la gestion financière permet d'affirmer une première estimation.

- **Définir les gains prévisionnels**

On distingue deux parties :

- Une partie des gains facilement identifiable, se sont en général les économies réalisés (la diminution de taux de rebut, retouche, ...).
- Une grosse partie des gains difficilement quantifiables (gains non mesurables) comme l'amélioration de l'image de la société auprès des clients.

**- La charte du projet :**

*Chapitre 3 : Construction d'une démarche Six Sigma basé sur Approche Multicritère d'Aide à la Décision pour l'amélioration d'un système de production*

<b>Six Sigma – Charte du projet</b>															
Titre du projet :															
Formulation du problème (« le problème, c'est de... »)															
QUI ? QUOI ? OÙ ? QUAND ? COMMENT ? POURQUOI ?															
Clients identifiés (clients aval et clients finaux)															
Clients aval :								Impacts :							
Clients finaux :															
<b>Diagramme CTQ</b>															
Besoin des clients				Exigences				Caractéristiques mesurables				Spécifications			
Etat actuel								Etat souhaité							
Gains et coûts mesurables								Gains et coûts non mesurables							
<b>Groupe de travail</b>															
Nom				Tél.				Service				Mél			
<b>Planification du projet</b>															
<b>Semaines</b>															
Définir															
Mesurer															
Analyser															
Améliorer															
Contrôler															
Standardiser															
<b>Signatures</b>															
Client :				Propriétaire :				Pilote :				Direction :			

**Tableau .19 Charte du projet**

La charte du projet est un fichier qui résume les principaux résultats qu'on a obtenu:

- La définition de problème ;
- L'identification des caractéristiques critiques pour les clients ;
- La mise en évidence de l'état actuel et de l'état souhaité, qui doit faire apparaître les limites du projet ;
- La définition du groupe de travail et l'engagement des principaux acteurs

La charte est une fiche de base sur laquelle se déroule la première revue de projet R0 entre (Black belt) et le responsable du déploiement (champion) [PILLET M. 2005].

## ***2.2 Étape 2: Mesurer***

Pourquoi mesurer ? «**On ne progresse que sur ce qui est mesuré** », expérience personnellement vécue dans l'industrie automobile où l'intégration des technologies ne permet pas de raisonner sans mesures précises de données techniques et physiques et en particulier en maintenance où le retour d'expérience est incontestablement la seule valeur ajoutée au progrès à condition que la qualité des données soit prise en compte.

La démarche 6 Sigma apporte une dimension indéniable sur ce sujet par la focalisation sur l'explication des comportements de processus par les chiffres et leur exploitation statistique. On constate dans un grand nombre d'entreprises une faiblesse dans la culture de la mesure, donc des moyens de mesures inadaptés, mais également une abondance de relevés dont on ne sait que faire et se retrouvant dans des fichiers Excel et des tableaux de bord inexploités, car le processus d'analyse est incomplet. La mesure coûte, mais l'exploitation rapporte, à condition de savoir comment faire les calculs et utiliser les bons outils, d'où l'importance de la culture statistique.

La mesure n'est crédible, que si les éléments pris en compte dans le calcul ont été identifiés pour participer à un résultat. On trouve trop souvent, et ce dans de nombreux domaines, la situation d'enregistrer des données, sans se soucier de leur exploitation, des résultats attendus et de leur exploitation opérationnelle.

Les zones à mesurer sont dans trois domaines, complètement compatibles avec la démarche par processus :

- Celle venant des entrées (essentiellement des fournisseurs) ;
- Celles étant produites par la valeur ajoutée du processus intéressé ;
- Celles constatées par le client du processus.

Le tableau suivant en fait une synthèse :

*Chapitre 3 : Construction d'une démarche Six Sigma basé sur Approche Multicritère d'Aide à la Décision pour l'amélioration d'un système de production*

<b>Mesure des entrées</b>	<b>Mesure de l'efficience du processus</b>	<b>Mesure de la sortie</b>
Variables d'entrée (Xi) provenant des fournisseurs identifiés comme VIS et pouvant influencer le résultat final	Indicateur d'efficience du processus : Délai Durée Coût Qualité	Etat de sortie (le Y) caractérisant la satisfaction du client interne ou externe et identifiées par les VOS

**Tableau. 20 Les mesures de processus**

Les données sont de plusieurs natures, essentiellement catégorisées en données discrètes et données continues.

- Les données discrètes sont du type : oui/non, bon/mauvais, machine1/machine2, équipe1/équipe2, opérateur 1/opérateur 2,...
- Les données continues sont caractérisées par des valeurs numériques qui se suivent et sur lesquelles des calculs peuvent être effectuées (prise en compte de l'amplitude des résultats, regroupement en zones de distribution de fréquence, calcul des moyennes).

Avec les données continues il est judicieux d'en faire l'exploitation suivante :

- Calcul de l'amplitude (différence entre les valeurs maxi et mini et enregistrées).
- Définitions de zones caractéristiques (on divise l'amplitude par 5 et distribue les enregistrements par zones) [PILLET M. 2004].

A partir de cette catégorisation, on peut faire des présentations graphiques de distribution ou des présentations hiérarchisées de toutes sortes comme présentées ci-après :

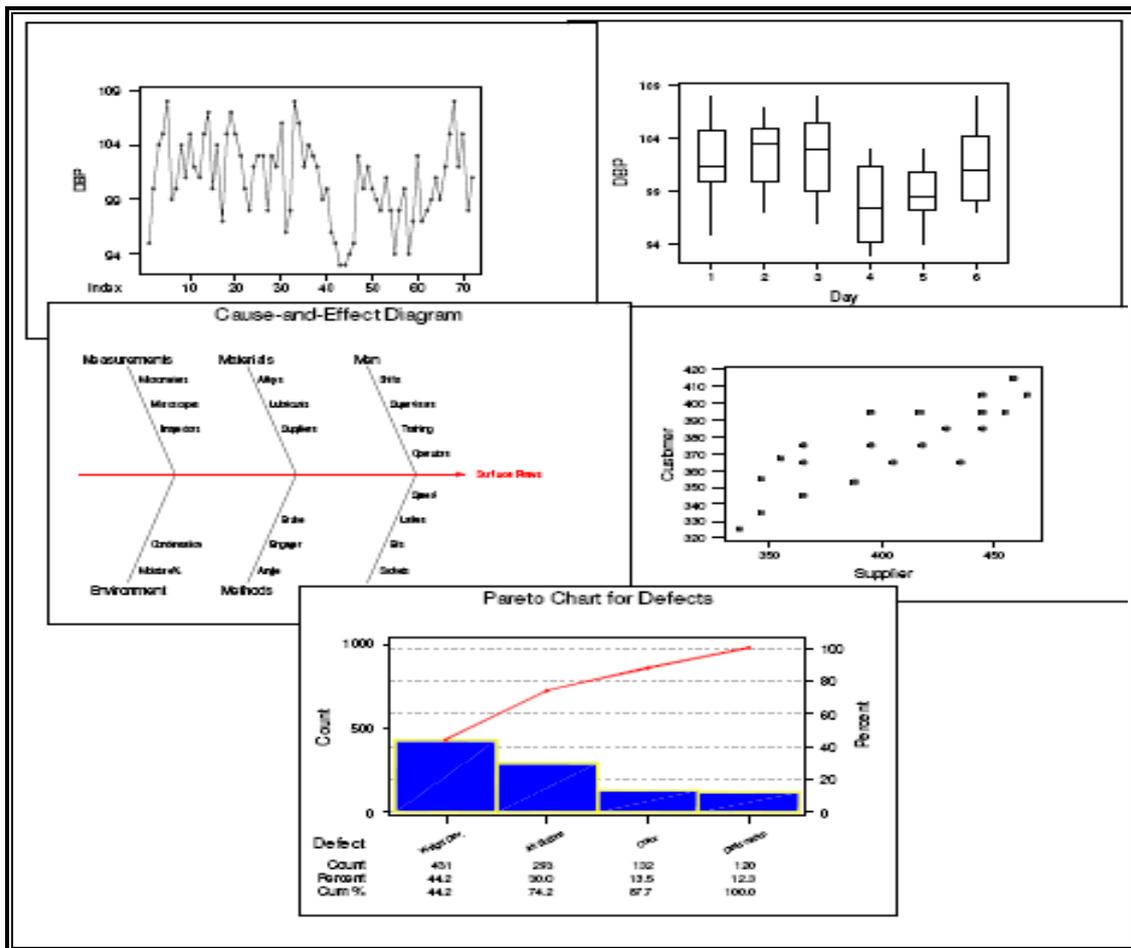


Figure. 55 Présentation des outils de mesure

A cette étape, une question peut se poser, est-ce nécessaire de tout mesurer, n'y a t'il pas une possibilité de travailler sur un échantillon caractéristique d'une population ? Effectivement les outils statistiques le permettent à condition de bien choisir la taille de l'échantillon (même problématique que les enquêtes d'opinion ou les parts de marchés à la télévision). Cela pose le problème de la taille de l'échantillon et la méthodologie de sélection.

Certaines précautions sont cependant nécessaires :

- Vérifier que l'échantillon porte sur tout le périmètre considéré ;
- Vérifier qu'il porte sur toute la période d'enregistrement (calendaire) ;
- Faire attention à ne pas prendre en compte des informations dans des périodes anormales (hors de l'activité moyenne de fonctionnement ou d'exploitation).

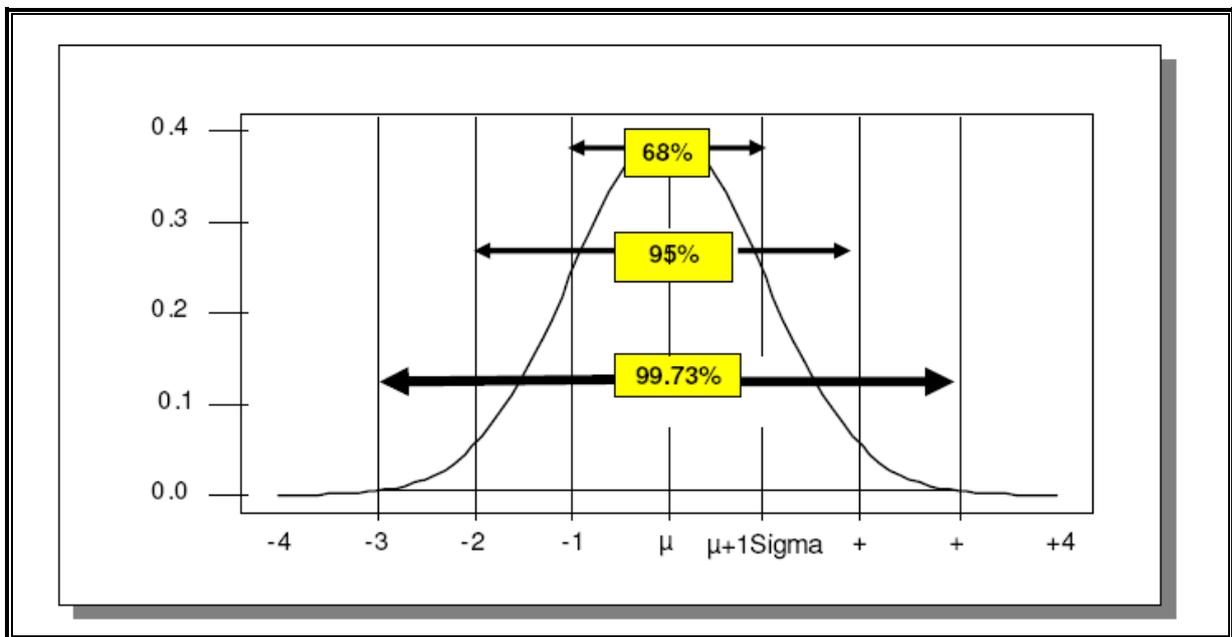
La taille d'un échantillon de données continue se calcule à partir des données suivantes :

- La plage de variabilité des données ;
- L'amplitude souhaitée.

Pour les données discrètes, il faut également prendre en compte le taux de défaut.

Pour pouvoir calculer le Sigma d'un processus, il est nécessaire d'obtenir un certain nombre d'informations fondamentales, car il n'est pas suffisant d'enregistrer des défauts, il faut savoir sur quelles activités ces défauts sont identifiés connus et enregistrés [PILLET M. 2004].

La théorie de 6 Sigma repose sur le principe de variabilité, parce ce que tout ce qui existe varie dans le temps, qu'il soit de nature statique ou dynamique. La représentation des mesures se présente sous la forme d'une courbe de Gauss pouvant être exploitée en nombre d'écart type selon la représentation suivante :



**Figure. 56 Distribution normale et aires de probabilité**

L'aire sous la courbe permet d'évaluer les chances sur 100 de fabriquer des pièces dans les spécifications.

Quelques remarques sur la distribution :

- la courbe représente globalement tout ce qui est mesuré, même si des résultats tendent à se positionner aux limites inférieures ou supérieures,
- la distribution est généralement symétrique, mais il peut exister des distributions spécifiques,
- il est important de prendre en compte les positions respectives de la moyenne et de la médiane,
- la courbe se divise en segments correspondant à l'écart type. On utilise souvent le nombre Z qui est le nombre d'écart type entre la moyenne et les limites extérieures.

Les lois empiriques de l'écart type sont les suivantes :

*Loi 1*

– environ de **60 à 75%** des valeurs sont comprises entre une distance de **un** écart type de chaque côté de la moyenne.

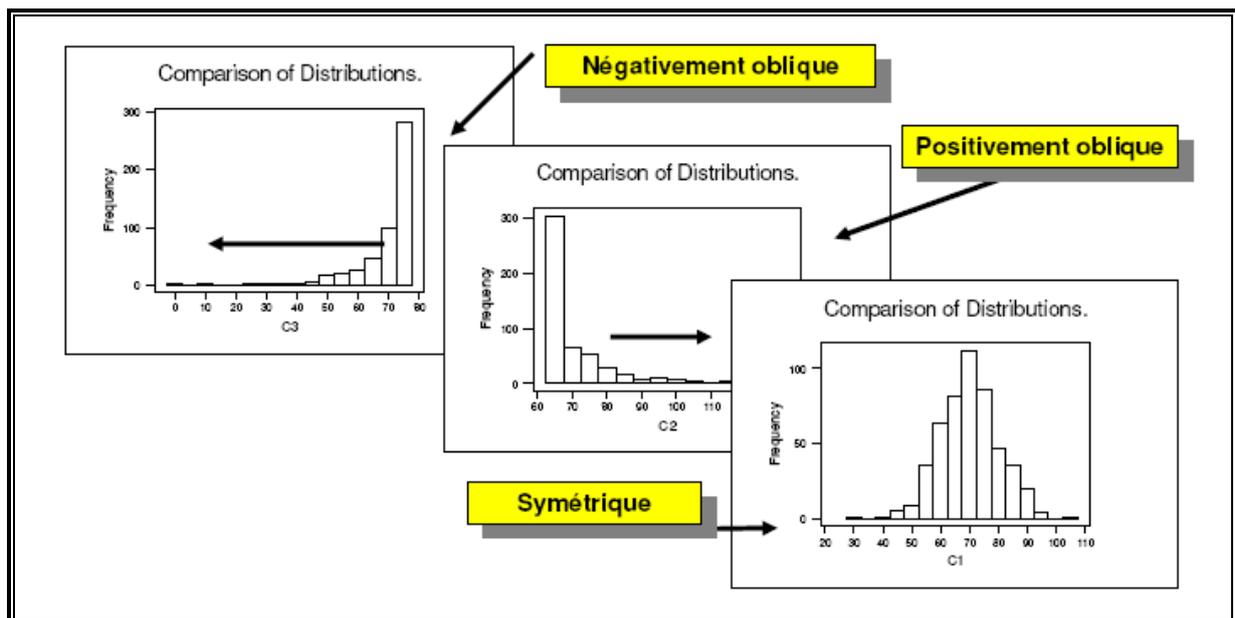
*Loi 2*

– de même **90 à 98%** des valeurs sont comprises entre une distance de **deux** écarts types de chaque côté de la moyenne.

*Loi 3*

– et **99 à 100%** des valeurs sont comprises entre une distance de **trois** écarts types de chaque côté de la moyenne.

Il existe des présentations de toutes sortes où la distribution n'est pas toujours centrée mais décalée, ce qui entraîne les calculs de capacité (Cp et Cpk).



**Figure. 57 Comparaison des distributions**

Il existe plusieurs approches du calcul du Sigma de l'existant, le DPMO (Défauts Par Millions d'Opportunités) et le DPU (Défauts Par Unités).

Le DPMO est souvent appelé méthode discrète, il nécessite la présence des données ou descriptions suivantes :

- L'Unité, qui est la caractérisation des activités fondamentales
- La liste des défauts potentiels (Opportunités non apparues mais potentielles)

- Le nombre de *Défauts*, ce qui est considéré comme anormal par rapport aux exigences de sortie du processus (autrement dit les non-conformités)

Le calcul s'effectue de la manière suivante :

$$DPMO = \frac{NBD}{NBO \times NBU} \times 10^6$$

Avec :

NBD : nombre de défauts

NBO : nombre d'Opportunités

NBU : nombre d'Unités

Une fois le problème bien défini, on peut commencer par mesurer l'aptitude du processus en question en mesurant par exemple le rapport des nombres de non conformités réalisées sur le nombre des non conformités possibles.

Certaines entreprises comptent le nombre de non conformités qui se produisent, mais pas le nombre d'événements, elles ne savent donc pas vraiment de quoi le processus est capable, ni son niveau actuel.

Faire du benchmarking, en comparant les résultats à ceux de la concurrence, en se demandant quelle est leur performance par rapport au problème étudié. Certaines entreprises pensent parfois qu'elles sont les meilleures en termes de qualité, d'efficacité et de satisfaction client. Mais à partir du moment où elles commencent à se comparer à la concurrence, elles se rendent compte en général qu'elles ne sont pas si performantes que ça. Il peut être utile de toujours supposer que chacun de nos concurrents fait au moins une chose mieux que nous.

Il convient de chercher qui, dans le même secteur, est le meilleur; on peut aussi éventuellement observer ce qui se passe dans d'autres secteurs. Grâce au Benchmarking, on peut avoir une idée de ce qu'il est possible de réaliser et se fixer ainsi des objectifs raisonnables, on peut aussi déterminer ce que les autres font alors que nous ne faisons pas.

Pendant tout ce processus de mesure, il est important de se concentrer sur les paramètres qui sont critiques pour la qualité (CPQ), c'est-à-dire ceux dont l'influence sur le résultat sont les plus grands.

La seconde phase de cette étape de mesure consiste à vérifier que la variabilité de notre système de mesure est faible par rapport à la variabilité des éléments que l'on cherche à mesurer c'est-à-dire vérifier que la chaîne de mesure utilisée n'ait pas déjà une source de

variabilité et que la variabilité due aux défauts de répétabilité (plusieurs mesure d'un opérateur) et de reproductibilité (plusieurs opérateurs) n'est pas trop forte (R&R).

Cette étape a pour objectif de trouver un moyen de mesure des *CTQ*, évaluer la capacité actuelle (l'évaluation du *z* : spécification de processus à partir des *Y* processus). C'est pour cela nous allons mettre en place un moyen de mesure nous permettant de mesurer le *z* du processus, valider les processus de mesure (vérifier que la chaîne de mesure n'est pas une source importante de variabilité), et récolter des données permettant d'évaluer la performance du processus (pour bien analyser la situation actuelle à travers des données fiables).

### **2.2.1 La conduite de l'étape**

#### **- valider le processus de mesure**

Alors il faut identifier deux processus élémentaires :

Le processus principal (processus de production) et ces 5 M (Moyen, Milieu, Méthodes, Matière, Main-d'oeuvre) permet la production du produit ou de service.

- Le processus de mesure et ces 5 M (Moyen, Milieu, Méthodes, Mesure, Main-d'oeuvre) : permet l'évaluation de la satisfaction du client.
- Le moyen de contrôle est considéré comme un élément important du processus.

Donc il faut vérifier qu'il possède des propriétés de justesse, de linéarité et de stabilité sans oublier les quatre autre M (Milieu, Mesure, Main-d'oeuvre, Méthode).

Le processus de mesure doit avoir des propriétés de répétabilité (plusieurs mesures dans les mêmes conditions doivent donner un résultat similaire) et de reproductibilité (indépendance de la mesure à un changement de condition tel que l'opérateur) afin que sa dispersion soit faible par rapport aux variations de la réponse *Y*.

#### **- mesurer le processus**

Pour mesurer un processus il faut assembler des informations à travers une campagne de mesure et des résultats disponibles sur le processus. Mais certaines mesures présentent des variabilités, pour cela on doit réduire ces variabilités à partir d'une analyse des 5 M.

#### **- analyse des 5 M du processus**

L'analyse des 5 M est une analyse qui tend vers les sources de dispersion. On doit alors poser la question suivante : quelles sont les causes de la variabilité sur le processus ?

Pour cela on utilise le diagramme en arête de poisson (diagramme d'Ishikawa) : c'est un outil qui aide à comprendre les causes d'un défaut de qualité, il sert à analyser le rapport existant entre un problème et ses causes.

**- mettre en œuvre une campagne de relevés**

La mise en œuvre d'une campagne de relevés est basée sur l'analyse des 5 M .

La campagne de relevé permet :

- De mesurer le z du processus (sur le Y) ;
- D'établir des relations entre les X et les Y ;
- De mettre en évidence l'influence des différents facteurs (soulevés à partir des sources de variabilité présenté dans l'analyse des 5 M du processus) en réalisant un tableau des données mettant en relation le Y (la réponse) avec les X potentiels (les entrées).

***2.2.2 Le concept de la capabilité (aptitude)***

Il est indispensable pour toutes les entreprises d'avoir un langage commun en matière de capabilité entre l'ensemble des services et des personnes de l'entreprise afin d'éviter les réunions inutiles par l'utilisation des mêmes notions de capabilité et le même vocabulaire.

La capabilité est une analyse importante car la qualité est la satisfaction du client. Or le calcul de capabilité fait entrer dans le calcul statistique des besoins du client. C'est le moment où l'entreprise peut vérifier qu'elle est en mesure de répondre à un cahier des charges. La capabilité se mesure par le rapport entre la performance demandée et la performance réelle d'un procédé.

Le fait d'utiliser un chiffre pour caractériser la capabilité est fondamentale donc elle permet de mesurer la capabilité d'une machine ou d'un procédé à réaliser des pièces dans l'intervalle de tolérance fixé par le cahier des charges.

La campagne de relevé est simplifiée sous forme d'une feuille de relevé dont l'utilisation est simple.

On peut caractériser un processus quel qu'il soit (manufacturier ou administratif) en termes de performance par son Sigma. (Écart type représentant la dispersion des données par rapport à leur moyenne) ; il est nécessaire de développer sur quelques points les concepts statistiques utilisés dans la démarche.

Sigma est une unité de mesure qui reflète l'aptitude, donc la capabilité du processus. L'échelle de mesure de Sigma est parfaitement adaptée à des caractéristiques telles que défauts par unité

(dpu), nombre de défauts par pièces Produite par million (ppm), et les probabilités de défauts/erreurs. Chaque donnée mesurée est fréquemment distribuée de façon normale et donc représentée selon une distribution classiquement appelée Gaussienne.

Même lorsqu'une distribution n'est pas normale, la prise d'échantillon aléatoire et le théorème de la limite centrée permettent de faire des analyses avec les mêmes moyens de calculs statistiques.

La démarche 6 Sigma consiste donc à obtenir non plus 3 Sigma mais 6 entre la moyenne et les deux limites inférieures et supérieures.

### ***2.3 Étape 3: Analyser***

Si toutes les phases de la démarche DMAIC sont importantes, la phase d'Analyse est souvent considérée comme majeure car elle oriente sur les solutions à mettre en oeuvre à partir des données préalablement recueillies.

Les informations préalablement recueillies sont de deux ordres :

- Les variables (les  $X_i$ ),
- La cartographie des processus.

Dans l'étape mesurer le groupe de travail de projet Six Sigma a récolté des données d'analyse qui doivent être par la suite conduite d'une manière rigoureuse en utilisant des outils statistiques afin de découvrir les causes racines de variabilité et la performance insuffisante.

Dans les étapes suivantes ces mesures vont être analysées, améliorées et contrôlées pour les synthétiser dans la dernière étape standardisée.

Dans cette étape, on recourt principalement aux outils de visualisation des données, aux outils de comparaison de moyenne, des variances, aux tests d'analyse de la variance et aux tests de corrélation.

L'analyse va consister à rechercher les variables influentes en s'aidant des représentations graphiques qui utilisent principalement la distribution de fréquences et les histogrammes.

Ces données doivent être analysées afin d'identifier un nombre de  $X$ , restreint par rapport à tous les  $X$  potentiels, responsable d'une grande partie de variabilité. L'analyse portera sur les  $Y$ , sur les  $X$  et sur les relations qui existent entre eux.

- Pour analyser les  $X$  et les  $Y$  on fait appel à la représentation graphique et la statistique descriptive.

- Pour l'établissement de relation des X et des Y, on s'appuie sur la statistique inférentielle.

### **2.3.1 Les causes de variation**

Chaque produit fabriqué, chaque service effectué, chaque démarche mise en oeuvre, sont sources de variation par rapport aux spécifications qui caractérisent leur efficacité propre.

Les causes principales de variations proviennent des sources principales suivantes :

- tolérances inadéquates par rapport à la capacité du processus à réaliser les éléments constitutants,
- approvisionnements des fournisseurs non conformes ou instables,
- capacité des processus insuffisants ou instables,

Ces trois sources et/ou causes de variation amènent les remarques suivantes :

- il existe une relation indissociable entre les tolérances définies par le bureau d'études et la capacité des processus à réaliser effectivement, sur le long terme, les composants de base constituant le produit final,
- il est important de maîtriser les approvisionnements des fournisseurs et de suivre l'incidence de la non-qualité induite sur le processus interne de l'entreprise,
- il est indispensable de suivre le résultat qualité du processus en permanence pour mesurer sa capacité à travers les plans de surveillance,

La maîtrise de la variabilité des processus, passe par la compréhension du fonctionnement du processus avec l'identification précise des paramètres participants au résultat.

Tout produit ou service est le résultat d'une équation fondamentale,  $Y = f(x_i)$ , où Y est le produit ou le service et les  $x_i$ , toutes les variables indépendantes qui ont une influence sur le résultat final.

Le principe est dans un premier temps de :

- rechercher les variables indépendantes qui peuvent, par leur variabilité propre, expliquer la variabilité du résultat ;
- hiérarchiser l'importance ou l'influence qu'elles ont ;

Ces variables sont de plusieurs types :

- les variables de sorties qui représentent la sortie ou la réponse ;
- les variables d'entrées appelées facteurs contrôlés, elles peuvent être continues comme la température, les niveaux, ou discrètes comme des états ; sale/propre, matin/après-midi, etc ;
- les variables de bruit, appelées également les facteurs non contrôlés comme le comportement humain, les conditions climatiques, etc.

A la fin de cette étape on doit avoir une idée très précise des sources d'insatisfaction et des paramètres qui devront être modifiés pour atteindre la performance attendue.

Pour cela nous allons déterminer toutes les causes qui ont généré les problèmes et les classer par la méthode multicritère d'aide à la décision « MACBETH ».

Le choix de cette méthode était à la base des informations utilisées à l'entrée (Input) et les résultats obtenus à la sortie (Output) de la matrice [GUITOUNI A. et al 1999], tels que :

- l'objectif dans l'étape analyser est de faire le classement des causes des dysfonctionnements, afin de détecter la cause indispensable d'apparition des problèmes et ceci pour les 5M,
- en plus, ce classement des causes nécessite l'application d'une méthode multicritère de sur classement qui se caractérise par l'identification de deux types d'informations : la première c'est que toutes les causes sont interreliées, la deuxième concerne les préférences des décideurs dans la détermination de l'ordre de priorité.

A partir de toutes ces informations et sur la base de la matrice de [GUITOUNI A. et al 1999], notre input (causes à classer) = I17 (n structures  $\{P_j, I_j\}$  de pré ordres plus un vecteur de coefficients d'importance relative (II) des attributs) du tableau des inputs, et notre outputs (causes hiérarchiser) = O5(Choix de la meilleure action ou d'une classe d'équivalence des meilleures actions) du tableau des outputs, donc selon la matrice la méthode à utiliser pour le classement multicritère c'est la méthode MACBETH.

Ainsi, la définition des inputs et des outputs permet de classer les MADMC (méthode multicritère d'aide à la décision) , ce qui aidera à la conception d'une procédure de choix d'une MADMC. En effet, cette idée est à la base de la classification des MADMC proposée dans [GUITOUNI et al 1999] qui a été mentionné précédemment et que nous avons retenu pour concevoir une procédure de choix d'une MADMC.

### **2.3.2 La méthode MACBETH**

La méthode MACBETH est en effet une procédure interactive qui consiste à demander au décideur de juger verbalement la différence d'attractivité entre deux actions  $x$  et  $y$  de  $S$  (avec  $x$  est plus attractive que  $y$ ).

La méthode MACBETH traite des informations semblables à celles récapitulées à la matrice des jugements ci-dessus. Nous avons classé les causes racine par la méthode MACBETH nous passons ensuite à l'étape améliorer.

## **2.4 Etape 4 : Innover/Améliorer**

Logiquement, après la phase d'Analyse, les variables influentes ont été identifiées, il s'agit de trouver les solutions et de les mettre en oeuvre. Il existe rarement une seule solution à une seule cause identifiée et un certain nombre d'outils sont encore à utiliser.

On peut noter principalement :

- Les séances de créativité (brainstorming) ;
- Le diagramme des affinités ;
- Les critères de décision ;
- La matrice de décision comportant les données chiffrées ;
- Le plan de contrôle des résultats à obtenir ;
- Le plan de mise en oeuvre.

La difficulté de cette étape se trouve dans le comportement des acteurs intéressés et le résultat définitif ne peut être qu'un consensus.

L'étape innover est une étape d'amélioration de processus.

Les trois étapes précédentes nous ont permis de connaître les facteurs  $X$  responsables de la variabilité de  $Y$ . Dans cette étape nous cherchons à améliorer le processus afin de le centrer et de diminuer sa variabilité.

### **2.4.1 La génération des solutions**

La première des choses à faire avec le groupe projet est de bien reformaliser ce que l'on connaît sur le processus intéressé et de vérifier la ou les causes premières. Il ne doit pas rester de points obscurs afin d'éviter d'alimenter des débats au détriment des idées.

Ce qu'il faut retenir, c'est que chaque nouvelle phase doit faire le point de la précédente afin d'éclairer éventuellement les nouveaux acteurs de cette phase, ce qui n'est pas toujours possible au début de l'étude.

Un brainstorming va permettre de faire émerger des idées de solutions. On utilisera dans cette phase toutes les techniques classiques de résolution de problèmes utilisées dans l'entreprise en fonction de la culture et des autres projets d'amélioration continue mises en oeuvre.

Il ne reste plus qu'à combiner les idées et les solutions.

De plus pour générer des solutions on utilise de nombreux outils, pour assister le groupe de Six Sigma dans son domaine, tels que:

- Le déballage d'idées ou brainstorming,
- Le vote pondéré.

L'efficacité d'un groupe de travail de Six Sigma est basée sur des principes de créativité, de discipline, de motivation et d'harmonisation. Ces derniers nous permettent d'avoir un déballage d'idées, qui se dissocie en trois phases :

- **La définition de l'objectif** : l'objectif de l'étude doit être bien formulé et écrit avant d'être accepté.
- **Le déballage** : chaque membre de groupe propose son idée, un animateur doit inscrire toutes les idées sur des bouts de papier puis, il les affiche en désordre sur un mur à l'aide d'un adhésif repositionnable. L'animateur énonce clairement les idées afin de les donner aux autres membres de groupe.
- **La classification** : il s'agit de classer les idées écrites en vrac (en désordre) au tableau puis, les regrouper d'une façon cohérente en utilisant le diagramme d'Ishikawa autour des cinq M. Ensuite on élimine les redondances et enfin on regroupe sous la forme de macro-idées les éléments les plus proches.

#### ***2.4.2 Contribution à l'élaboration d'une démarche globale d'aide à la décision pour améliorer un processus de production***

Nous entendons par « démarche globale » une approche qui puisse considérer les différentes caractéristiques d'une décision d'amélioration.

Pour servir de support à notre démarche nous avons choisi cinq décisions d'amélioration qui sont très importante pour améliorer un système de production, ce qui influe énormément sur la performance globale du système de production. Ce sont :

- Amélioration de **Milieu** (M1),
- Amélioration de **Matériel** (M2),
- Amélioration de **Méthode** (M3),

- Amélioration de **Main d'œuvre** (M4),
- Amélioration de **Matière** (M5).

Ces cinq décisions sont parmi les actions à prendre pour améliorer un système de production.

- **Contribution à l'élaboration d'une démarche séparée**

Dans cette démarche nous allons prendre la décision d'améliorer chaque M à part.

Le décideur va réagir pour l'implantation de cinq programmes d'amélioration pour se trouver à la fin devant cinq solutions optimales.

- **Contribution à l'élaboration d'une démarche intégrée**

Les cinq décisions évoquées dans la section précédente peuvent se poser simultanément. Une autre ambition de ce travail est donc de proposer une démarche d'aide à la décision qui puisse traiter ces cinq décisions, comme pour les démarches particulières liées à chacune des décisions, c'est la démarche intégrée :

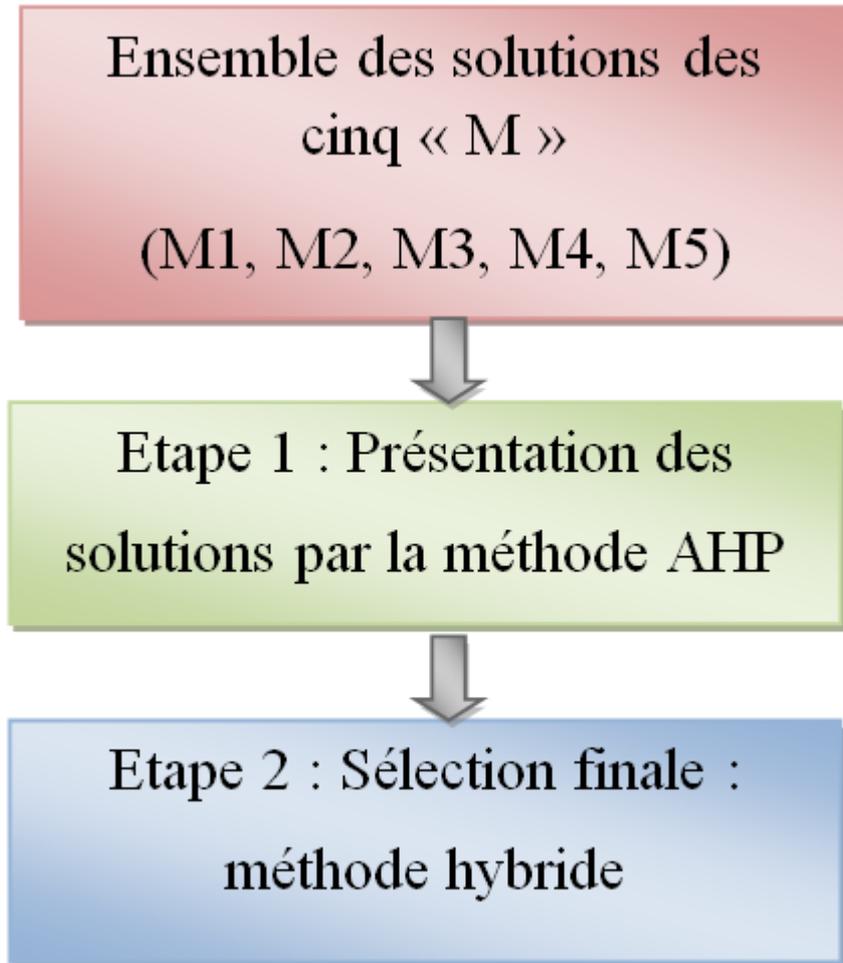
- **Préciser tous les critères de décisions pour chacune des décisions.**

1. Préciser « l'objectif » de l'entreprise vis-à-vis de chaque critère. Par exemple pour le critère du taux d'occupation d'une machine l'objectif peut être la maximisation du taux d'occupation.
2. Préciser les facteurs intervenants pour chaque objectif. Un facteur intervenant est un facteur qui influe l'objectif choisis par exemple « minimiser le taux d'arrêt des machines » (comme objectif), « maintenance » (qui est un facteur intervenant).
3. Préciser les « données » nécessaires. Les données nécessaires sont les données essentielles pour mesurer les facteurs intervenants. Par exemple étudier bien le produit client pour préparer la fiche de lancement coupe sertissage.
4. Préciser la décision influente : une décision influente est une décision qui influe les « données nécessaires ». Par exemple la décision du choix du programme d'amélioration des méthodes de travail est une décision qui influe sur le choix du programme d'amélioration de main d'œuvre.

Ainsi, cette démarche intégrée d'aide à la décision doit considérer les points suivant pour chaque décision :

- la stratégie concurrentielle de l'entreprise,
- les critères subjectifs et objectifs,
- les interactions entre ces cinq décisions.

Dans cette section, la démarche d'aide à la décision pour l'intégration des décisions d'amélioration est présentée dans la figure 58 qui montre les deux étapes principales de cette démarche.



**Figure. 58** Les trois étapes principales de la démarche d'intégrité

Une fois les solutions définies, on pourra entamer la première étape de la démarche.

- **Etape 1 : Présélection des solutions**

La première étape a pour but de préciser les solutions d'amélioration pour les cinq M. En effet dans cette étape, les solutions qui ne sont pas importantes vont être prises en compte prochainement. Cette étape de présélection diminue le nombre des solutions potentielles à examiner dans la troisième étape de la démarche. Ceci permettra au modèle mathématique de la troisième étape de trouver la solution optimale dans un délai raisonnable. Dans cette étape

nous allons appliquer la méthode AHP afin de sélectionner les meilleures solutions de chaque M.

Le choix de la méthode **AHP** est justifié par le fait que :

- l'objectif dans l'étape «Classement des solutions », est la hiérarchisation des solutions, afin de détecter un ordre de priorité des solutions pour chaque M,
- ce classement nécessite l'intégration du décideur en amont du processus de décision, ainsi que l'application d'une échelle sémantique pour le choix de proède des solutions, afin d'aider le décideur et l'orienter pour décider du degré d'importance de chaque solution.

A partir de toutes ces informations et sur la base de la matrice de [GUITOUNI A. et al 1999], notre input (solutions à classer)= I21 (n fonctions d'utilité (uj) (d'utilité (valeur) partielle) exprimées sur des échelles ratios plus un vecteur de coefficient d'importance relative (II) des attributs.) du tableau des inputs, et notre outputs (solutions hiérarchiser) = O1 (Évaluation globale: cette situation traduit la volonté de construire un critère unique de synthèse. Le score global est de niveau cardinal.) du tableau des outputs. L'intersection des inputs et des outputs selon la matrice de [GUITOUNI A. et al 1999], nous permet de choisir la méthode de sur-classement AHP pour le classement des solutions.

- **Etape 2 : Sélection finale**

Dans cette étape un modèle hybride proposé sera utilisé. Ce modèle hybride peut considérer les critères objectifs et subjectifs. Ce modèle précise les améliorations des cinq M à faire (les améliorations pour les quelles la décision n'est pas faite pour la première étape).

Dans cette étape nous allons appliquer la méthode « optimisation mathématique ».

- **Le modèle optimisation mathématique :**

Dans cette section nous allons proposer deux modèles d'optimisation mathématique.

Evidemment, nous ne pouvons pas proposer un modèle qui peut s'adopter à toutes les entreprises. Le premier modèle qui sera proposé dans cette section est un modèle de base mais par contre il dispose des propriétés mathématiques qui le rendent très intéressant. Le deuxième modèle est proposé afin de montrer quelques conditions et contraintes qui peuvent être dans un cas particulier.

- **Modèle A : Un modèle de programmation linéaire 0-1**

Dans cette section, nous allons présenter un modèle d'optimisation mathématique qui sera utilisé dans la deuxième étape de la démarche intégrée.

*Chapitre 3 : Construction d'une démarche Six Sigma basé sur Approche Multicritère d'Aide à la Décision pour l'amélioration d'un système de production*

---

Ce modèle mathématique, a pour but de proposer les solutions à faire dans un processus de production et en particulier dans un processus de coupe tous en tenant compte des 5 M de ce processus. Ce modèle mathématique tient compte de critères subjectifs et objectifs. Il permet de retenir un nombre prédéterminé des solutions pour chaque M.

Indices : i : Les solutions (i = 1 ...5),

j : Les 5 M, (j =1, 2 ,3 ,4 et 5),

d : décision d'améliorer Mj Paramètres :

uij = l'utilité obtenue si la solution i est appliqué avec succès pour Mj .

nj = le nombre des solutions pour M j.

Variables de décision :

Xijd = 1, si la solution i de Mj est appliquée avec succès et que la décision « d » d'améliorer Mj est retenue,

= 0 si non.

Zd = 1, si la décision d de Mj est retenue,

= 0, si non.

Yij = 1, si la solution i est de Mj,

= 0, si non.

Formulation :

<p>!*****  <b>! Objective function</b>                  !*****;</p> $\text{Max } U = \sum_i \sum_j \sum_k U_{ijd} X_{ijd}$ <p>!*****  <b>! Anteriority constraints</b>                  !*****;</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 10px;"> <div style="width: 80%;"> <math display="block">X_{ijd} - Z_d \leq 0 \quad \forall i, j, d</math> <math display="block">X_{ijd} - Y_{ij} \leq 0 \quad \forall i, j, d</math> <math display="block">\sum_d Z_d = 5</math> <math display="block">\sum_i Y_{ij} = n_i \quad \forall j</math> <math display="block">X_{ijd}, Y_{ij}, Z_d = 0 \text{ ou } 1</math> </div> <div style="width: 15%; text-align: right;"> <p>(1)</p> <p>(2)</p> <p>(3)</p> <p>(4)</p> <p>(5)</p> </div> </div>	
---	--

Dans ce modèle, la fonction objective maximise l'utilité totale. Ainsi les  $U_{ij}$  sont calculés à partir d'une méthode multicritère et ce en considérant les critères subjectifs et objectifs. Autrement dit, ce modèle cherche une solution ayant une valeur maximum vis-à-vis de l'ensemble des critères.

Les deux premiers critères montrent la relation entre les variables de décision. La contrainte 3 assure que le modèle choisit la décision d'améliorer  $M_i$  cela peut être  $M_1$  et  $M_2$  ou  $M_1$  et  $M_5$ , ...)

La contrainte 4 garantit que le modèle retient un nombre prédéterminé de solutions pour chaque  $M_i$ . Cette contrainte est importante pour l'entreprise parce que sans solution on ne peut pas améliorer notre processus de production.

Nous rappelons que, si  $j = 1$  et  $i = 1$ , alors la solution sélectionnée est la solution 1 de  $M_1$ .

Aussi, ce modèle propose  $n_j$  solutions pour chaque  $M_i$ , ces solutions ont été sélectionnées par la méthode multicritère d'aide à la décision AHP. Ainsi pour chaque  $M$  on a pris uniquement les cinq solutions classées les premières.

Le modèle proposé dans la section précédente est un modèle de programmation en 0-1 qui peut prendre un temps très important de calcul. Pour résoudre ce problème, nous proposons de remplacer ce modèle par « d » modèle où « d » est le nombre des décisions d'améliorations (décision d'améliorer  $M_1$ , décision d'améliorer  $M_2$ , décision d'améliorer  $M_3$ , décision d'améliorer  $M_4$  et décision d'améliorer  $M_5$ ).

Nous démontrons que ces d modèles totalement uni modulaire sont calculables par la méthode du Simplexe de programmation linéaire continue.

Nous allons présenter le concept de «Matrice totalement uni-modulaire» et ensuite nous montrons comment le modèle peut être divisé en K modèle totalement uni- modulaire.

- **Matrice totalement uni- modulaire : le modèle A**

Le modèle P1 suivant est un modèle de programmation linéaire en nombre entier :

P1 : Min  $cx$

Tel que :

$$Ax = b$$

$$x \geq 0, x \in \mathbb{Z}^n$$

Où A est une matrice  $m \times n$  entière et b est un m-vecteur entier. Les variables x sont positives et entières.

Si on relaxe la contrainte  $x \in \mathbb{Z}^n$ , on aura le modèle P2 qui est un modèle linéaire continu.

P2 : Min  $cx$

Tel que

$Ax = b$

$x \geq 0$

Nous savons qu'en pratique P2 se résout facilement par l'algorithme du Simplexe. Nous nous intéressons donc à savoir pour quelles conditions, une solution optimale de P2 est aussi la solution optimale de P1 ? Autrement dit pour quelles conditions la solution optimale de P2 est elle entière ?

En se basant sur le théorème de Hoffman et Kruskal [**OFFMAN A. et al 1956**], une solution optimale de P2 est entière, quel que soient le vecteur  $b$  à coordonnées entières et le vecteur des coûts  $c$ , si et seulement si la matrice  $A$  est totalement uni modulaire.

Une matrice  $A$  est dite « totalement uni modulaire » si toute matrice carrée extraite de  $A$ , a son déterminant égal à 0, +1 ou -1. Cela entraîne, en particulier, que les coefficients d'une matrice totalement uni modulaire sont eux même égaux à 0, +1 ou -1 puisqu'ils sont les déterminants de sous- matrices d'ordre 1.

Les théorèmes suivants nous aident à vérifier qu'une matrice est totalement uni modulaire ou non :

Le théorème de Heller et Tompkins [**HELLER I. et al 1956**] : soit une matrice de coefficient 0, +1 ou -1, ayant au plus deux coefficients non nuls par colonne ; alors  $A$  est totalement uni modulaire si et seulement si ses lignes peuvent être divisées en deux ensembles disjoints.  $I1$  et  $I2$  avec les deux conditions suivantes :

- Si deux coefficients non nuls d'une même colonne ont le même signe l'un est dans  $I1$  et l'autre dans  $I2$ .
- Si deux coefficients non nuls d'une même colonne ont des signes contraires, ils sont tous deux dans  $I1$  ou tous deux dans  $I2$ .

Le théorème de Ghouila [**GHOUILA A. 1962**] : une matrice  $A = (a_{ij})$ ,  $i \in I$ , et  $j \in J$  dont les coefficients sont égaux à 0, +1, ou -1 est totalement uni modulaire si et seulement si tout sous-ensemble non vide  $K \subset I$  peut être divisé en deux sous-ensembles  $K1$  et  $K2$  de manière que :

$$\left| \sum_{i \in K_1} a_{ij} - \sum_{i \in K_2} a_{ij} \right| \leq 1, \quad \forall j \in J$$

Transformation en « d » modèles uni modulaires. Le modèle mathématique proposé (modèle A) est un modèle linéaire en 0-1. Mais on peut le transformer en « d » modèles linéaires continus. « d » c'est le nombre des décisions d'amélioration à prendre. Nous proposons à chaque passage de fixer la valeur de d de 1 à d. Ceci permet de supprimer la contrainte numéro 3 et abandonner l'indice d dans la variable de décision  $X_{ijd}$ . Les variables  $Y_{ij}$  deviennent superflues. Nous relaxons aussi la contrainte des variables en 0 ou 1 pour que le modèle devienne un modèle continu. Mais par contre nous ajoutons une contrainte qui assure que les variables  $X_{ij}$  soient inférieures ou égales à 1. Le nouveau modèle sera le suivant :

Indices : i : Les solutions (i = 1 ...20),

j : Les 5 M, (j =1, 2, 3 ,4 et 5).

Paramètres :  $u_{ij}$  = l'utilité obtenu si la solution i est appliqué avec succès pour  $M_j$ .

$n_j$  = le nombre des solution pour  $M_j$ ,

$m_j$  = la somme des 5 M.

Variables de décision :

$X_{ij} = 1$ , si la solution i est de  $M_j$ ,

= 0, si non.

!\*\*\*\*\*  
! Objective function  
!\*\*\*\*\*;

$$\text{Max } Z = \sum_i \sum_j U_{ij} X_{ij}$$

!\*\*\*\*\*  
! Anteriority constraints  
!\*\*\*\*\*;

$$\sum_j X_{ij} = n_i, \quad \forall i \quad (1)$$

$$X_{ij} \leq 1, \quad \forall i, j \quad (2)$$

$$X_{ij} \geq 0, \quad \forall i, j$$

Par suite en utilisant le théorème de Heller et Tompkins nous pouvons démontrer que la matrice A de ce modèle est totalement uni- modulaire :

- La matrice A (selon la définition du modèle P2) de ce modèle est donnée par le tableau 21 Tous les coefficients sont 0 ou +1.

*Chapitre 3 : Construction d'une démarche Six Sigma basé sur Approche Multicritère d'Aide à la Décision pour l'amélioration d'un système de production*

---

- Dans chaque colonne se trouve au plus deux coefficients non nuls.
- On peut diviser cette matrice en deux ensembles disjoints I1 et I2. I1 correspond aux contraintes (1) et (2).
- En considérant la première condition du théorème de Heller et Tompkins, on peut constater que dans chaque colonne on trouve au maximum un seul +1 dans I1 et un seul +1 dans I2.
- Les points susmentionnés montrent que toutes les conditions du théorème de Heller et Tompkins sont valides. La matrice A de ce modèle est donc totalement uni modulaire.

$X_{11}$	$X_{12}$	...	$X_{13}$	$X_{21}$	$X_{22}$	...	$X_{25}$	...	...	$X_{i1}$	$X_{i2}$	...	$X_{ij}$	...	...	$X_{I1}$	$X_{I2}$	...	$X_{IJ}$	
1	1	...	1																	
				1	1	...	1													
										1	1	...	1							
1																1	1	...	1	
	1																			
		...																		
			1																	
				1																
					1															
						...														
							1													
										1										
											1									
													...							
														1						
															1					
																1				
																	1			
																		1		
																			...	
																				1

**Tableau. 21 La matrice A du modèle de programmation linéaire 0-1**

▪ **Modèle B : Extension de modèle A**

Dans certain cas, l'entreprise souhaite limiter la variété des solutions pour chaque M. Autrement dit, elle ne souhaite pas que l'amélioration de  $M_j$  nécessite plus de  $m_j$  solutions. Cette contrainte est traduite par la contrainte 5.

```

!*****
! Objective function
!*****;

$$\text{Max } U = \sum_i \sum_j \sum_k U_{ijd} X_{ijd}$$

!*****
! Anteriority constraints
!*****;

$$X_{ijd} - Z_d \leq 0 \quad \forall i, j, d \quad (1)$$


$$X_{ijd} - Y_{ij} \leq 0 \quad \forall i, j, d \quad (2)$$


$$\sum_d Z_d = 5 \quad (3)$$


$$\sum_j Y_{ij} = n_i \quad \forall i \quad (4)$$


$$\sum_i Y_{ij} \leq m_j \quad \forall j \quad (5)$$


$$X_{ijd}, Y_{ij}, Z_d = 0 \text{ ou } 1 \quad (6)$$


```

Ce modèle est plus complexe que le modèle A, mais nous pouvons le résoudre de manière très efficace. Pour cela nous proposons de relaxer les contraintes 3 (comme le modèle A) et ensuite de résoudre « d » fois le modèle simplifié.

Nous montrons par la suite que le modèle simplifié A, à nouveau une matrice A totalement uni- modulaire, et le Simplexe nous donneront une solution entière.

Le modèle simplifié est le suivant :

```

!*****
! Objective function
!*****;

$$\text{Max } Z = \sum_i \sum_j U_{ij} X_{ij}$$

!*****
! Anteriority constraints
!*****;

$$\sum_j X_{ij} = n_i \quad \forall i \quad (1)$$


$$\sum_i X_{ij} = m_j \quad \forall j \quad (2)$$


$$X_{ij} \leq 1 \quad \forall i, j \quad (3)$$


$$X_{ij} \geq 0 \quad (4)$$


```

Nous avons ajouté la contrainte 3 qui assure que la solution entière du Simplexe soit 0 ou 1.

Nous rappelons que le théorème de Ghouila et Hourri une matrice  $A = (a_{ij})$ ,  $i \in I$  et  $j \in J$  dont les coefficients sont égaux à 0, +1, ou -1 est totalement unimodulaire si et seulement si tout sous ensemble non vide  $K \subset I$  peut être divisé en deux sous-ensembles  $K_1$  et  $K_2$  de manière que :

$$\left| \sum_{i \in K_1} a_{ij} - \sum_{i \in K_2} a_{ij} \right| \leq 1, \quad \forall j \in J$$

Le tableau 21 qui montre la matrice  $A$  nous aide à démontrer que  $A$  est totalement unimodulaire.

On peut considérer trois parties  $A_1$ ,  $A_2$  et  $A_3$  dans cette matrice. Concernant le sous-ensemble non vide  $K \subset I$  du théorème de Ghouila et Hourri, on peut distinguer les quatre situations suivantes :

- La matrice est constituée d'éléments d'une seule partie ( $A_1$  ou  $A_2$  ou  $A_3$ ). Dans cette situation la condition spécifique de ce théorème qui est :

$$\left| \sum_{i \in K_1} a_{ij} - \sum_{i \in K_2} a_{ij} \right| \leq 1, \quad \forall j \in J$$

Sera satisfaite car dans chaque colonne de  $K$  il y a un seul coefficient de valeur 1.

- La matrice  $K$  est un sous ensemble des éléments de  $A_1$  et  $A_2$  ou  $A_1$  et  $A_3$ . Pour cette situation il est suffisant que nous attribuions un signe - aux éléments de  $A_1$ . Dans ce cas l'addition des éléments de chaque colonne de  $K$  sera 0.
- La matrice  $K$  est un sous ensemble des éléments de  $A_2$  et  $A_3$ . Pour cette situation il est suffisant que nous attribuions un signe - aux éléments de  $A_2$ . Dans ce cas l'addition des éléments de chaque colonne de  $K$  sera 0.
- La matrice  $K$  est un sous ensemble des éléments de  $A_1$  et  $A_2$  et  $A_3$ . Pour cette situation il est suffisant que nous attribuions un signe - aux éléments de  $A_1$ . Dans ce cas l'addition des éléments de chaque colonne de  $K$  sera 1.

Donc les conditions du théorème de Ghouila et Hourri sont respectées.

- **Trouver la meilleure solution**

### **A. Démarche séparée**

Comme dans l'étape de présélection nous avons classé les solutions d'amélioration nous avons décidé de choisir pour chaque  $M$  les 4 solutions classées les premières par la méthode

AHP. Selon la méthode proposée dans le modèle B, nous devons résoudre cinq fois ( $d = 5$ ), le modèle simplifié.

### **B. démarche intégrée**

Dans cette stratégie nous allons calculer les utilités U<sub>ij</sub> et, à partir du modèle mathématique B, nous trouverons la solution qui maximise l'utilité totale. En effet on multiplie la note de chaque solution vis-à-vis de chaque M par les poids des critères concernés et puis on additionne les valeurs obtenues.

## ***2.5 Etape 5 : Contrôler***

Le processus ayant été amélioré lors de l'étape 4, il convient désormais de tout mettre en oeuvre pour garantir que ces améliorations seront maintenues et que le processus ne se dégradera pas. Le but de cette étape est donc de mettre en place la structure permettant de placer «sous contrôle le processus». Il convient de bien faire la distinction entre surveillance statistique et maîtrise statistique des processus.

Et puisque les variations des éléments qui interviennent dans le processus se traduisent dans le produit final par une variabilité des caractéristiques. Il s'agit de mettre en place des cartes de contrôle pour suivre ces caractéristiques essentielles.

Les contrôles sont à deux niveaux : Technique (du type Quantitatif) pour la vérification des résultats directement opérationnels obtenus et Stratégiques (du type Qualitatif) pour la mesure des résultats au niveau comptable, financier, stratégique, ...

Les outils de contrôle utilisés dans cette phase sont les suivants :

- Les cartes de contrôle ( $\bar{X}$ -R) pour la mesure de la variabilité,
- Le Yield pour constater l'augmentation de la capacité à respecter les spécifications,
- La collecte des Données (déjà utilisé en phase de Mesure),
- La cartographie des processus (déjà utilisé en phase d'Analyse),
- Les graphiques de comparaisons (Diagramme de fréquence, Pareto),
- Diagrammes de contrôle de la qualité (PDCA),
- Economiques en identifiant l'impact des modifications sur les résultats financiers, sur les Non Valeurs Ajoutées,
- Le Benchmarking pour l'extension à d'autres processus identiques (Standardisation),
- L'élaboration du bilan du projet pour l'enrichissement de la base de données,
- L'événement de reconnaissance.

### **2.5.1 Les différentes natures de contrôle des variables**

Les natures de contrôle des variables sont de trois ordres ; les fixer, les minimiser, les standardiser.

**Les fixer**, c'est mettre en oeuvre des moyens matériels sur les équipements pour éviter les variabilités mécaniques, mettre en place des poka-yoké, c'est mieux valider les logiciels de contrôle/commande en particulier dans le domaine de l'hygiène alimentaire et la pharmacie, c'est éliminer la variation de base.

**Les minimiser**, c'est changer le processus ou l'améliorer pour qu'il soit plus robuste aux variations de bruits, c'est réduire les effets.

**Les standardiser**, c'est revoir les procédures, redéfinir les spécifications, identifier les meilleures pratiques à appliquer sur des processus identiques ou proches, mettre en oeuvre les formations nécessaires pour apporter aux acteurs les informations utiles à la maîtrise des processus.

#### **-Les Causes de défauts à contrôler**

On classifie généralement les causes communes en 10 points :

1. Oubli dans les étapes du processus	6. Erreur d'utilisation d'une pièce, d'un outil
2. Erreur dans la conduite du procédé	7. Erreur dans l'enchaînement des opérations
3. Erreur dans les réglages de base des équipements	8. Erreur dans le système de mesure
4. Manques de pièces	9. Erreur dans les opérations de maintenance
5. Présence d'impureté	10. Erreurs des opérateurs

**Tableau. 22 Classification des causes communes**

L'opérateur est justement considéré parfois comme une variable de bruit, car incontrôlable.

Les erreurs humaines se caractérisent de la manière suivante :

- Absence (et donc mise en place d'un remplaçant qui n'a pas forcément la même connaissance, ni la même formation pour conduire le processus),
- Manque de concentration, distraction, fatigue,
- Décision de faire une action personnelle sans passer par une analyse statistique du problème qui est apparu (aller directement à la solution sans réflexion préalable),
- Erreur d'identification, de lecture d'information (interface homme/machine),
- Manque caractérisé de formation (capacité à faire),

- Manque de procédures,
- Ignorance ou inapplication des procédures existantes,
- Délai de réaction trop lent devant un problème constaté,
- Actions volontaires négatives (sabotage).

#### **- Pilotage du contrôle**

Les activités préalablement décrites très orientées sur l'aspect court terme et pratique de la mesure des résultats doivent être suivies d'un complément stratégique. A partir de la décision d'amélioration et de sa mise en oeuvre, il doit être défini les points suivants, qui en fait sont le retour d'expérience du projet concerné :

- La désignation d'un propriétaire de processus (garant de la suite des résultats),
- La mise au point d'un tableaux de bord de surveillance des résultats acquis,
- La définition des moyens d'enregistrement des données,
- L'évolution des critères initiaux de sélection des projets,

Le rôle du management à ce sujet est de ne pas discuter sur le contenu du projet. Il doit analyser les résultats et faire confiance à l'équipe projet qui dans la majorité des cas, et sur la proposition du Champion, a été validée par eux. Il doit aussi être pérenne dans son suivi pour que la pression mise sur l'amélioration des résultats ne se dilue pas dans le manque de surveillance dans le temps.

La formation dans le domaine d'un projet 6 Sigma ne peut être considérée comme une formation classique. Déjà dans les faits elle n'est crédible que si un projet est lié à cette formation et qu'il amène un gain notable à l'entreprise. Les autres formations de cadres dirigeants suites aux expériences doivent suivre la même idée.

Même si un participant est satisfait d'une formation, l'objectif n'est pas atteint. C'est l'entreprise qui doit en tirer une amélioration par le niveau de connaissance qu'il a acquis et les résultats de la mise en oeuvre qu'il a enregistré dans le cadre de son action avec les acteurs concernés de l'entreprise.

Il faut aussi prendre en compte que dans les formations pointues (ce qui est la cas de la Formation Black Belt ), on ne comprend pas toujours tout sur tout et que le fait de revenir sur des sujets mal compris n'est en aucun cas dégradant. L'ISO 9001 annonce elle-même que l'erreur est acceptable . Dans le pilotage du contrôle, une étape importante est la reconnaissance et la récompense de l'équipe ayant abouti à des résultats. En fait la

récompense s'appuie sur la rémunération en fonction des résultats obtenus et la reconnaissance sur la notoriété, la valorisation personnelle.

La principale est la reconnaissance car il a été prouvé que la récompense financière n'avait qu'un effet à très court terme ce qui n'est pas le cas pour la reconnaissance sur la notoriété. Il est donc important que le management associe de manière équilibrée et reconnaissance pour récompenser les résultats enregistrés du travail accompli.

Un projet est réussi grâce aux gains dans différents domaines (certains sont directement visibles, comme la réduction des rebuts et des retouches, la réduction des stocks). Ils se retrouvent dans les résultats de la comptabilité analytique dans ce qui est couramment appelé, le Hard Saving. Parfois des effets induits entraînent des réductions de temps de traitement, des Non Valeurs Ajoutées, des non investissements par l'amélioration des processus en termes d'amélioration de la disponibilité, d'amélioration du service au client.

### **2.5.2 Les cartes de contrôle :**

Il existe un grand nombre de cartes de contrôle et tous les progiciels d'analyse statistique calculent les limites de spécifications sans peine à plus ou moins 3 Sigma par rapport à la moyenne.

Lorsque l'on analyse le comportement d'un processus (avant ou après modification), la carte ( $\bar{X}$ -R) permet de visualiser si le processus est contrôlé par l'évolution des causes communes ou non contrôlé par la présence de causes spéciales hors limites.

Le principe de base du calcul des cartes de contrôle est le suivant :

- On considère que lorsque le procédé est sur la cible, il est naturel de trouver des valeurs entre  $\pm 3\sigma$  ;
- Lorsque l'on trouve un point au-delà de cette limite, cela signifie que le processus n'est probablement plus centré sur sa cible.

Le principe des cartes de contrôle est de détecter par un outil graphique simple les cas où le procédé n'est plus sous contrôle et où il faut réagir.

Donc il faut identifier les causes des variations qui nécessitent une correction. On distingue deux types de causes :

- **les causes spéciales ou assignables** : introduisent toutes les sources de variabilité identifiables. Lors de la présence de ces causes le procédé est dit « hors contrôle ».

- **les causes aléatoires ou communes** : introduisent toutes les autres sources de variabilité non identifiables. Lors de la présence de ces causes le procédé est dit « sous contrôle ».

Il n'est pas inutile de rappeler que les causes communes sont celles qui sont inhérentes à la variabilité propre du processus, les causes spéciales sont liées à des événements extérieurs.

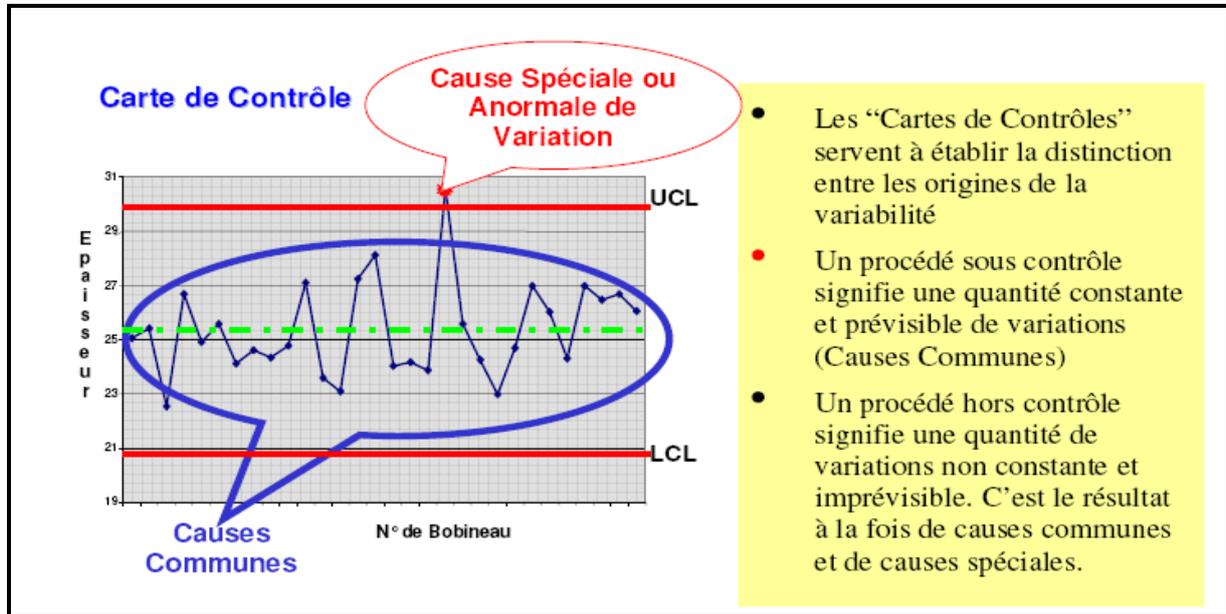


Figure. 59 Différences entre causes communes et causes spéciales

L'erreur faite régulièrement par des dirigeants d'entreprises qui analysent des données qui présentent des évolutions positives ou négatives, sont de réagir sur les responsables en critiquant leur efficacité en propre sans s'être préalablement inquiétés si cette évolution était maîtrisée en + ou - 3 Sigma dans la logique de la loi normale. Question vraisemblablement d'éducation à l'analyse des chiffres.

La présence d'un statisticien dans l'entreprise (qu'il soit Master Black Belt dans le cadre d'un programme 6 Sigma ou spécialiste) est une garantie d'analyse des données et d'aide à la décision.

## **Conclusion**

Ce chapitre a pour objectif de proposer une démarche d'amélioration d'un système de production à travers la méthode Six Sigma et A.M.C.

En effet l'aide à la décision multicritère vise à fournir à un décideur des outils lui permettant de progresser dans la résolution d'un problème de décision où plusieurs points de vue (critères), souvent contradictoires, doivent être pris en compte. Ainsi l'application de ces outils multicritères dans la méthode Six Sigma va aider le décideur à prendre les meilleures décisions d'une part, d'autre part va donner une autre vu pour la méthode Six Sigma dont laquelle on n'utilise pas uniquement les outils qualité mais aussi les outils multicritères d'aide à la décision.

L'application industrielle de l'ensemble de cette démarche sera abordée dans le chapitre 5.

# Chapitre 4

## La fonction production dans les entreprises de fabrication des faisceaux de câbles électriques pour le secteur industriel automobile

### Sommaire

---

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>173</b>
1. Le développement d'entreprise des faisceaux de câbles électriques automobiles .....	173
1.1. Pourquoi ce développement .....	174
1.1.1 Mondialisation et globalisation de la concurrence.....	174
1.1.2 Accélération des changements .....	175
1.1.3 Nécessité d'innover .....	175
1.2. Caractéristiques des entreprises des faisceaux des câbles électriques automobiles .....	176
2. L'amélioration d'un système de production complexe.....	178
2.1. Définition d'un système .....	178
2.2. Les systèmes complexes .....	179
2.3. La théorie générale de Bertalanffy .....	181
2.4. Qu'est ce que c'est un système de production .....	183
2.4.1 Les objectifs associés à la fonction de production.....	184
2.4.2 Les modèles de gestion de production .....	186
2.4.3 Structure de production multi-niveaux.....	186
3. Le système de fabrication.....	188
3.1. La maîtrise des systèmes de production.....	188

3.2. Diversité des systèmes de production .....	189
3.3. Les critères d'évaluation d'un système de production.....	191
3.4. Les méthodes analytiques .....	192
3.5. Analyse qualitative et analyse quantitative .....	193
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>194</b>

---

## **Introduction**

La fonction de production est la plus importante en économie. En effet, elle assure la combinaison de facteurs de production (main-d'œuvre, machines, matières premières, capitaux et direction). Ce sont les entreprises qui participent le plus à la production. A tous les stades de la production, les entreprises ajoutent de la valeur aux produits qu'elles fabriquent et commercialisent. C'est ce que l'on appelle la valeur ajoutée (VA).

Ainsi, la fonction production est une fonction vitale et occupe une place primordiale au sein des entreprises. Son importance est évidente : sans produit, les autres fonctions n'ont pas de justification. La défaillance et la performance insuffisante de la production peuvent en très peu de temps anéantir les efforts des autres fonctions. En effet, cette fonction a pour principale mission d'assurer la mise à disposition sur le marché, en temps voulu, des produits que l'entreprise a décidé de développer, vendre, commercialiser dans le cadre des spécifications acceptées et pour un coût qui permette de dégager une marge suffisante pour couvrir l'ensemble des autres coûts de l'entreprise [MAIMI L. et al 2007].

Dans la première partie de ce chapitre nous verrons quelles sont plus exactement les particularités du contexte actuel expliquant le développement de nouvelle entreprise de fabrication des faisceaux de câbles électriques automobiles. Puis nous détaillons 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 les particularités de la fonction production comme étant la fonction principale responsable de la qualité de fabrication des produits faisceaux de câbles électriques automobiles.

## **1. Le développement d'entreprise des faisceaux de câbles électriques automobiles**

Depuis quelques dizaines d'années, une part importante des systèmes mécaniques d'une automobile fait intervenir des systèmes électroniques. Le remplacement intégral des organes de freinage ou de direction par des systèmes "tout-électrique /électronique" - les systèmes X-by-Wire [NOUVEL F. et al 2005] - pose cependant des problèmes nouveaux. D'un point de vue économique, l'ensemble des composants et systèmes électroniques dans un véhicule

représente une part importante de son prix en sortie d'usine et a même tendance à croître rapidement [GOURET W. et al 2006]. L'évolution prévisible devrait amener à accroître encore la part de l'électronique dans le coût total du véhicule [GOURET W. et al 2006].

L'ensemble de ces améliorations a pour but d'accroître la sécurité ainsi que la fiabilité des systèmes. Ces progrès vont sans dire qu'il est impossible de multiplier le nombre d'organes électroniques sans augmenter le nombre de connexions et de réseaux dédiés pour rendre possible les communications entre les divers capteurs, actionneurs et calculateurs. À court terme, une dégradation de la fiabilité des systèmes est à craindre, liée à la multiplicité des connectiques et à un nombre excessif de câbles, engendrant un surpoids et un coût élevé.

## ***1.1 Pourquoi ce développement***

Depuis ces trente dernières années, une évolution fulgurante de l'électronique dans l'automobile est constatée. D'un point de vue économique, l'ensemble des fonctions et systèmes électroniques dans une voiture représente actuellement plus de 30% de son prix en sortie d'usine et ce pourcentage ne cesse de croître. De nos jours, le coût des systèmes électriques d'un véhicule est plus élevé que celui de la propulsion. L'évolution prévisible devrait amener à accroître encore la part de l'électronique dans le coût total de la voiture.

Les progrès de l'électronique ont pour but d'améliorer la sécurité, la fiabilité des systèmes, le confort de conduite tout en diminuant les coûts de production. A titre d'illustration, les futurs systèmes d'aide à la conduite tel que le système d'évitement d'obstacle, qui permet d'esquiver un obstacle en cas de réelle urgence influe ainsi sur le freinage ; mais aussi sur la direction. Remarquons aussi que la colonne de direction ne tend plus à être mécanique mais gérée par une transmission électronique sans fils, qui permet aussi de prémunir de risques dangereux pour le conducteur en cas de choc frontal tout en restant fiable. Toutes ces innovations devraient apparaître dans les prochaines années dans les véhicules de série. Pour généraliser ces ensembles de systèmes, il faut donc développer des solutions économiques.

### ***1.1.1 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 P. 2001].

La volonté est de grandir en se recentrant sur les activités à forte rentabilité pour accroître la productivité ; Généralement, on accroît la productivité pour augmenter la rentabilité.

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 S. 2003].

Cette multiplication et mondialisation des interactions complexifient l'environnement économique des entreprises.

### ***1.1.2 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. 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 [MONTCHAUD S. 2003].

### ***1.1.3 Nécessité d'innover***

Les efforts de productivité ont longtemps porté sur l'outil de production : comment produire, 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. L'innovation se porte sur des produits plus intelligents, plus autonomes et plus compatibles pour suivre la naissance des besoins, la complexité et l'évolution grandissante des besoins actuels. La sophistication des produits devient ainsi de plus en plus avancée en termes 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 électriques qui interagissent par l'intermédiaire de différents réseaux de communication [MONTCHAUD S. 2003].

## ***1.2 Caractéristiques des entreprises des faisceaux de câbles électriques automobiles***

Les entreprises des faisceaux de câbles électriques automobiles se caractérisent par l'importance de leurs produits. En effet le faisceau électrique d'un véhicule a pour fonctions principales d'alimenter en énergie ses équipements de confort (lève-vitres,.) et certains

## Chapitre 4 : La fonction production dans les entreprises de fabrication des faisceaux de câbles électriques pour le secteur industriel automobile

équipements de sécurité (Airbag, éclairage.), mais aussi de transmettre les informations aux calculateurs, de plus en plus nombreux avec l'intégration massive de l'électronique dans l'automobile. Ce produit est constitué de fils électriques et d'éléments de connectique. Le parcours du câblage dans le véhicule définit son architecture qui peut être ainsi complexe et surtout variée. L'assemblage fils composants est donc une tâche qui ne peut pas être automatisée, et qui pour un véhicule complet nécessite en moyenne plus de 6 heures de main d'œuvre. Il s'agit donc d'un élément parmi les plus coûteux dans une voiture.

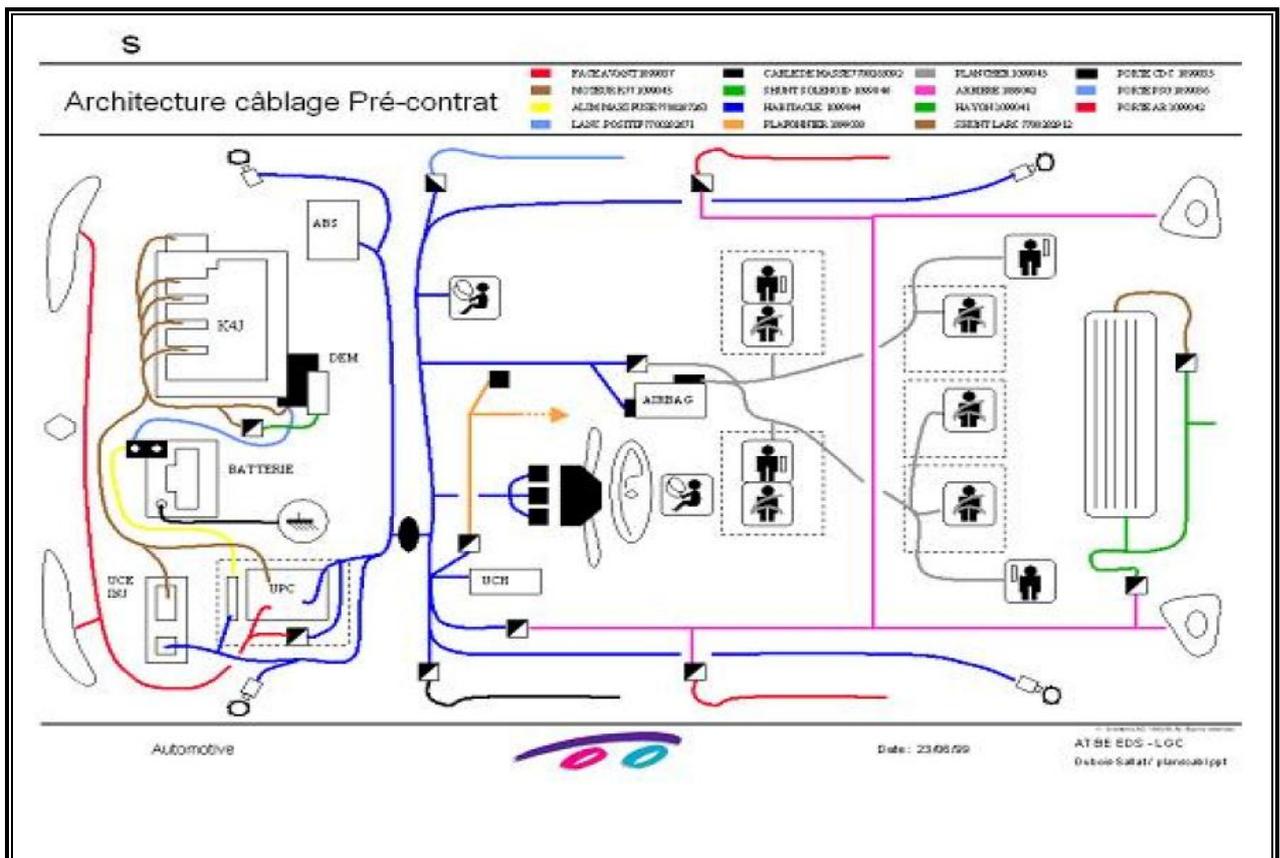
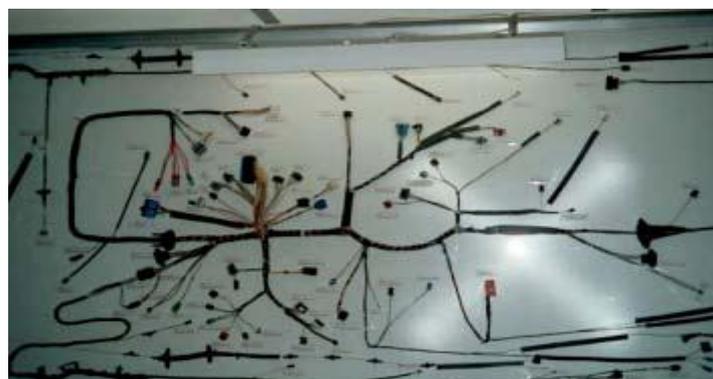


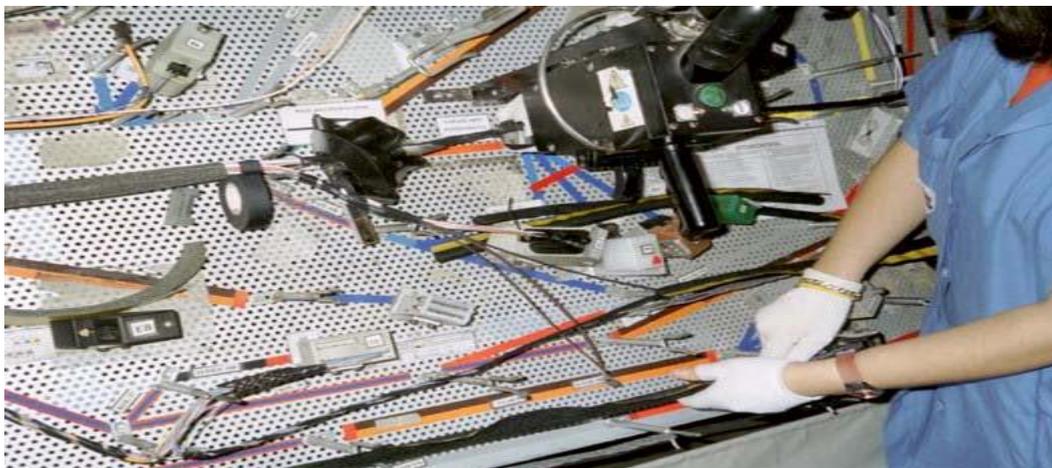
Figure. 60 Architecture des faisceaux de câblages automobile



**Photo. 1 Table d'assemblage**



**Photo. 2 Opération de contrôle**



**Photo. 3 Opération d'assemblage**

## **2. L'amélioration d'un système de production complexe**

L'amélioration d'un Système de Production en vue d'en dégager davantage de richesses est un souci constant de tout décideur. Ces systèmes doivent aujourd'hui être conduit de façon de plus en plus fine afin d'en améliorer continuellement les performances, principalement dans les domaines du coût, du délai, de la qualité des produits, voire de la réactivité ou de la flexibilité du système. Les outils traditionnels de gestion montrent aussi leurs limites au niveau de l'évaluation et le pilotage des performances technico-économique des systèmes de production.

### ***2.1 Définition d'un système***

[DE ROSNAY J. 1977] a défini un système comme : « un ensemble d'éléments en interaction dynamique organisés en fonction d'un but ». Quatre catégories de systèmes sont généralement admises : physiques, vivants, sociaux et techniques.

[GALLOU F. et al 1994] définit un système comme étant «un ensemble, formant une unité cohérente et autonome d'objets réels ou conceptuels (éléments matériels, individus, actions, ...) organisés en fonction d'un but (ou d'un ensemble de buts, objectifs, finalités, projets, ...) au moyen d'un jeu de relations (interactions mutuelles, interactions dynamiques...), le tout immergé dans un environnement. ».

Il existe de nombreuses autres définitions [LARVET P. 1994] qui s'accordent généralement sur différents points. Tout d'abord un système est un ensemble d'éléments. Selon les domaines, ces éléments sont appelés constituants, composants, objets ou agents. Un composant peut être lui-même un système. Dans ce cas on parlera alors de la caractéristique hiérarchique d'un système ou de récursions. Cet ensemble d'éléments est doté d'une structure qui précise la nature des liens (relations, interfaces etc.). Ils sont en interaction entre eux c'est-à-dire qu'ils peuvent s'échanger des informations, de la matière de l'énergie. Ils sont aussi en interaction avec l'environnement car les systèmes ne sont jamais isolés au sens physique du terme. Ainsi un système peut être sollicité par son environnement et y répondre. Il peut donc réaliser des fonctions, assurer un ensemble d'activités. Ainsi le système transforme de l'information, de la matière ou de l'énergie, il évolue dans le temps et il possède des objectifs.

## **2.2 Les systèmes complexes**

Les systèmes complexes font l'objet d'études actives dans bien des domaines : la physique, la biologie, les sciences humaines et sociales, les sciences cognitives. Il s'agit donc d'un domaine d'études très pluridisciplinaire. Les mathématiciens, les physiciens théoriciens mais aussi les informaticiens ont permis la création de méthodes, de formalismes et d'outils de modélisation. D'un point de vue terminologique, le terme "complexe" vient du latin *complexus* qui signifie embrasser et englober [DURAND D. 1998]. Un problème est qualifié de complexe lorsqu'on éprouve de la difficulté à le rendre intelligible. Cette difficulté peut provenir d'un manque de connaissance, de méthode, de modèle ou de temps. A l'origine de la complexité serait donc l'interaction et la globalité. La définition d'un système ayant été abordée précédemment, le système serait donc complexe de part la diversité et la multitude des interactions [SIMON H. 1991].

La figure 2 illustre les systèmes complexes en procédant à une décomposition topologique. Elle met en évidence les différents niveaux d'interaction qui permettent à des éléments simples d'être agrégés en des composants plus évolués qui donnent eux-mêmes naissance à des structures organisées et hiérarchisées. Les structures qui émergent alors ne peuvent pas être comprises simplement à partir des entités mises en jeu. La figure fait apparaître le nom des différents concepts inférés - Composition, Auto-organisation, Structures hiérarchiques, Emergence - au niveau où ils interviennent.

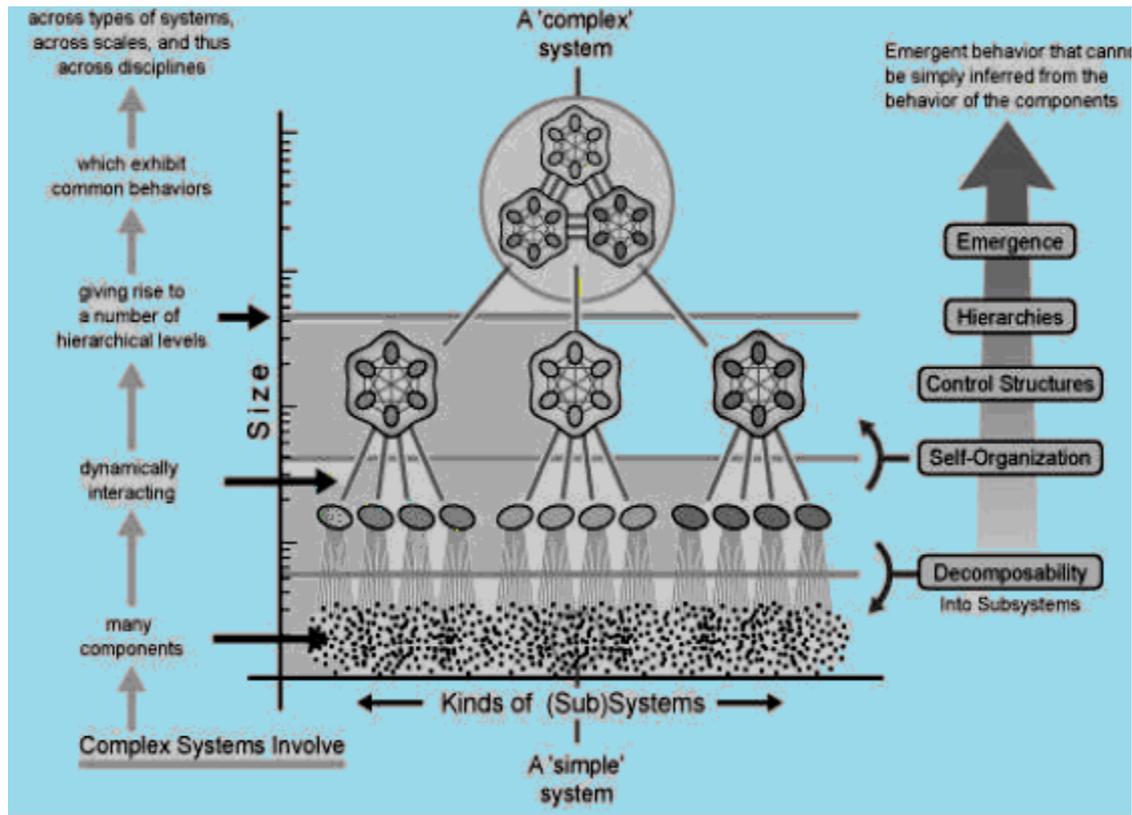


Figure. 61 Topologie d'un système complexe [CONSULTING I. 2005]

Nous adoptons comme définition d'un système complexe « un système composé de nombreux éléments qui interagissent fortement entre eux et sur leur environnement ». Ces interactions sont souvent non-linéaires et contiennent généralement des boucles de rétroaction. Au niveau global, ces systèmes se caractérisent par l'émergence de phénomènes non observables au niveau des éléments constitués : un observateur externe appréhendera et comprendra différemment le système qu'un observateur interne au système. Il se caractérise donc par l'émergence au niveau global de propriétés nouvelles et par une dynamique de fonctionnement global difficilement prédictible à partir de l'observation et de l'analyse des interactions élémentaires.

Généralement cette famille de systèmes se distingue des autres par l'impossibilité d'identifier tous les éléments et/ou de comprendre les interactions mises en jeu. Cela entraîne généralement l'absence de contrôle total et l'irréversibilité (aucune action ne peut inverser la dynamique pour retrouver avec certitude un des états d'équilibre précédents).

L'évaluation des résultats ainsi que la comparaison avec d'autres données nécessite une méthode de mesure de la performance. En d'autres termes, il convient d'avoir un moyen

objectif et fiable de comparaison et d'évaluation des résultats obtenus par une personne, un service, une entreprise...

Le but premier de l'évaluation de la performance d'un système de production est d'évaluer la contribution de la fonction production dans la performance de l'entreprise.

Une évaluation de la performance, quelle que soit son domaine d'application, peut également entraîner des conséquences positives quant à la motivation des acteurs et à la reconnaissance de leur travail. En effet, suivant les indicateurs utilisés et leurs résultats, ce travail de remise en question et d'évaluation peut permettre par exemple :

- une meilleure reconnaissance des acteurs (permet de promouvoir les réussites), meilleure crédibilité,
- un encouragement à « faire mieux »,
- d'établir des règles de base pour le travail,
- de motiver les acteurs (disposer d'un moyen de sanction et de récompense),
- de réorganiser le travail quand les résultats sont insuffisants,
- meilleure communication,
- meilleure prise de décisions,
- rendre les résultats transparents.

Ces conséquences peuvent elles même être à l'origine de la création du système d'évaluation de la performance [CONSULTING I. 2005]. En effet, il est important de déterminer les éléments qui ont induit la mise en place d'un système d'évaluation de la performance. Ceux ci traduisent les objectifs réels de la démarche de mesure de la performance qui peuvent être non seulement un besoin de contrôle mais aussi une valorisation du travail et de la fonction en général.

### ***2.3. La théorie générale des systèmes de Bertalanffy :***

Bertalanffy s'intéresse à la conception de l'organisme comme système ouvert. Il participe à l'émergence de la théorie « holiste » de la vie et de la nature. Sa théorie de la biologie est à la base de sa théorie générale des systèmes. C'est dans ce cadre que le scientifique est amené à explorer les divers champs d'application de sa théorie – psychologie, sociologie ou histoire – comme autant de niveaux d'organisation. Le paradigme systémique conçoit à la fois la matière et l'esprit comme les éléments indissociables d'un processus évolutif qui se développe de façon non-linéaire dans un système complexe. Par « théorie générale des systèmes », il ne faut donc pas entendre une théorie particulière (comme la théorie des

nombres complexes), mais un modèle pouvant s'illustrer dans diverses branches du savoir (comme la théorie de l'évolution). [BERTALANFFY L. 1993]

Il y a en fait trois niveaux d'analyse à distinguer :

- la science des systèmes, consistant à la fois dans une étude des systèmes particuliers dans les différentes sciences et une théorie générale des systèmes comme ensemble de principes s'appliquant à tous les systèmes. L'idée essentielle ici est que l'identification et l'analyse des éléments ne suffisent pas pour comprendre une totalité (comme un organisme ou une société) ; il faut encore étudier leurs relations. Bertalanffy s'est attaché à mettre en lumière les correspondances et les isomorphismes des systèmes en général : c'est tout l'objet d'une théorie générale des systèmes [ BERTALANFFY L. 1993].
- la technologie des systèmes, concernant à la fois les propriétés des hardwares et les principes de développement des softwares. Les problèmes techniques, notamment dans l'organisation et la gestion des phénomènes sociaux globaux (pollutions écologiques, réformes éducation, les régulations monétaires et économiques, relations internationales), constituent des problèmes incluant un grand nombre de variables en interrelation. Des théories « globales » comme la théorie cybernétique, la théorie de l'information, la théorie des jeux et de la décision, la théorie des circuits et des files d'attente, etc., en sont des illustrations. De telles théories ne sont pas « fermées », spécifiques, mais au contraire interdisciplinaires [BERTALANFFY L. 1993].
- la philosophie des systèmes, promouvant le nouveau paradigme systémique, à côté du paradigme analytique et mécaniste de la science classique. La systémique constitue, selon les propres termes de Bertalanffy, « une nouvelle philosophie de la nature », opposée aux lois aveugles du mécanisme, au profit d'une vision du « monde comme une grande organisation ». Une telle philosophie doit par exemple soigneusement distinguer systèmes réels (une galaxie, un chien, une cellule), qui existent indépendamment de l'observateur, systèmes conceptuels (théories logiques, mathématiques), qui sont des constructions symboliques, et systèmes abstraits (les théories expérimentales), comme cette sous-classe particulière des systèmes conceptuels qui correspondent à la réalité. A noter, à la suite des travaux sur la psychologie de la forme et les déterminismes culturels, que la différence entre systèmes réels et systèmes conceptuels est loin d'être tranchée. Cette ontologie des

systèmes ouvre donc sur une épistémologie, réfléchissant sur le statut de l'être connaissant, le rapport observateur/observé, les limites du réductionnisme, etc. L'horizon ultime est alors de comprendre la culture comme un système de valeurs dans lequel l'évolution humaine est enchâssée [BERTALANFFY L. 1993].

## ***2.4. Qu'est-ce qu'un système de production ?***

La notion de système de production doit être prise au sens large de système industriel manufacturier ou de processus à caractère discret, continu ou hybride et doit intégrer les points de vue sociaux, économiques, technologiques et environnementaux. Elle doit aussi intégrer la notion de production de services (hôpitaux, banques,...) et peut inclure le secteur du bâtiment.

Le système de production peut être :

- constitué par un ensemble de ressources humaines, techniques et financières,
- fonctionnant pour sa propre pérennité, le bien de ses membres, de ses utilisateurs, de la société en général,
- réalisant des produits matériels (biens) ou immatériels (services) [HENNET J. 2001 a].

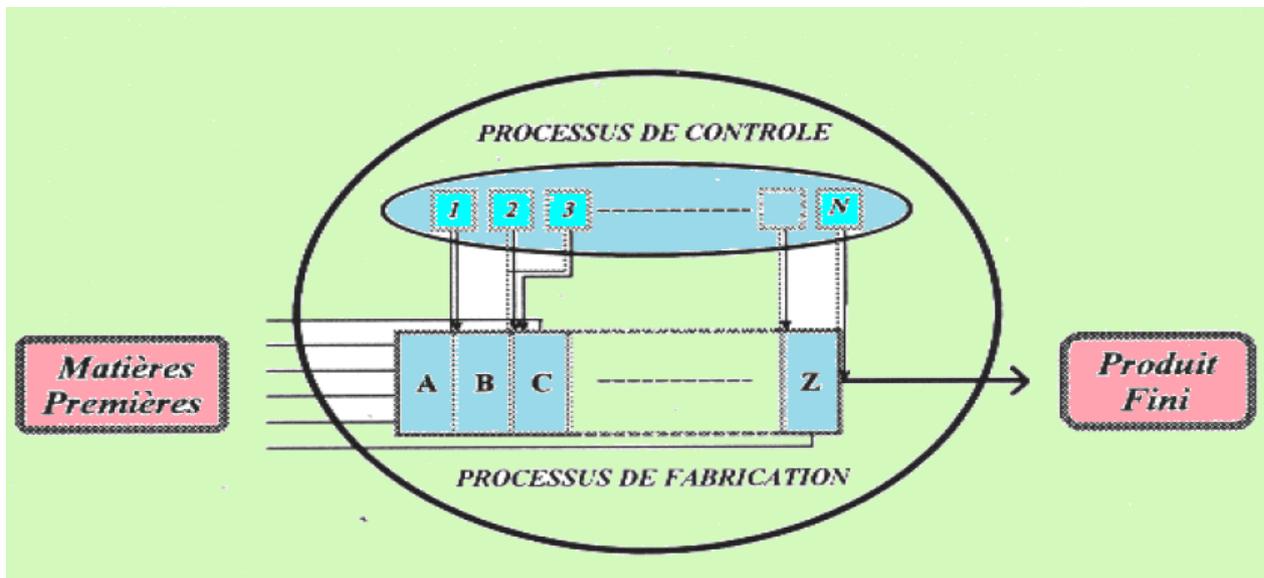
Si l'on considère qu'une entreprise utilise des ressources, telle la matière première, la main d'œuvre et les machines pour transformer la matière première en produits finis satisfaisant ses clients en leur apportant de la valeur ajoutée, alors le système de production est l'ensemble des pratiques, des règles, des outils et méthodes qui forment la culture industrielle de l'entreprise. Ces pratiques, règles, outils et méthodes permettent à la main d'œuvre de faire bon usage des machines et matières afin de produire de manière efficiente les produits attendus par les clients.

Le système de production permet de structurer la culture industrielle et de la partager, d'aligner toutes les unités et tous les personnels sur une même vision, d'avoir une approche uniforme de l'organisation est de mettre en œuvre les mêmes pratiques.

D'un point de vue systémique, il est classique de décomposer le système « entreprise » en trois sous-systèmes qui coopèrent :

- le **sous-système physique** représentant le système opérant,
- le **sous-système d'information** permettant l'acquisition, le traitement et la gestion des données du système et de son environnement,

- le **sous-système de décision** qui pilote (identifie, analyse et corrige les dérives en proposant des actions correctives ou préventives) le système physique.



**Figure. 62** Processus de production

Le système de production décrit l'ensemble du processus grâce auquel l'entreprise produit un bien ou un service apte à satisfaire une demande à l'aide de facteurs de production acquis sur le marché [CHELBI A. et al 2006]. Dans le cadre d'une entreprise, le système de production, outre sa finalité première qui est de produire un bien économique, cherche à satisfaire d'autres objectifs secondaires :

#### **2.4.1 Les objectifs associés à la fonction de production**

- **Objectif en termes de quantités produites :**

La fonction de production doit permettre à l'entreprise de satisfaire la demande qui lui est adressée ce qui suppose que l'entreprise adapte sa capacité de production au volume des ventes. Ceci passe par des actions visant à maintenir en l'état les capacités productives ou par la mise au point de plans d'investissements en capacité.

- **Objectif en termes de qualité :**

Les biens économiques produits doivent être de bonne qualité, c'est-à-dire doivent permettre de satisfaire les besoins de la clientèle. Mais la production doit aussi être de qualité en termes d'utilisation de ressources afin de respecter le critère d'efficacité attaché au système productif. Le système productif doit donc être économe en ressources et constant en terme de qualité.

- **Objectif de coût :**

Le système productif adopté par l'entreprise doit proposer les plus faibles coûts de production possibles de manière à garantir la compétitivité de l'entreprise. De plus, les coûts de production calculés doivent aussi être mis en relation avec les coûts de production prévus par le centre opérationnel. Sur la longue période, cet objectif de coût se traduit par la recherche permanente de gains de productivité afin de détenir ou de conserver un avantage compétitif coût pour l'entreprise.

- **Objectif en termes de délai :**

Le système de production doit certes produire, mais dans des délais raisonnables, c'est-à-dire en conformité avec le niveau de la demande à laquelle doit faire face l'entreprise. Ceci suppose la mise en place d'un mode de production réactif qui permettra soit d'éviter des stocks de biens finaux, soit de ne pas connaître de goulets d'étranglement. En terme de productivité, l'objectif de délai signifie aussi réduire les délais de fabrication.

- **Objectif de flexibilité :**

Le système productif doit être flexible soit pour pouvoir s'adapter aux variations de la demande, soit pour tenir compte des évolutions de l'environnement productif de l'entreprise (innovations technologiques...), soit pour permettre une production simultanée de plusieurs types de produits différents en même temps.

- **Minimiser les stocks intermédiaires**

A chaque niveau de fonctionnalité, les différents intervenants ne cernant pas de manière précise les flux et l'ensemble des paramètres entrant dans un processus complexe de fabrication, ne cherchent pas ou ne peuvent pas optimiser les stocks de matières et pièces en cours de fabrication ou d'assemblage. Une tendance naturelle, mais coûteuse, est d'accroître les quantités de produits intermédiaires pour éviter toute rupture d'enchaînement.

- **Optimiser l'utilisation des moyens**

L'adéquation des charges et des capacités est un problème important, qui nécessite des outils d'aide au diagnostic et d'analyse. Il faut en particulier, optimiser en permanence la charge des moyens chers et détecter la présence de goulots d'étranglement limitant le débit de sortie des produits. Un goulot d'étranglement ou goulet est un moyen de production dont la capacité est inférieure à la charge résultant d'une demande [MAIMI L. et al 2007].

### **2.4.2 Les modèles de gestion de production**

Les modèles permettant de représenter les activités de production, de transfert et de stockage dans un atelier de production manufacturière relèvent de deux approches différentes et complémentaires : l'approche système et l'approche produit.

Dans l'approche " système ", on s'attache principalement à décrire le fonctionnement dynamique des machines et de toutes les ressources qui contribuent à la production: opérateurs, robots, chariots, palettes,... Cette approche est généralement utilisée en automatisation et évaluation de performance d'ateliers.

L'organisation des activités dans une entreprise réseau fait maintenant appel à de nouveaux supports de communication et de traitement : ERP (Entreprise Ressource Planning), APS (Advanced Planning and Scheduling), Gestion des connaissances, workflow,...

Plusieurs types de modèles permettent de décrire les composantes d'une entreprise réseau et la dynamique d'élaboration de projets, d'organisation des processus et de suivi des activités:

- les modèles semi-formels, comme UML (Unified Modelling Language), SADT (Structured and Analysis Designing Technique), qui permettent de représenter différentes activités, leurs flux d'entrées et de sorties, informationnels et matériels, à différents niveaux de détail;
- les modèles formels, comme les automates, les réseaux de Pétri et les réseaux de files d'attente, qui permettent d'évaluer analytiquement les performances de systèmes existants ou à concevoir [CHELBI A. et al 2006] ;

L'approche " produits " nous semble bien adaptée à la modélisation structures de production multi-niveaux. Dans ce cadre, nous nous intéressons principalement à la nature des produits, aux différentes étapes de fabrication avec, pour chaque étape, la caractérisation des flux de produits en entrée et en sortie, les délais et les stocks. Cette approche correspond à une vision plus économique, voire gestionnaire de l'atelier [HENNET J. 1998].

### **2.4.3. Structure de production multi- niveaux**

#### **• Une approche intégrée en planification de production**

La complexité croissante de l'industrie manufacturière moderne tient principalement au caractère de plus en plus réparti de son organisation, lié en partie à la spécialisation des métiers et à l'optimisation des coûts. Dans les approches modernes, planification et réactivité sont de mieux en mieux associées en tant qu'approches complémentaires permettant d'assurer suffisamment d'autonomie aux niveaux opérationnels par la construction de plans suffisamment robustes. Un plan de fabrication doit en effet réagir aux données courantes de

production, de stockage et de demande. Mais les décisions qu'il génère doivent aussi prendre en compte l'évolution future du système en intégrant les données prévisionnelles. Cette intégration doit porter sur les deux composantes fondamentales de toute prédiction : le prévisible et l'aléatoire. Une bonne connaissance du système manufacturier et du carnet de commandes est déterminante pour l'optimisation du plan en début d'horizon. Mais le caractère incertain des données futures, conjugué à la nécessité de leur prise en compte dans le plan, incitent à combiner les outils de planification en boucle ouverte et en boucle fermée [HENNET J. 2001 b].

- *Planification optimale en boucle ouverte*

La formulation linéaire classique du problème de planification optimale, sous contraintes de satisfaction des demandes et de capacités de production, a été étendue, dans le cadre des structures de production multi-étapes. Les extensions ont porté principalement sur l'addition de conditions terminales, la représentation des ruptures de stocks et l'intégration dans le modèle des temps de cycle (durées de fabrication) de chaque produit, primaire (durée d'approvisionnement), intermédiaire ou final. Le problème ainsi formulé permet d'optimiser la production sur le début de l'horizon de planification, durée pendant laquelle le carnet de commande est fixe et connu. Les conditions terminales imposent l'appartenance de l'état final au domaine invariant associé au régime permanent, supposé aléatoire mais stationnaire [HENNET J. 2001 a], [HENNET J. 2001 b].

- *Planification robuste en boucle fermée*

Adaptabilité et robustesse étant des objectifs fréquemment antagonistes, il est difficile de concilier la réactivité conjoncturelle et l'insensibilité aux perturbations aléatoires. La voie explorée dans nos travaux est celle de la planification en boucle fermée avec atténuation de perturbations aléatoires bornées. L'approche par invariance positive de polyèdres permet de traiter ce problème sous contraintes sur les capacités de production et de stockage de façon numériquement efficace. Le problème de planification de production est traduit en un problème de commande robuste par retour d'état, pour lequel l'état du système est décrit par les valeurs courantes des stocks et des lancements de fabrication, ainsi que les valeurs passées des lancements de fabrication, permettant de représenter les durées de fabrication comme des retards. Une approche sous-optimale à coût garanti avec construction de lois de commande linéaires fournit des solutions simples et faciles à mettre en œuvre [HENNET J. et al 1998], [HENNET J. 1999]. Une voie alternative avec résolution d'inégalités matricielles linéaires a

aussi été testée. Elle donne des résultats satisfaisants mais reste limitée à des systèmes de production peu complexes [HENNETJ. et al 1998].

### **3. Le système de fabrication**

Le système de fabrication est composé de **ressources** et **d'entités**. Les ressources comprennent les machines, les stocks, les opérateurs, les moyens de transfert... et les entités comprennent les produits, les matières premières, les pièces, les lots...

L'analyse des composantes d'un système de fabrication montre que les ressources présentent simultanément un aspect « machine » et un aspect « stock ». En effet, une machine peut présenter un aspect « stock » dans des conditions de blocage. Les stocks et les moyens de transfert présentent un aspect « machine » si le temps de transit n'est pas nul. Selon ce point de vue, un système de fabrication est un ensemble de ressources qui effectuent des opérations de transformation sur les entités. Les ressources peuvent être identifiées par deux types :

- ***Les ressources principales***

(Machines, robots, moyens de transfert, stocks,...) qui sont actives et qui ont une certaine autonomie vis-à-vis du reste du système. Elles peuvent évoluer dans certaines limites, indépendamment du reste du système ;

- ***Les ressources auxiliaires***

(Outils, palettes,...) qui sont passives et qui permettent à des ressources principales d'accomplir une opération. Ce type de ressource est caractérisé par son exclusivité ou sa partageabilité [MAIMI L. et al 2007].

#### ***3.1 La maîtrise des systèmes de production***

Maîtriser un système de production c'est supposer que celui-ci est totalement contrôlé, appréhendé, piloté,... Un système qui subit une dérive, suite à l'arrivée d'un aléa, et remettant en cause l'objectif initial, est un système dont la maîtrise n'est pas complètement assurée. Ainsi, la maîtrise des systèmes de production consiste à assurer, en permanence, une utilisation optimale de l'ensemble des ressources de production et une réalisation bonne et dans les délais des produits. Cet exercice est guidé (piloté) par un ensemble de règles dont les décisions dépendent des informations actualisées sur l'état du système à un instant donné. Ainsi, la maîtrise d'un système de production passe nécessairement par une bonne acquisition de l'information et une bonne capacité de prise de décision en cas de nécessité [AFNOR 1988].

La maîtrise d'un système de production est une tâche ardue et difficilement réalisable pour des raisons de natures différentes (technologique, organisationnelle, décisionnelle, dynamique...). De ce fait, la maîtrise du système est conditionnée par plusieurs paramètres et dépend généralement de différents aspects :

- **Les paramètres** : qui conditionnent un système de production sont très nombreux. Il y a des paramètres physiques liés aux ressources et produits, des paramètres organisationnels, des paramètres décisionnels, des paramètres de gestion... ;
- **La dynamique** : un système de production n'est ni linéaire ni permanent. Le système est soumis continuellement à des risques et des incertitudes qui surviennent de tout bord (clients, prévisions, pannes, absentéisme, délais, qualité...);
- **La distribution** : un système de production est un système de type **distribué** où des tâches multiples sont réalisées simultanément, des opérations de synchronisation et de partageabilité sont souvent nécessaires à accomplir ;
- **Les objectifs** : les **objectifs** des différentes fonctions du système sont souvent antagonistes. La satisfaction d'objectifs élémentaires ne s'inscrit pas nécessairement dans la satisfaction d'objectifs globaux [AKROUT M. et al 2009].

### ***3.2 Diversité des systèmes de production***

Actuellement, toute entreprise se doit d'être plus performante et d'avoir un niveau supérieur, sur le plan technique et économique, aux entreprises concurrentes. L'amélioration de la gestion de production est à la base de toute recherche dans le domaine de la productivité.

La productivité est la clef de la survie et du développement des entreprises industrielles.

La loi du marché nécessite une remise en cause des produits fabriqués et il n'est plus possible d'investir d'importantes sommes pour élaborer puis vendre un produit.

La concurrence exige que l'entreprise se dote d'un système de production efficace qui réagisse rapidement aux contraintes du monde environnant et en particulier aux exigences et évolutions du marché.

Deux types d'évolutions non antagonistes, bien au contraire, semblent émerger pour tenter de répondre au problème de la survie de l'entreprise :

- Intégration cohérente de la gestion de production avec une importance particulière pour la transmission des informations et de la communication ;
- Automatisation de la fabrication pour l'amélioration de l'exécution des tâches et de l'ensemble des flux physiques [MAIMI L. et al 2007].

- ***Production unitaire***

Ce type de production appelé aussi projet dans le cas d'une unité importante de construction est celui de la production artisanale et aussi celui de la réalisation de grands ouvrages [AFNOR 1988]. Leur point commun est la taille du produit qui oblige à tout. Du fait même de la taille du produit par rapport aux moyens mis en œuvre et de la production sur site, on s'efforce en général d'adapter l'outil de production au produit à construire [AKROUT M. et al 2009]. Le problème de la production est, dans ce cas essentiellement, de réunir à chaque étape du projet tous les moyens nécessaires. La technique principalement utilisée pour coordonner ces moyens est la méthode PERT (Program Evaluation Review Technique) et le CPM (Critical Path Method) [ROY B. 1970].

- ***Production en petite et moyenne série***

Ce type de production, que l'on qualifie aussi parfois de production par lots [AFNOR 1988], se caractérise par la production des produits de taille suffisamment modestes. Le procédé de fabrication d'un produit est, dans ce cas, exprimé par la gamme de fabrication ou routage. [AKROUT M. et al 2009].

- ***Production en grande série***

Ce type de production est aussi parfois qualifié de production de masse. En effet, si le nombre de produits identiques à fabriquer à la suite augmente suffisamment, il est alors intéressant de constituer des installations dédiées. Une chaîne de production représente un ensemble de machines différentes disposées dans l'ordre même dans lequel on doit effectuer les opérations aboutissant à l'élaboration du produit. Dans ce type de production les temps d'attente ainsi que les temps de transfert entre machines sont fortement diminués. Un certain nombre de problèmes se pose tout de même pour que ces conditions soient réunies et que les stocks intermédiaires soient le plus faible possible. En effet, il faut que les machines aient le même rendement et le même débit et que les problèmes des aléas puissent être résolus rapidement avant d'entraîner l'arrêt complet de la chaîne. Toutes ces conditions font que généralement il est nécessaire d'avoir une surcapacité en ressources humaines et matérielles impliquant des investissements importants.

Suivant l'importance de la série et la valeur du produit, la chaîne de production peut être continue ou discontinue, complète ou partielle [AKROUT M. et al 2009]. Une chaîne est discontinue lorsque l'on aura pu installer quelques machines en chaîne mais que certains des traitements se feront au sein de groupes de machines en amont et en aval de cette chaîne. Une

chaîne est partielle si les gammes des produits traitées par celle-ci sont analogues mais pas rigoureusement identiques et si on peut avoir les mêmes séquences d'opérations mais avec des temps opératoires différents. Il faut alors pouvoir absorber des variations de la charge par la mise en place de stocks intermédiaires.

- ***Production en continu***

La production en continu est en fait un cas particulier de la production en grande série. Pour cette raison, on trouve parfois une classification voisine en trois types de production : unitaire, discontinue et continue. Une chaîne parfaitement équilibré, c'est-à-dire pour laquelle il n'y a plus de stocks intermédiaires et pour laquelle toutes les machines qui la composent ont le même débit, est une véritable production en continu. Cependant, traditionnellement, on réserve ce terme au cas où les matières et les produits se présentent sous forme liquide (ou du moins pouvant circuler dans des canalisations) ou sous forme gazeuse. Ce type de production concerne par exemple la production en chimie, ou en industrie du verre et du ciment. Il fait souvent intervenir des matières premières [AKROUT M. et al 2009].

### ***3.3 Les critères d'évaluation d'un système de production***

La conception et l'exploitation de ces systèmes nécessite des techniques d'évaluation se basant sur deux aspects principaux : la performance et la sûreté de fonctionnement.

- ***La performance***

Dans le domaine industriel la performance peut être définie comme étant un attribut mesurable par lequel se définit la qualité d'un produit ou la rapidité d'un service.

Elle est liée à tout le cycle de vie du système de production,

- à sa productivité ;
- aux coûts de production ;
- aux délais de livraison ;
- à la qualité de production ;
- Etc.

La mesure quantitative de la performance économique reste très souvent l'élément principal qui guide l'évaluation de système de production [MONTES F G L. et al 2003]. La rentabilité ou le rendement d'un processus de fabrication peut aussi s'analyser en termes de formation de résultat et en termes de ratios caractéristiques.

- ***La sûreté de fonctionnement***

La sûreté de fonctionnement permet d'identifier le degré de fonctionnement que l'on peut attribuer à un système dans le cadre de la mission qu'il doit assurer. Elle est liée à tout le cycle de vie du système de production,

- sa disponibilité ;
- la fiabilité ;
- la maintenabilité de ces machines [**POINT G.2000**] ;
- Etc.

La sûreté de fonctionnement consiste à connaître, évaluer, prévoir, mesurer et maîtriser les défaillances des machines. Elle se caractérise par l'étude structurelle (statistique) et dynamique des systèmes du point de vue prévisionnel mais aussi opérationnel et expérimental en tenant compte des aspects probabilistes et conséquences des défaillances [**BIEBER R. et al 2001**].

Les mesures directes sont pratiquées directement sur le système réel ou sur une maquette ou un prototype physique représentant ce système. Ces simulations en grandeur réelle sont réalisées quand elles ne peuvent être remplacées par des simulations informatiques, le système étant très complexe pour être remplacé par un modèle fiable. La réalisation de mesures directes sur des systèmes de production ne peut être acceptée que dans le cas d'une démarche de progrès, d'amélioration continue ou de pilotage par indicateurs de processus. Les mesures directes ne peuvent être pratiquées dans le cas de systèmes non existants et si la réalisation de prototypes physiques coûte trop chère. Dans plusieurs cas, les autres méthodes permettent avec des hypothèses suffisantes d'évaluer la performance de ces systèmes avant que la réalisation soit engagée.

### ***3.4 Les méthodes analytiques***

Les fondements des méthodes analytiques sont à la base d'outils assez pratiques, fréquemment utilisés dans l'évaluation des performances des systèmes de production. Ces méthodes exigent qu'un modèle mathématique soit d'abord trouvé pour représenter le système étudié et que l'on dispose des outils mathématiques qui permettent d'étudier ce modèle. Une démarche analytique se décompose en trois étapes :

- Recherche d'une approche analytique adéquate (modèle mathématique qui s'adapte au cas étudié) ;

- Développement du modèle (émission des hypothèses adaptatives du système réel à la théorie adoptée et déduction du modèle) ;
- Implémentation, utilisation et exploitation du modèle.

Les techniques permettant d'étudier de manière analytique un système de production sont nombreuses telle que : [PROTH J. et al 1987]

- la programmation linéaire consiste à optimiser une fonction objective sous certaines contraintes linéaires conduisant à une solution statique,
- la programmation dynamique ou il faut trouver une solution optimale à partir de solutions optimales partielles comme dans le cas d'un programme PERT,
- les chaînes de Markov sont utilisées dans la modélisation des systèmes stochastiques et dans lesquelles on définit l'état d'un système par un comportement entièrement probabiliste,
- les graphes à potentiels de tâches et l'algèbre des diodes nécessitent de connaître les séquences d'activités pour tous les objets considérés au sein du système,
- la théorie des files d'attente consiste à représenter le système sous forme d'un réseau de serveurs, de zones d'attente et de clients,
- les réseaux de Pétri constituent un outil graphique basé sur deux sortes de nœuds, les places et les transitions. A partir de ce graphe, on déduit des équations qui décrivent les caractéristiques du système (vivacité, synchronisation,...) [COHEN G. et al 1983].

### ***3.5 Analyse qualitative et analyse quantitative***

La phase analyse est une étude des propriétés d'un modèle pour en déduire des propriétés associées du système initial. Il existe deux types d'analyse :

- ***L'analyse qualitative :***

A partir de modèles de type événementiel comme les réseaux de Petri ou les automates on peut étudier des questions telles que [DEMRI A. et al 2007] :

- les possibilités de blocage du modèle, généralement révélatrices d'erreurs de conception dans le système réel,
- certaines propriétés d'atteignabilité pour des états donnés du système,
- la détermination de certains invariants du modèle qui ont généralement des propriétés physiques intéressantes,

- la bornitude des états du modèle dont l'absence révèle généralement une possibilité d'explosion du nombre de certaines entités dans le système réel,
- la possibilité de construire une commande imposant au système un comportement décrit par un cahier des charges.
- *L'analyse quantitative ou évaluation des performances*

Ce sont des méthodes qui permettent de connaître a priori le comportement d'un système de production pour une configuration donnée. Le comportement d'un système de production est défini par des performances du type : production maximale, encours, temps de réponse, temps d'attente des demandes [KAPLAN R. et al 1992]. Ces performances sont calculées pour une configuration donnée par des caractéristiques sur les machines (nombre de machines, taux de panne), sur le routage des pièces, sur l'environnement (arrivée des pièces, des demandes), ...

Pour évaluer les performances d'un système de production, deux approches peuvent être utilisées: la simulation ou le recours à des méthodes analytiques [CHOW WS. et al 2001].

## **Conclusion**

La production est actuellement, et pour longtemps encore, au centre des préoccupations des organismes industriels, qui fournissent des produits destinés à satisfaire les besoins des clients. La performance globale du procédé et sa production dépendent d'une part des caractéristiques des produits intermédiaires et d'autre part des paramètres de fonctionnements de processus de fabrication. Ainsi, la maîtrise et l'amélioration sont toujours le résultat de plusieurs décisions appuyées sur des paramètres mesurés, évalués ou estimés. En effet, dans le cas de fabrication complexe, un temps considérable est perdu en tâtonnements pour trouver le bon réglage. En outre l'amélioration de la productivité est obtenue suite à l'utilisation des outils de pilotage qui permet d'enregistrer les informations pour piloter donc un gain direct pour l'opérateur. Ainsi faire fonctionner un système de production c'est dimensionner et gérer au mieux ces ressources pour fabriquer des produits de façon à satisfaire le client tout en respectant les règles opératoires.

# Chapitre 5

## Application industrielle

### Sommaire

---

<b>INTRODUCTION</b> .....	197
1. Entreprise SIDELEC international .....	197
1.1. Présentation de SIDELEC international .....	197
1.2. Organigramme de l'entreprise .....	199
1.3. Etude et présentation de l'existant .....	199
1.3.1 Présentation des différents services au sein de SIDELEC international .....	199
1.3.2 Description du flux informationnel entre ces services .....	200
1.4. Processus de fabrication .....	202
1.4.1 L'opération de sertissage .....	202
1.4.2 L'épissure .....	203
1.4.3 L'encliquetage .....	203
1.4.4 L'habillage .....	204
1.4.5 Le montage des agrafes .....	204
1.4.6 La soudure ultrason .....	205
1.4.7 Le contrôle électrique .....	205
1.5. Découpage de l'atelier de production par zones .....	206
1.5.1 Zone de coupe .....	206
1.5.2 Zone de préparation .....	206
1.5.3 Zone d'assemblage .....	207
2. Présentation des produits de l'entreprise SIDELEC international .....	208
3. Expérimentation du modèle pour l'amélioration du processus de production (processus coupe) sous l'initiative de l'application de la méthode six sigma et approche multicritère d'aide à la décision .....	211

3.1. Construction de la démarche à suivre .....	212
3.2. Etape : Définir .....	214
3.2.1 Principe de fonctionnement.....	214
3.2.2 Description des 5M et identification des problèmes .....	218
3.2.3 Définir l'objectif à atteindre .....	226
3.3. Etape : Mesurer.....	227
3.3.1 Etude de l'aptitude du processus coupe .....	228
3.3.2 Cartes de contrôle .....	230
3.3.3 Capabilité de procédé de processus coupe .....	231
3.3.4 La capabilité de la machine KOMAX cm et cmk.....	232
3.4. Etape : Analyser .....	234
3.4.1 Identification des causes de dysfonctionnement .....	234
3.4.2 Application de la méthode MACBETH.....	237
3.5. Etape : Améliorer .....	238
3.5.1 La génération des solutions .....	239
3.5.2 La prise de décision .....	242
3.5.3 Analyse des relations inter décisionnelles.....	244
3.5.4 Analyse d'impact des cinq décisions .....	244
3.5.5 Démarche d'aide à la décision .....	258
3.5.6 Application numérique .....	285
3.6. Etape : Contrôler.....	297
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>299</b>

---

# Introduction

Le secteur automobile évolue à une vitesse de plus en plus importante. En effet, l'évolution rapide des techniques et des technologies accompagnée d'une explosion de l'informatique, a mis les entreprises face à une concurrence acharnée.

Face à cette situation, l'entreprise doit orienter son souci vers la recherche d'une meilleure démarche lui permettant d'atteindre le niveau de compétitivité recherché et de satisfaire les clients.

Dans cette optique, l'amélioration continue représente l'élément capital pour réussir l'activité de ce secteur. Elle n'est assurée que par l'élimination de toutes formes de gaspillages qui causent les surcharges et l'insatisfaction des clients.

L'amélioration continue contient plusieurs démarches : le Lean, le Kaizen, Six Sigma,...

Pour cette raison, nous allons intégrer la démarche Six Sigma à l'entreprise SIDILEC internationale, fabricant des faisceaux de câbles pour automobile, le but est d'éliminer les différentes formes de gaspillages afin d'améliorer le taux de satisfaction des clients.

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les particularités de processus de coupe 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 tous les 5 M de processus coupe de la **SIDILEC**.

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 sont les difficultés rencontrées et les apports retirés.

Nous commençons dans un premier temps par une brève description de la société **SIDILEC international** et de ses produits complexes.

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 peut être mise en place.

Nous détaillons dans un troisième temps un cas concret d'application de démarche de résolution de problème dans les 5 M de processus coupe.

## 1. Entreprise SIDILEC international

### *1.1 Présentation de SIDILEC international*

Les travaux se déroulent dans une usine de production spécialisée dans l'étude et la réalisation de faisceaux de câbles électriques pour les secteurs industriels automobiles et ferroviaires.

L'usine est implantée à Sfax (une ville dynamique de la Tunisie) dans une nouvelle zone industrielle et employant actuellement 180 personnes guidées par des cadres qualifiés et réalisant plus 3 millions d'Euros de chiffre d'affaires en 2009.

Actuellement **SIDILEC** international fabrique des faisceaux de câbles électriques pour les constructeurs des voitures avec et sans permis, constructeurs des cabines pour les engins et les constructeurs des trains et métros.

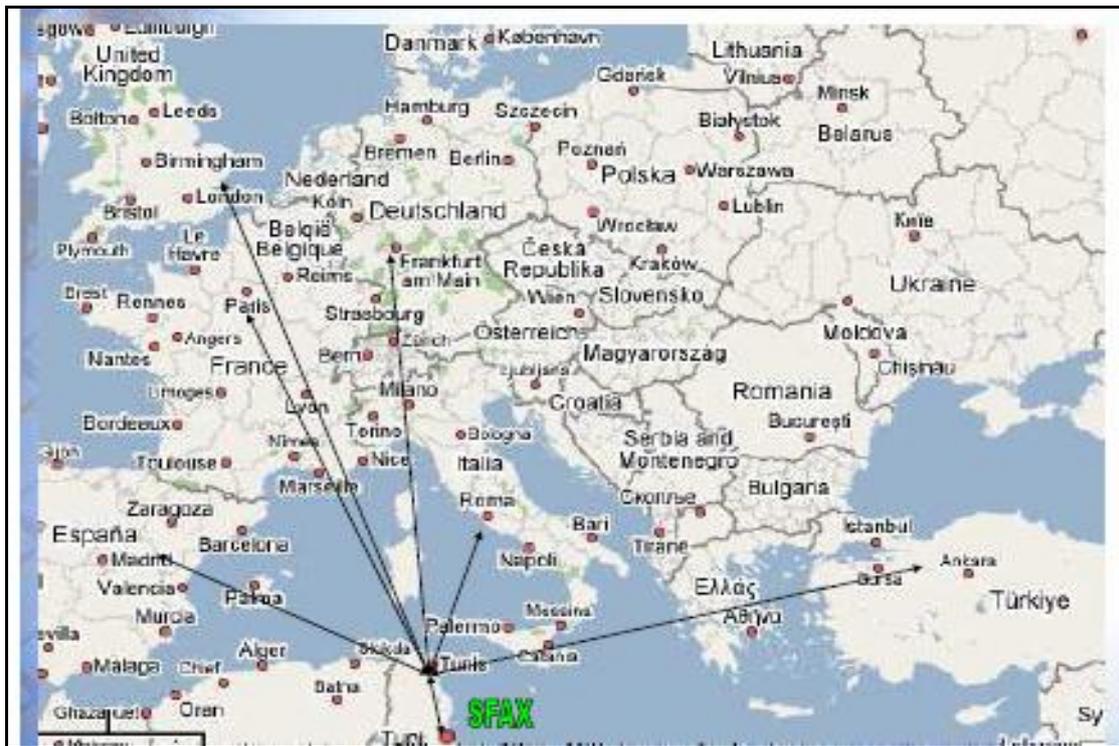


Figure. 63 Réseau de fabrication internationale de SIDILEC

Pour accomplir cette mission **SIDILEC** international juge incontournable d'améliorer en permanence ses compétences et ses performances, et ce par l'implantation d'une organisation basée sur les meilleures pratiques, orientée vers la satisfaction des clients. **SIDILEC** international s'est engagée depuis sa création dans une démarche évolutive et très ambitieuse qui s'articule autour de sept axes se présentant comme suit :

- Amélioration de la compétitivité et de l'efficacité des systèmes de production.
- Amélioration de la satisfaction de ses Clients.
- Implication et motivation du personnel.
- Développement du chiffre d'affaires et des activités.
- Développement et entretien du système de management de la qualité.
- Développement technique et technologique.
- Respect des exigences légales et préservation de l'environnement.

## 1.2 Organigramme de l'entreprise

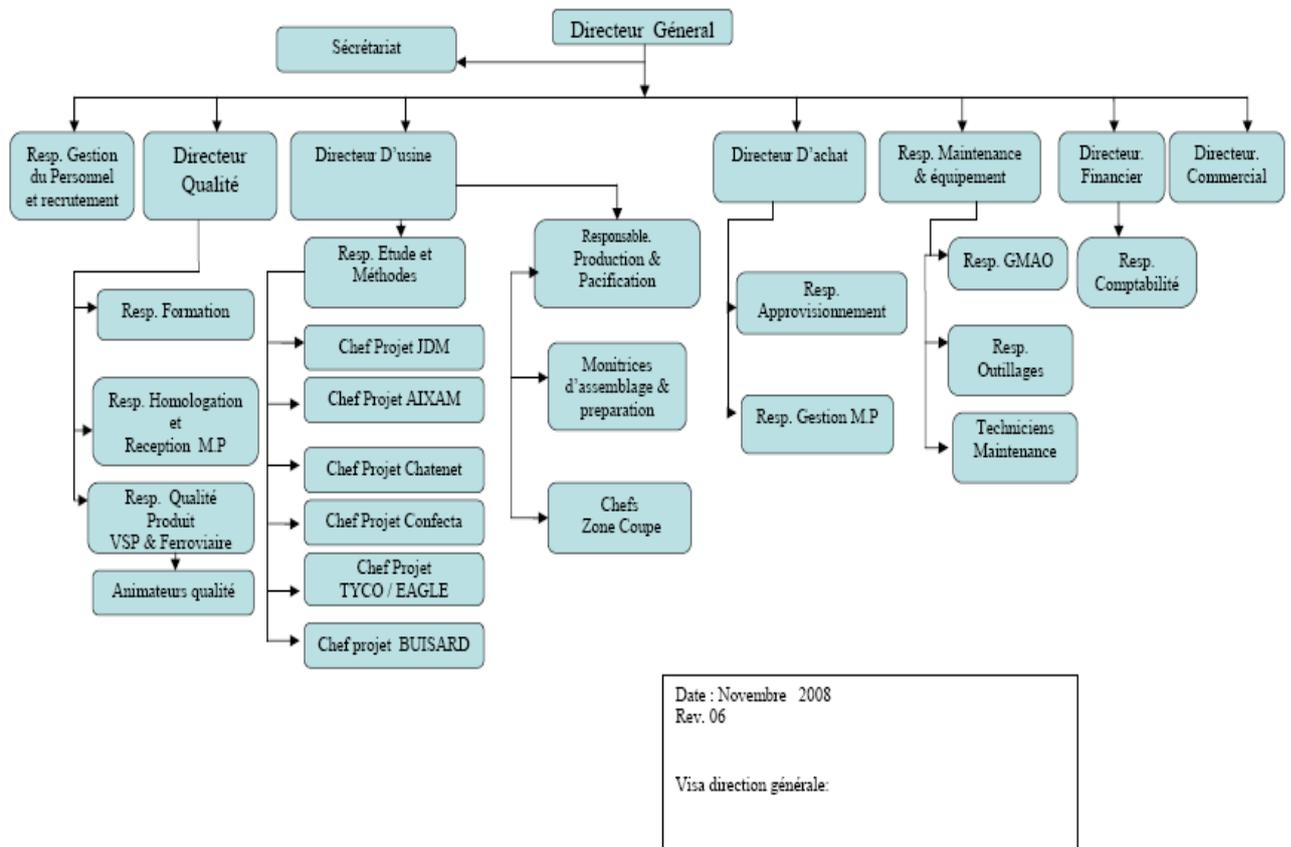


Figure. 64 Organigramme de l'entreprise

## 1.3 Etude et présentation de l'existant

### 1.3.1 Présentation des différents services au sein de SIDILEC INTERNATIONAL

- **Service production** : Ce service est dirigé par un groupe qui assure la planification, l'ordonnancement et le suivi des commandes clients pour assurer la fabrication des quantités demandées dans les délais avec une bonne qualité. Le suivi de la production dans l'usine est de la responsabilité du directeur d'usine en collaboration avec les responsables de production et de planification.
- **Service Qualité** : Le service qualité assure la mise en place du système de management global et le contrôle des produits finis de l'entrée de matière première à la réception jusqu'à la livraison de la marchandise. Il est constitué d'un groupe de contrôle et de

suivi dirigé par directeur qualité, l'homologation et la validation des procès de fabrication ainsi que la gestion de la formation est sous la responsabilité du directeur Qualité.

- **Service Maintenance** : L'ingénieur responsable de ce service maintenance dirige un groupe maintenance pour la gestion et l'application des actions correctives et préventives et ce par des planifications bien définies sur le logiciel GMAO (Gestion Maintenance Assistée par Ordinateur).
- **Bureau d'étude et Engineering** : Le travail dans le bureau Etude et Engineering se base sur la définition, le calcul et l'application.
- **Service financier et comptabilité** : Diriger par un gestionnaire, qui assure le règlement et la comptabilisation des factures fournisseurs, l'établissement du bilan comptable ainsi que le paiement du personnel.
- **Service achats et approvisionnement** : Ce service assure la recherche et l'évaluation des besoins en composants nécessaires à la production. La gestion des stocks et l'application du système FIFO (First In First Out) est sous la responsabilité de ce service.

### ***1.3.2 Description du flux informationnel entre ces services***

**-Sous système production** : Après accord commercial, un planning d'industrialisation doit être élaboré par le chef du projet avec une équipe pluridisciplinaire (Directeur Achat, Directeur qualité, responsable engineering, Directeur commercial, responsable maintenance et le responsable production).

La planification de l'industrialisation du produit doit prendre en considération les étapes suivantes :

- la définition et la mise à disposition des composants nécessaires ;
- la définition et la mise à disposition des moyens de fabrication nécessaires en fonction des exigences du client et en fonction de la capacité de production à mettre en place ;
- la définition de la documentation nécessaire à la maîtrise de la qualité du produit : modes opératoires, instructions, formulaires ;
- la définition et la mise à disposition des moyens de contrôle nécessaires pour surveiller la conformité du produit et la conformité du procès ;
- l'identification, la mise à disposition et la qualification des ressources humaines nécessaires à la réalisation de la commande du client en terme quantitatif et qualitatif ;
- la validation du produit et du processus en fonction des exigences du client.

Le responsable engineering assure le suivi de la réalisation des tâches identifiées avec les responsables concernés et reporte à la direction toutes les difficultés pouvant mettre en cause la satisfaction des exigences client en terme de qualité ou de délais.

Suite à la mise en place du processus de fabrication, le service qualité assure la validation des moyens de fabrication en fonction des procédures en vigueur et des exigences client.

A la suite de la mise en œuvre du processus, le responsable qualité procède à la validation du produit en fonction des exigences du client et établit les rapports de validation du produit et le communique au client si celui-ci l'exige.

Une fois le processus validé, un programme de production est transmis vers l'usine de production.

Le responsable de planification définit un planning de fabrication selon les éléments d'entrée reçus et fait le suivi nécessaire. Un plan d'action sera réalisé en cas d'un écart.

La sortie des matières premières nécessaires est assurée par les chefs d'atelier suite au remplissage d'un bon de sortie donné au magasinier.

**-Sous système d'approvisionnement :** Le responsable achat et le responsable production sont toujours informés de l'état du stock. La commande des composants est établie en fonction des paramètres introduits dans le système de gestion du stock à savoir :

- Délai de livraison du composant ;
- Unité de conditionnement standard ;
- Minimum de commande chez le fournisseur ;
- Besoin du client en produit fini (commande prévisionnelle du client).

Une fois établi, un bon de commande est transmis vers le fournisseur. Le magasinier est le responsable de la réception des composants commandés. Il doit vérifier sur le bon de livraison fournisseurs la conformité des références et des quantités de matière commandée. Un contrôle qualité est réalisé afin d'autoriser l'entrée de la matière en magasin ou non.

Suite à cette opération, le bon de livraison et le bon de réception seront transférés vers le service comptabilité qui doit vérifier la conformité des prix du fournisseur. Une fois vérifiés, tous ces documents passent au service financier pour régulation.

**- Sous systèmes contrôle qualité :** Une copie du programme de production sera transmise au service qualité pour qu'il puisse prendre les mesures nécessaires afin de garantir une bonne qualité lors de la production et pour planifier ses ressources.

Les problèmes de non qualité rencontrés seront inscrits dans un registre des produits non conformes.



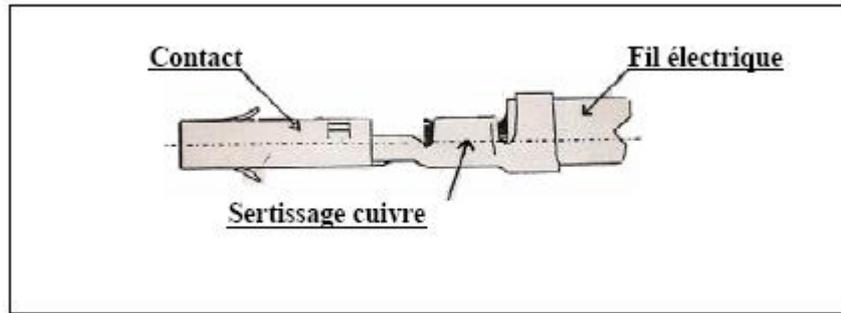


Figure. 66 Opération de sertissage

### 1.4.2 L'épissure

L'épissure est le fait d'assembler deux ou plusieurs fils, ayant la même fonction électrique dans le véhicule, par un contact appelé clip d'épissure qui assure le serrage sur la partie spécialement dénudée des fils à l'aide d'un outil de sertissage.

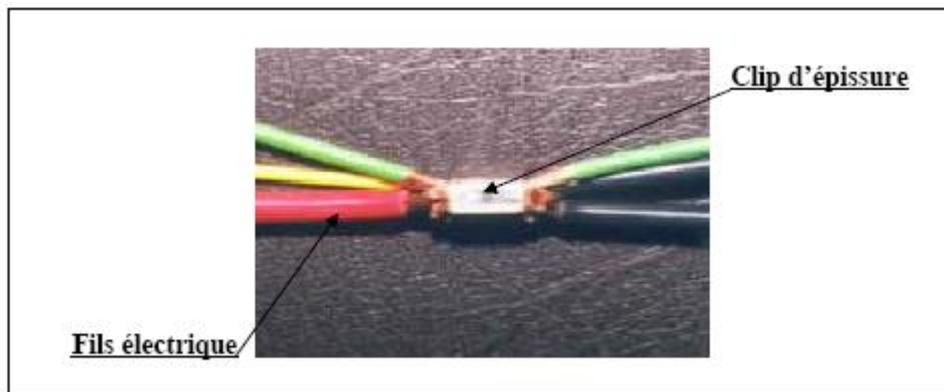


Figure. 67 Opération d'épissure

### 1.4.3 L'encliquetage

L'encliquetage est le fait d'introduire le contact dans le boîtier et éviter la réparation sauf par les moyens adéquats. On doit entendre un bruit de Clic.

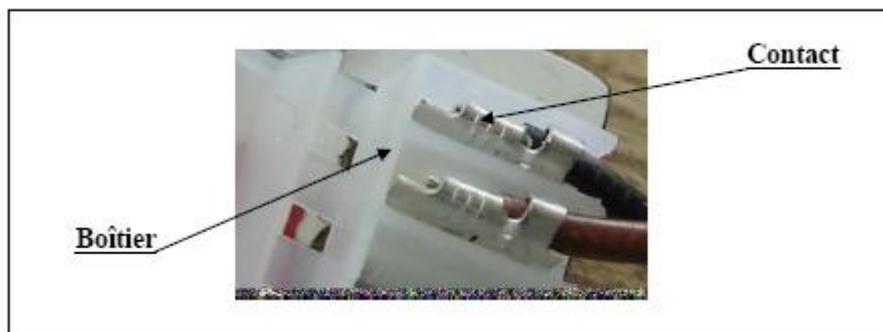


Figure. 68 Opération d'encliquetage

### 1.4.4 L'habillage

L'habillage est le fait de couvrir les fils électriques d'un câblage par les rubans, les tubes et les goulottes suivant des exigences et spécifications clients bien déterminées.

- **Habillage continu**

C'est le fait de couvrir totalement les fils du câblage par les rubans.

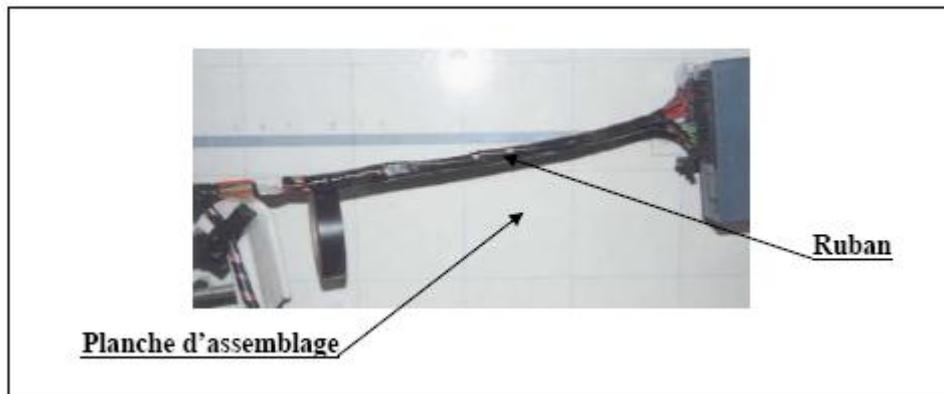


Figure. 69 Habillage continu

- **Habillage discontinu**

C'est le fait de couvrir partiellement les fils d'un câblage par les rubans. La distance entre les spires peut être égale à la largeur du ruban (pas court) ou deux fois la largeur du ruban (pas long) suivant les exigences clients.

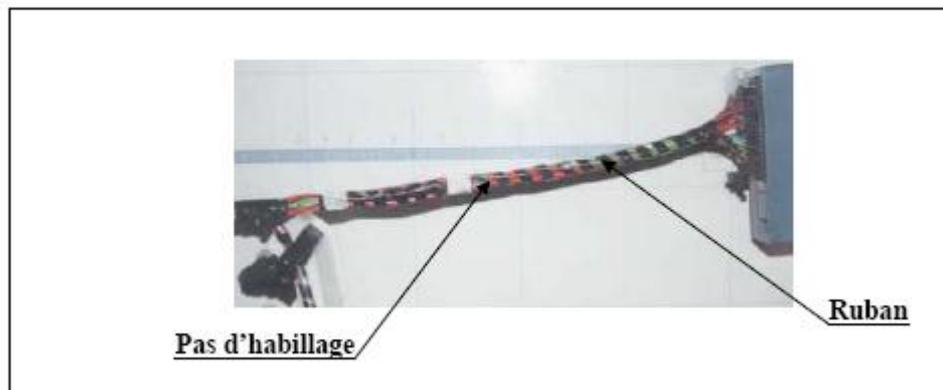


Figure. 70 Habillage discontinu

### 1.4.5 Le Montage des agrafes

Il s'agit de la fixation d'un composant en plastique qui assure la fixation et facilite le montage du câblage suivant un chemin exigé dans le châssis de la voiture.

Le montage des agrafes sur le câblage est une opération qui se fait suivant les exigences clients.

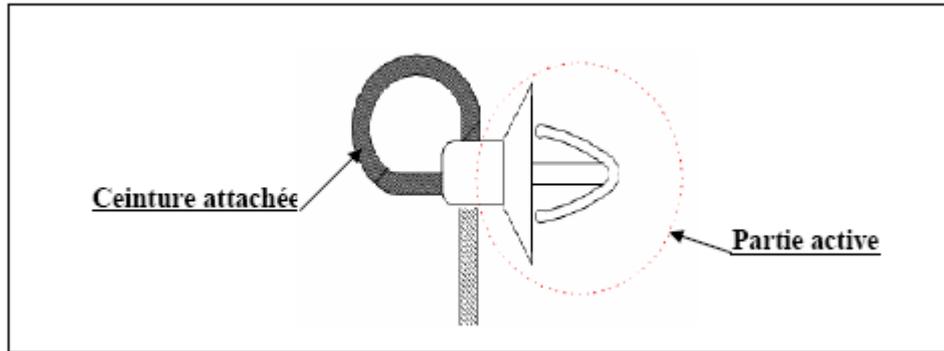


Figure. 71 Schéma d'une agrafe

Pour ce type d'agrafe la partie active sert à monter le câblage sur le châssis de la voiture. Le moyen de fixer l'agrafe sur le câblage est la ceinture attachée pour cet exemple.

#### 1.4.6 La soudure ultrason

Pour certains types de produits, les fils sont soudés entre eux par échange d'énergie. La soudure est assurée par une machine appelée "machine ultrason" qui génère des vibrations ultrasoniques capables de souder une combinaison bien déterminée.

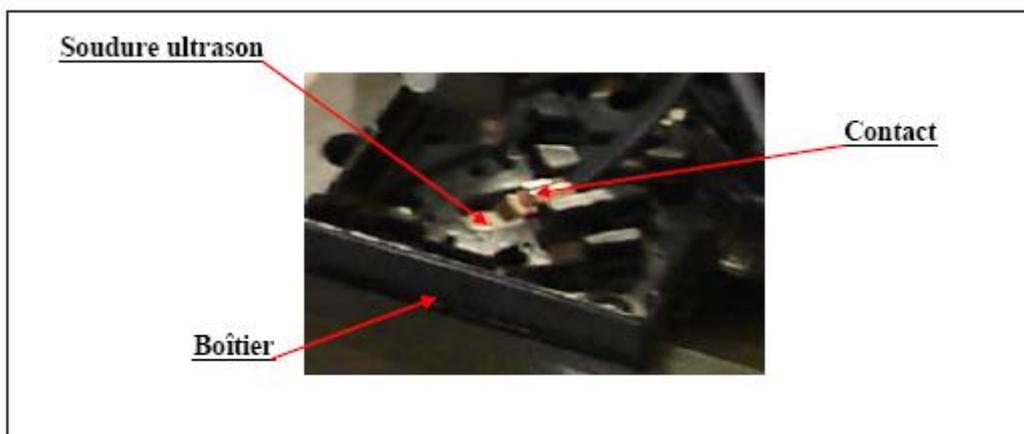


Figure. 72 Soudure ultrason

#### 1.4.7 Le contrôle électrique

Cette opération est considérée comme étant une opération de production, car lorsque le client exige un contrôle électrique, cette opération sera intégrée dans le processus de production du câblage.

Le contrôle électrique est le faite de tester électriquement un câblage tout en s'assurant des caractéristiques suivantes :

- La continuité électrique.
- Pas de court circuit.
- L'existence des composants du câblage : agrafes, verrouillages...

- La conformité des composants.
- Autres options : test d'étanchéité, test d'éjection automatique, test de branchement, test de verrouillage ...



**Photo. 4 Machine de contrôle électrique**

## ***1.5 Découpage de l'atelier de production par zones***

Les opérations de production sont regroupées par zone : une zone de coupe, une zone de préparation et une zone d'assemblage.

Cette classification par zone est liée à la nature de l'opération et du synoptique de fabrication.

### ***1.5.1 Zone de coupe***

Dans cette zone on trouve des machines équipées d'automates programmables, et qui assurent l'opération de coupe avec possibilité de réaliser d'autres opérations à savoir le sertissage, dénudage et l'étamage. Selon les spécifications indiquées dans le plan de coupe émis par le bureau de méthodes, l'opérateur de coupe est chargé de bien saisir ces spécifications (les différentes tâches à réaliser par la machine ainsi que le paramétrage de chaque tâche) et suite à des essais pour contrôler la qualité du produit, on se lance dans la production.

### ***1.5.2 Zone de préparation***

C'est une zone qui regroupe des opérations intermédiaires entre coupe et assemblage. Ce sont des opérations manuelles que les machines de coupe ne peuvent pas réaliser à savoir l'épissure, sertissage sur Seal, protection des épissures et des contacts...

Il s'agit d'une préparation pour la phase d'assemblage.

### 1.5.3. Zone d'assemblage

La majorité des opérations sont manuelles. L'opératrice utilise une planche d'assemblage fixe, carrosserie ou autres moyen pour regrouper les différentes parties d'un câblage et surtout pour réaliser l'habillage des câbles. Ces moyens d'assemblage permettent d'assurer le respect des dimensions spécifiées dans le plan du câblage.

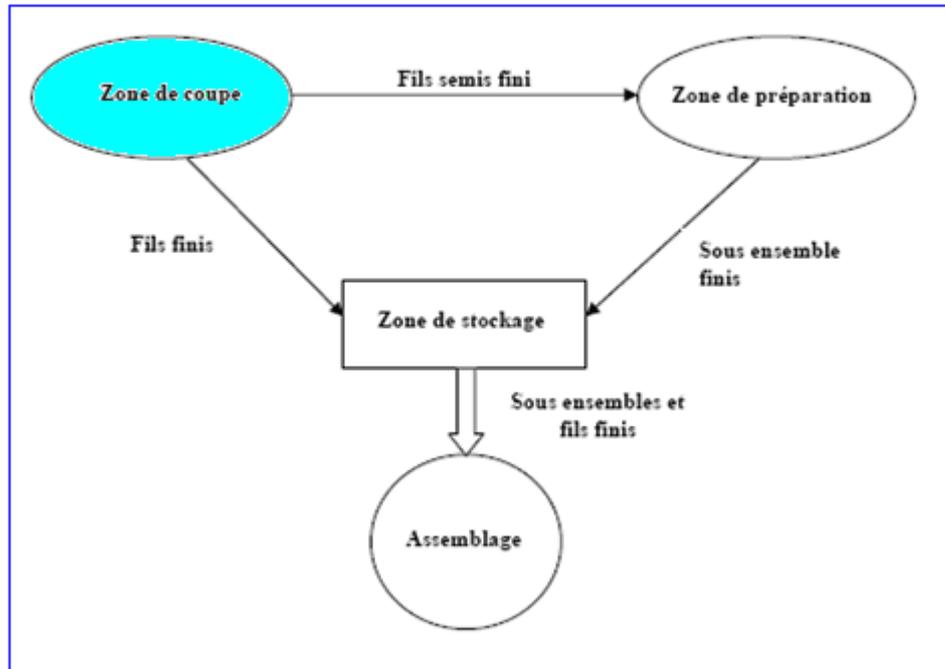


Figure. 73 Diagramme de flux de production

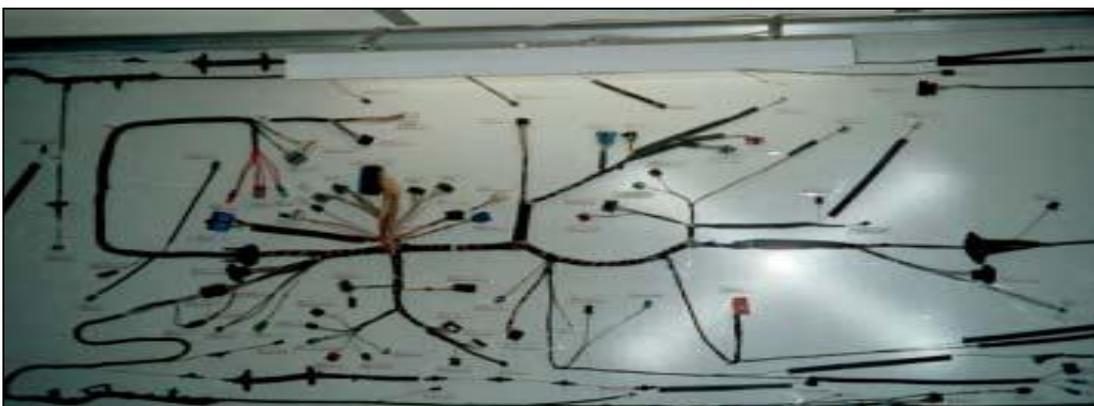


Photo. 5 Table d'assemblage

Vu que la production chez **SIDILEC** est une production sur commande, les produits diffèrent par leurs cycles de production. Les différentes opérations élémentaires qui constituent le cycle de fabrication d'un câblage bien déterminé sont dégagées à partir du cahier des charges du client. La figure. 74 illustre les différents cas possibles d'un cycle de fabrication.

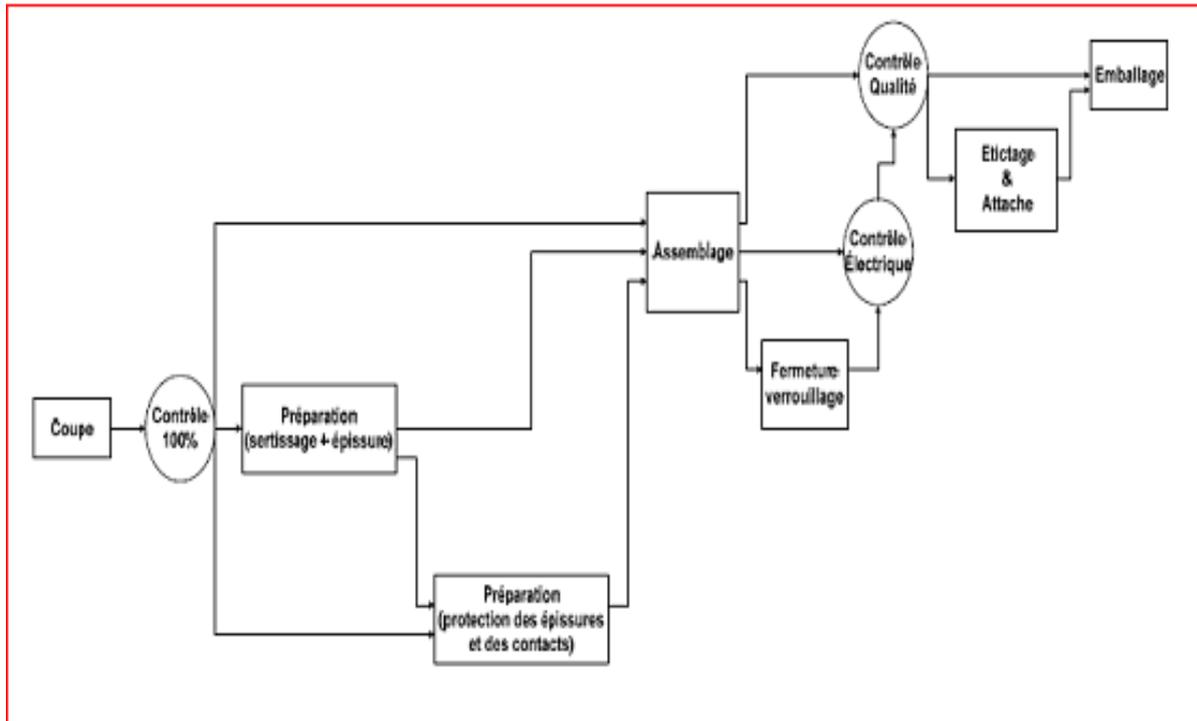


Figure. 74 Différents cycles de production

## 2. Présentation des produits de Entreprise SIDILEC international

### -Câble Batterie

### -Faisceaux Tableau de bord

Il est difficile d'imaginer les véhicules modernes sans électronique embarquée. Ordinateur de bord, contrôle de lampe, capteurs de recul, ... ont été conçus pour accroître le niveau de confort et de sécurité de l'automobiliste.

En électricité automobile, les intensités mises en jeu s'étendent sur une plage allant d'environ 0,5 A, pour une ampoule de tableau de bord et jusqu'à plusieurs centaines d'ampères pour un démarreur.

Les tensions utilisées en électricité automobile sont de 6 Volts ou de 12 volts (voir 24 Volts sur les gros utilitaires et les véhicules militaires).

Par contre, le moindre court-circuit met en jeu des courants très importants et peut facilement mettre le feu au véhicule et provoquer de graves brûlures par simple contact des éléments en court-circuit.

Les câbles utilisés en électricité automobile sont en cuivre (certains vieux montages étaient en aluminium, mais ce type de câble n'existe plus). Dans un véhicule automobile, il y a un grand nombre de faisceaux électriques dont le faisceau principal, la climatisation ou encore le siège,... Leur longueur totale est d'environ 2m pour un poids total de 5kg. En ce qui concerne les faisceaux sièges, ils ont une longueur comprise entre 400 et 1500 mm et possèdent différents connecteurs. Le connecteur principal est l'interconnexion véhicule, il permet de relier le faisceau électrique au reste du véhicule. Les autres connecteurs dépendent des options présentes dans votre véhicule, comme par exemple les airbags latéraux ou les sièges chauffants.

En électricité automobile, étant donné que le (-) (négatif) est toujours connecté à la masse de la carrosserie (sauf coques plastiques), il n'y a pas de couleurs spécifiques du négatif, sauf pour les cosses de batterie qui sont de couleur verte pour le (-) rouge pour le (+). On retrouve sur les faisceaux électriques toutes les couleurs possibles, y compris des couleurs panachées. Ce qui compte, c'est la continuité du câble, et lorsque le fil est repéré, son numéro. En principe, dans un même faisceau, il n'y a pas deux câbles de la même couleur.



Photo. 6 Câble batterie





**Photo. 7 Les produits de l'entreprise SIDELEC INTERNATIONAL**

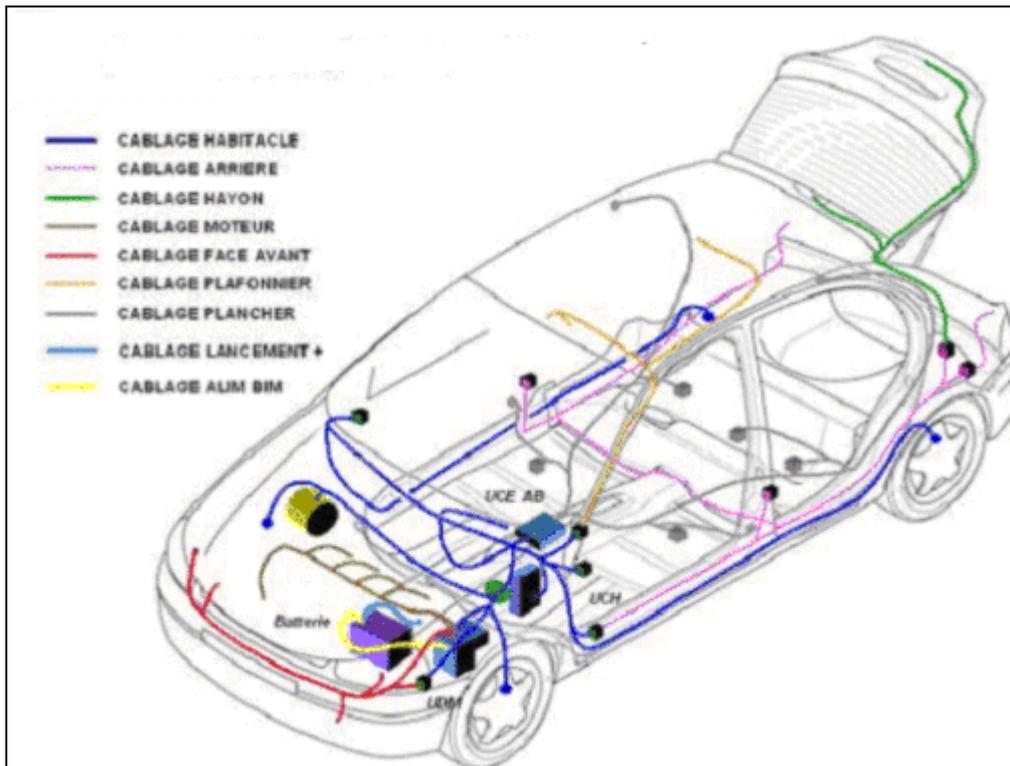


Figure. 75 Architectures câblage d'une automobile

### 3. Expérimentation du modèle pour l'amélioration du processus de production (processus coupe) sous l'initiative de l'application de la méthode Six Sigma et Aide Multicritère à la Décision :

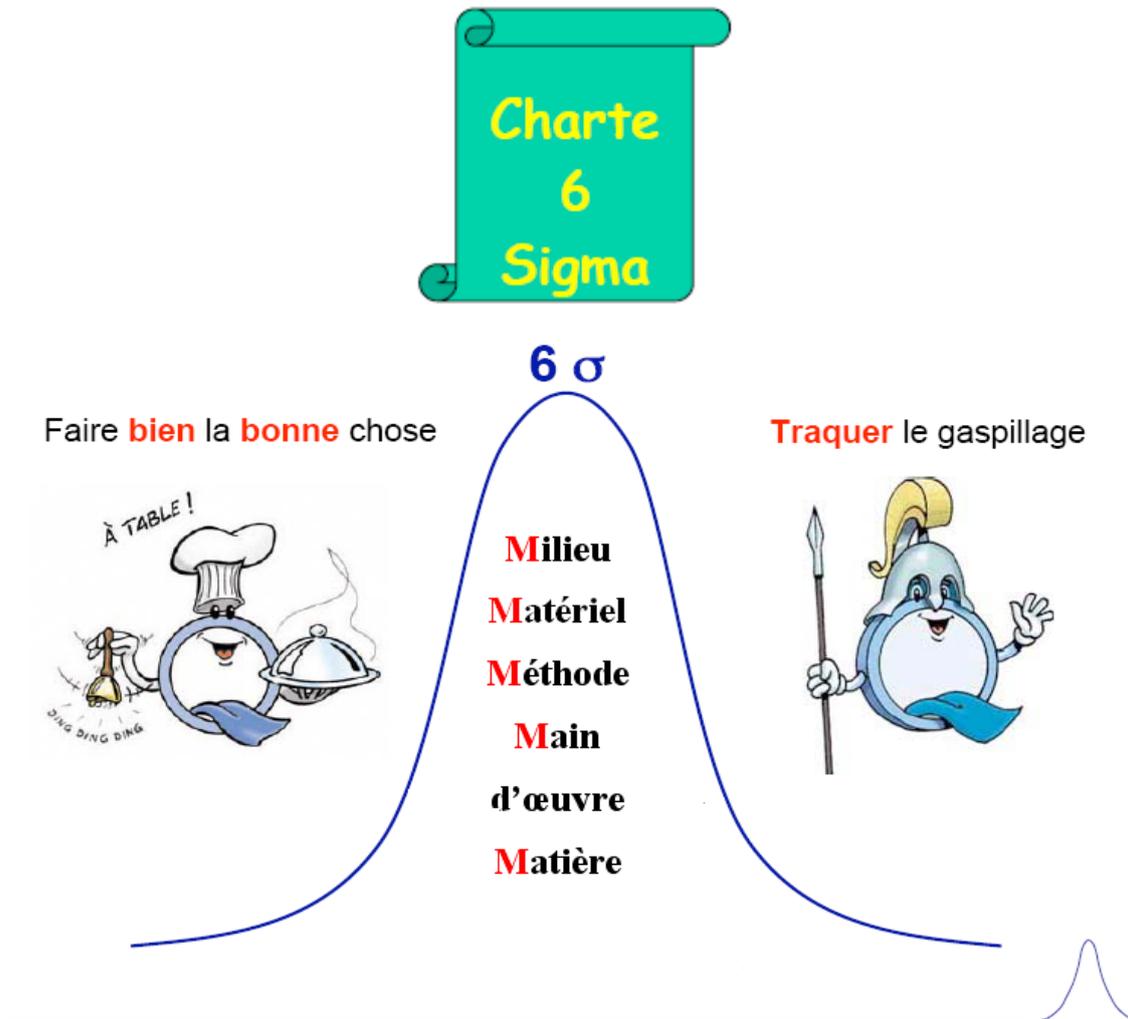
La maîtrise des processus de production comporte deux volets :

- La mise en place d'un système de production permettant de réduire la variabilité sous toutes formes (méthodologique, procédé, produit) afin de réduire l'occurrence de non performance.
- La mise en place d'une démarche de résolution de problème adaptée et adaptable pour l'entreprise et capable de répondre efficacement aux non conformités constatées.

Pour cela nous avons appliqué notre modèle à SIDELEC INTERNATIONAL et cette étude faite sur une durée de neuf mois.

### 3.1 Construction de la démarche à suivre

L'établissement de l'état méthodologique est présenté dans la **Figure. 76**



**Figure. 76** Etat méthodologique de la démarche à suivre

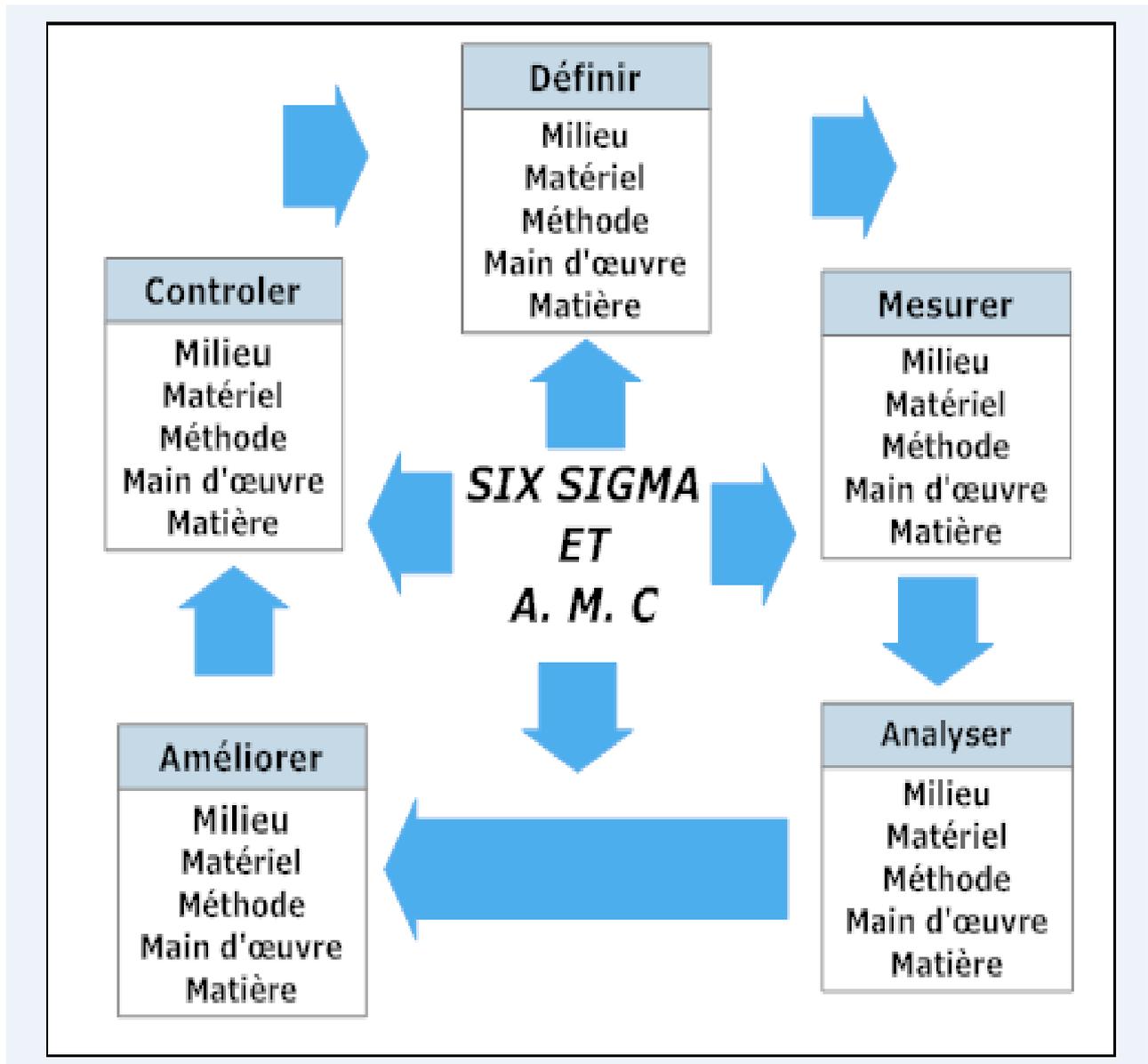


Figure. 77 Approche Six Sigma et A.M.C

La **Figure. 77** identifie notre démarche proposée à suivre, portant sur l'application des 5M au niveau de chaque phase de la démarche Six Sigma avec intégration de l'aide multicritère à la décision dans le processus coupe de **SIDELEC** internationale.

## 3.2 *Étape 1 : Définir*

Le processus Coupe Sertissage Marquage « KOMAX » décrit toutes les étapes à suivre pour la présentation automatique d'un produit semi-fini conforme et disponible à une phase de production ultérieure.

Nous avons choisi ce processus car ce dernier est applicable pour tous les produits fabriqués par **SIDILEC**.

### 3.2.1 *Principe de fonctionnement*

- En fonction de l'ordre de fabrication (code : PR16F03) le responsable de production zone de coupe prépare la fiche de lancement coupe (code PR22F01) ordre à l'opérateur pour démarrer la coupe de fils sous forme de modules. La fiche de lancement est établie et mise à jour pour nouveaux produits ou modifications produits. Elle prend en compte toute considération d'optimisation qui vise à réduire au maximum le temps mort entre le passage d'une référence de fil à une autre. Cette fiche est communiquée au poste désigné pour la fabrication.

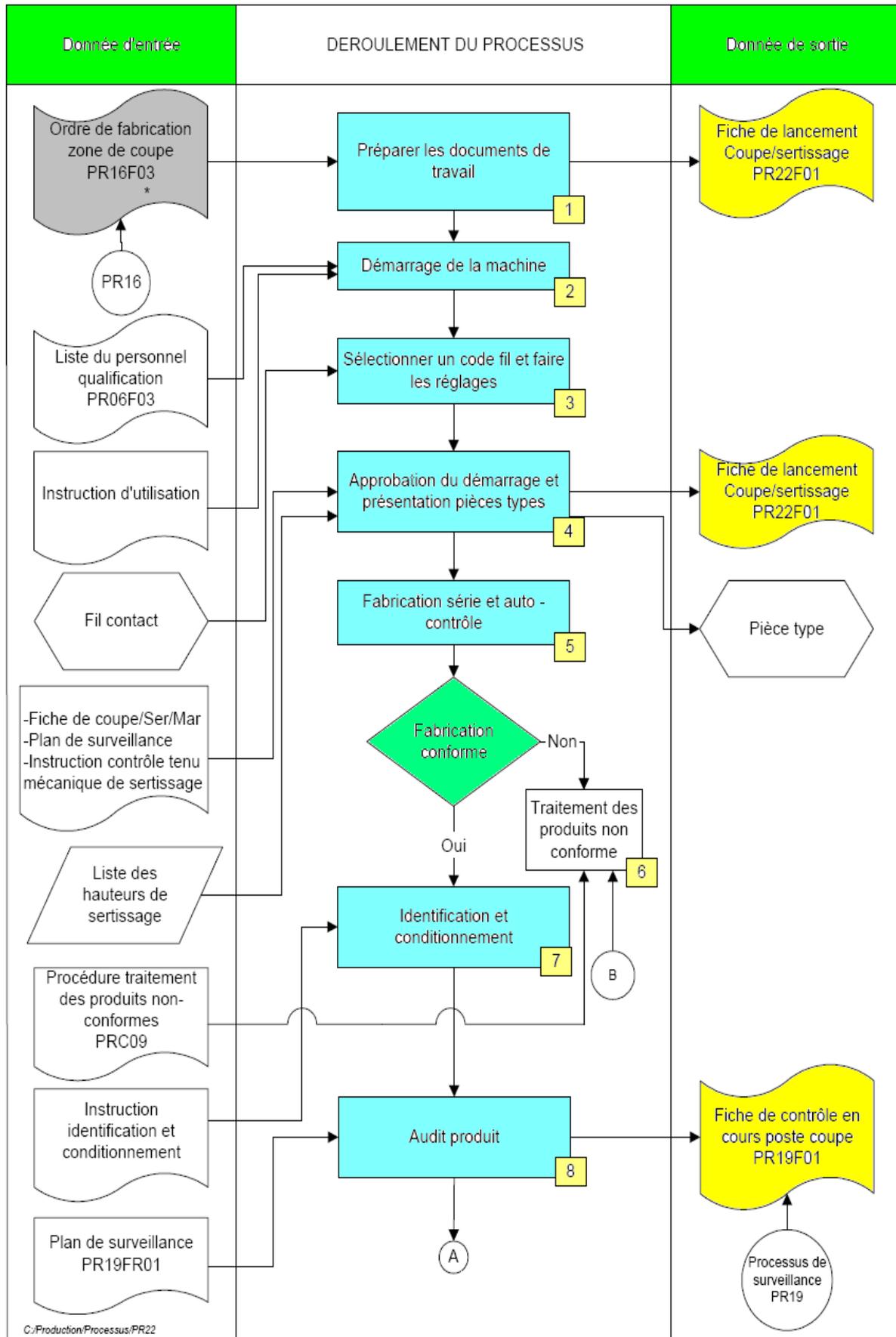
- le démarrage doit se faire selon l'instruction d'utilisation de la machine par l'opérateur qualifié.

- l'opérateur sélectionne un code fil à partir de la fiche de lancement coupe / sertissage et fait les réglages nécessaires tel que alimentation du fil, alimentation contact, mise au point de l'outil de sertissage, mise au point de la tête du marquage, suivant les spécifications mentionnées dans la fiche de lancement : coupe/sertissage/marquage. Il introduit aussi dans le logiciel les informations suivantes :

- le code marquage,
- La longueur du fil,
- Choix de la section du fil,
- Extrémité avec contact ou sans contact.

- l'opérateur fabrique des échantillons avec des longueurs dites maquettes (longueur courte), et mesure l'effort de la tenue mécanique de charge de sertissage tout en respectant l'instruction contrôle en respectant les hauteurs de sertissage sur cuivre et isolant demandés sur la relation de sertissage. Si les résultats sont conformes il enregistre l'opération d'apprentissage sur machine et lance un échantillon tout en respectant la longueur demandée sur la fiche de lancement. Les résultats obtenus seront enregistrés par l'opérateur sur la fiche de lancement coupe sertissage. En plus l'opérateur met à la disposition du service qualité une pièce type pour le contrôle.

- l'opérateur lance la fabrication en série et assure l'opération d'autocontrôle visuel tel que mentionné dans le plan de surveillance.
- en cas de détection de non conformité en cours du fabrication par rapport aux exigences indiquées dans la fiche de coupe /sertissage/marquage, la liste des hauteurs de sertissage où l'instruction de contrôle de tenu mécanique soit par le service qualité en cours du contrôle destructif de la pièce type, soit par le service production qui doit informer l'animatrice qualité ou le responsable qualité en cours. Dans les 2 cas l'animatrice qualité doit traiter la non conformité conformément à la procédure traitement du produit non conforme.
- l'opérateur assure l'identification et le conditionnement des fils coupés suivant l'instruction affichée dans le lieu du travail.
- Le contrôleur Qualité doit faire des audits sur les fils coupés et cela conformément au processus "Surveillance du produit"(Code : PR 19).
- les produits semi-finis validés conformes par le service qualité, seront chargés et stockés dans des chariots destinés à cet effet par un opérateur désigné par le responsable production zone de coupe.
- le responsable production à travers la collecte des données enregistrés dans le formulaire "Fiche de relevé zone de coupe" (Code : PR22F01). Si le responsable zone de coupe sertissage remarque un écart entre le délai prévu et les délais réalisé qui peut engendrer certaines perturbations au niveau de la zone d'assemblage, il doit organiser une réunion d'urgence avec les services concernes pour remédier la situation. Une réunion trimestrielle pilotée par le responsable zone de coupe /sertissage ou la présence des responsables planification est obligatoire.



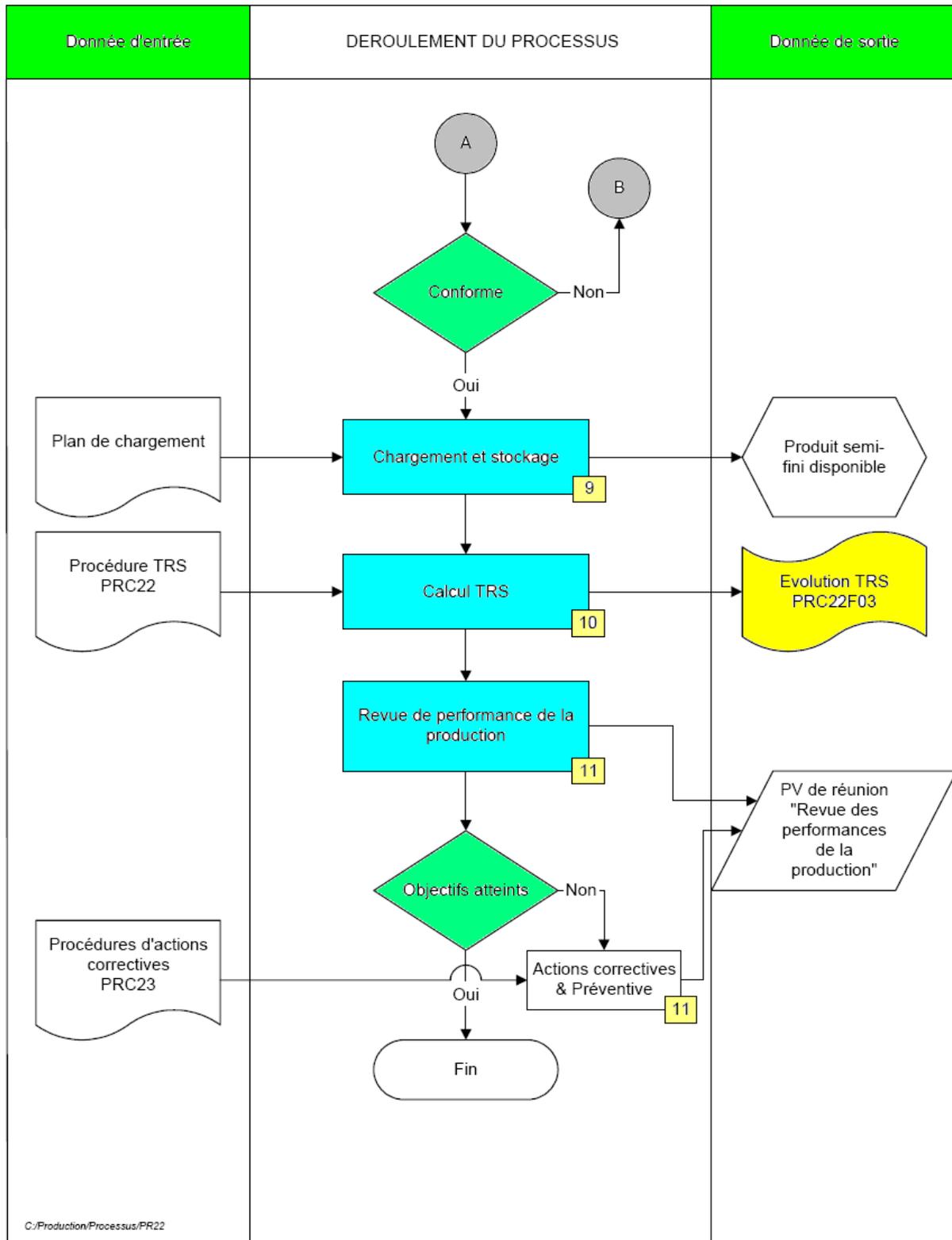


Figure. 78 Logigramme processus coupe sertissage marquage

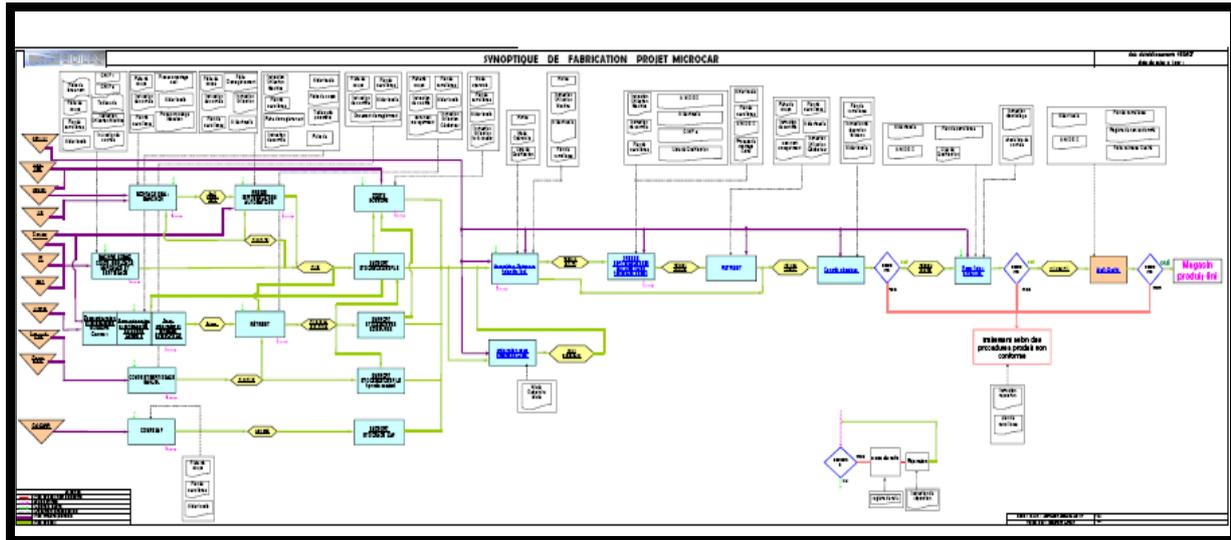


Figure. 79 Logigramme processus coupe sertissage marquage\_New1

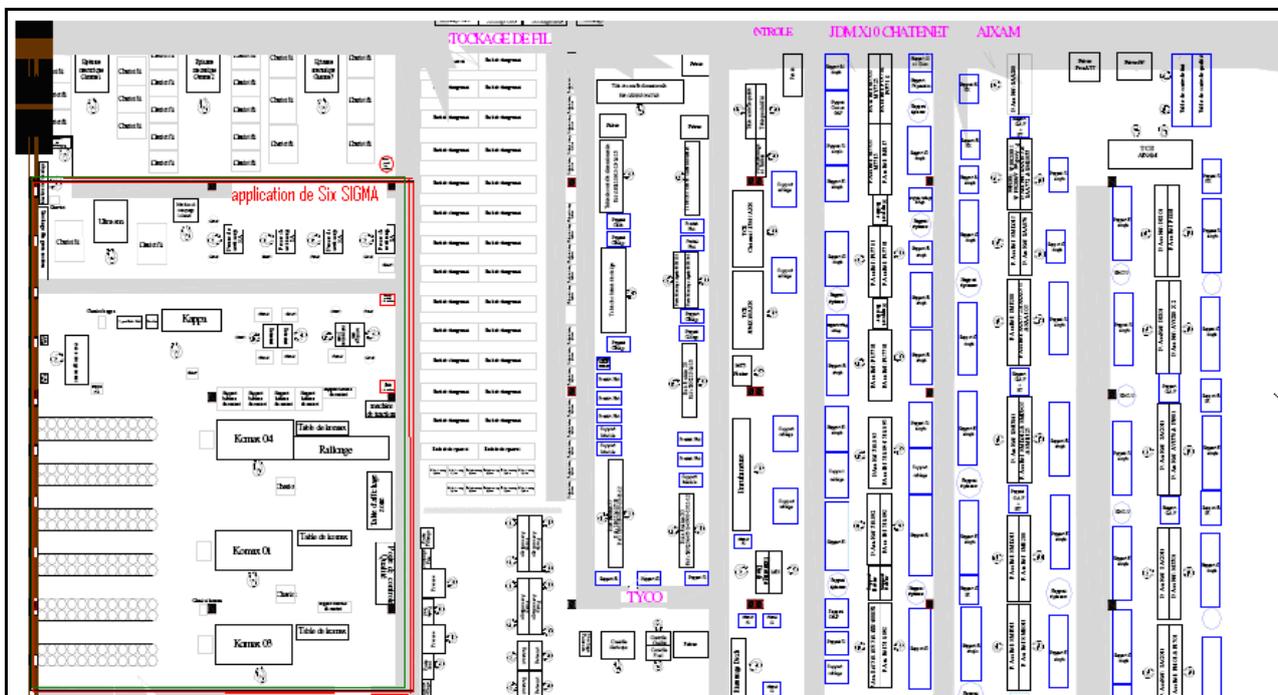


Figure. 80 Lay-out Usine

### 3.2.2 Description des 5 M et identification des problèmes

- (M1) : Milieu

#### - Description de Milieu

Le Milieu correspond à l'environnement physique de l'entreprise **SIDILEC** est plus précisément la zone de coupe.



**Photo. 8 zones de coupe**

Dans cette première étape, nous allons essayer de dégager tous les problèmes dans tout le milieu de processus coupe et les classer par ordre de priorité en utilisant un outil multicritère d'aide à la décision.

- **Identification des problèmes**

A chaque fois on délimitera le problème dans le temps et dans l'espace grâce au **QQOQCC** afin de le formuler en termes de faiblesse et d'insatisfaction:

**Q**ui est concerné ?

**Q**ue s'agit-il ?

**O**ù cela se passe-t-il ?

**Q**uand cela arrive-t-il ?

**C**omment cela se passe t-il ?

**C**ombien de fois cela arrive t-il ?

Nous allons déterminer tous les problèmes qui se passent dans le processus coupe et plus particulièrement dans le Milieu de **SIDILEC**.

Les problèmes rencontrés dans cette zone sont :

- Des problèmes de poussière ;
- Des problèmes de nature de sol ;
- Des problèmes de bruit ;
- Des problèmes d'humidité ;
- Des problèmes de localisation (bobines).

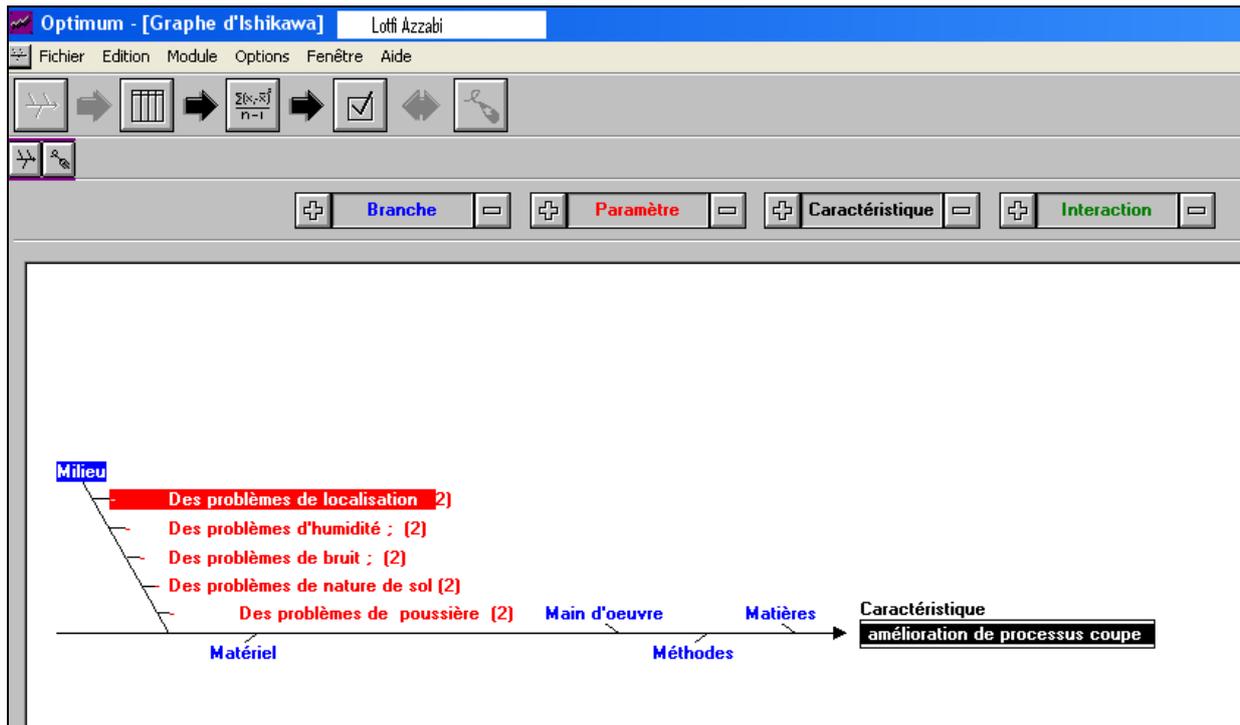


Figure. 81 Graphique d'Ishikawa pour les problèmes de M1

- (M2) : Matériel

**-Description des Matériel**

(Présentation des Machines du processus Coupe Sertissage Marquage « KOMAX » de SIDILEC : Principe de fonctionnement).

Le Matériel représente le moyen de production et précisément les machines dans la zone de coupe. Cette M permet d'identifier les causes relatives aux Machines, aux équipements et moyens concernés.

La Komax Gamma est une machine pour sertissage automatique flexible pour un usinage de câbles efficace.

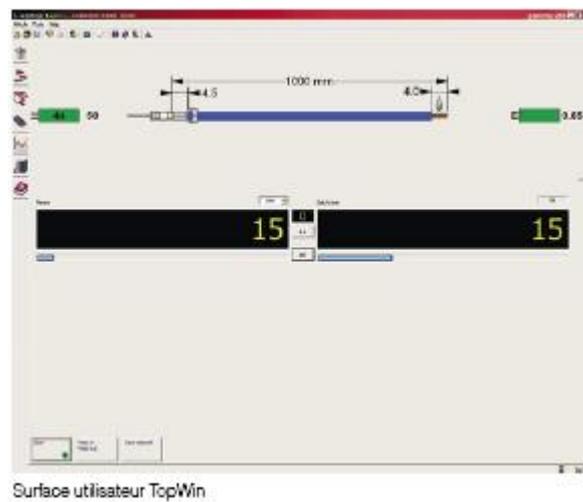
Elle permet d'usiner des sections allant de 0.0123 mm<sup>2</sup> /AWG 36 à 2.5 mm<sup>2</sup> / AWG 14 dans une qualité supérieure.

Des câbles sertis sur les deux faces sont déjà possibles à partir d'une longueur de 20 mm. L'usinage de toute la section de câble se fait via des entraînements asservis ultra dynamiques programmables et avec des couteaux de dénudage en V. Le prefeeder qui fait partie de l'équipement standard de la machine, permet une détection d'épaisseurs, une détection de fin de câble, une détection de nœuds ainsi que deux stations de dressage de câble.

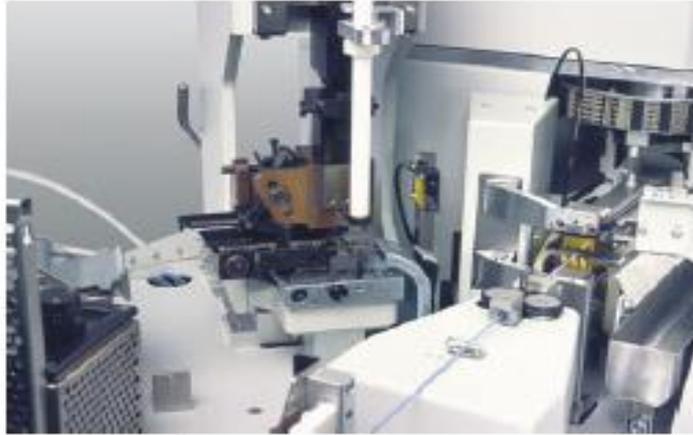
Le préfeeder intégré garantit une alimentation en douceur des câbles à partir de fûts en vrac ou de bobines, et ceci également avec des vitesses d'insertion élevées. Un traitement des câbles défectueux avec production ultérieure automatique.



**Photo. 9 La machine Komax**

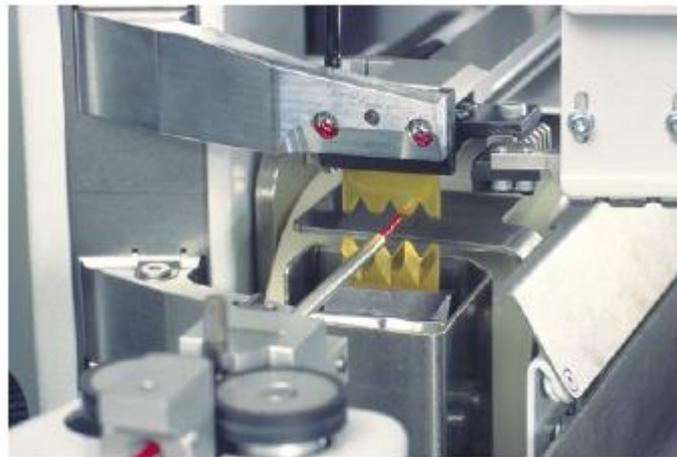


**Photo. 10 La surface utilisateur**



Configuration sertissage

**Photo. 11 La configuration sertissage**



Tête de coupe Gamma 255

**Photo. 12 La tête de coupe Gamma 255**

Dans cette première étape, nous allons essayer de dégager tous les problèmes qui affectent les machines Komax et les classer par ordre de priorité en utilisant un outil multicritère d'aide à la décision.

- **Identification des problèmes**

Nous allons déterminer tous les problèmes qui se passent dans le processus coupe et plus particulièrement dans « M » machine de **SIDILEC**.

Les problèmes rencontrés dans cette zone sont :

- Ailette isolant,
- Coupure de brin,
- Pane marquage,
- Variation de fenêtre,
- Contact n'est pas sur l'enclime,
- Axe de l'entraînement de câbles.

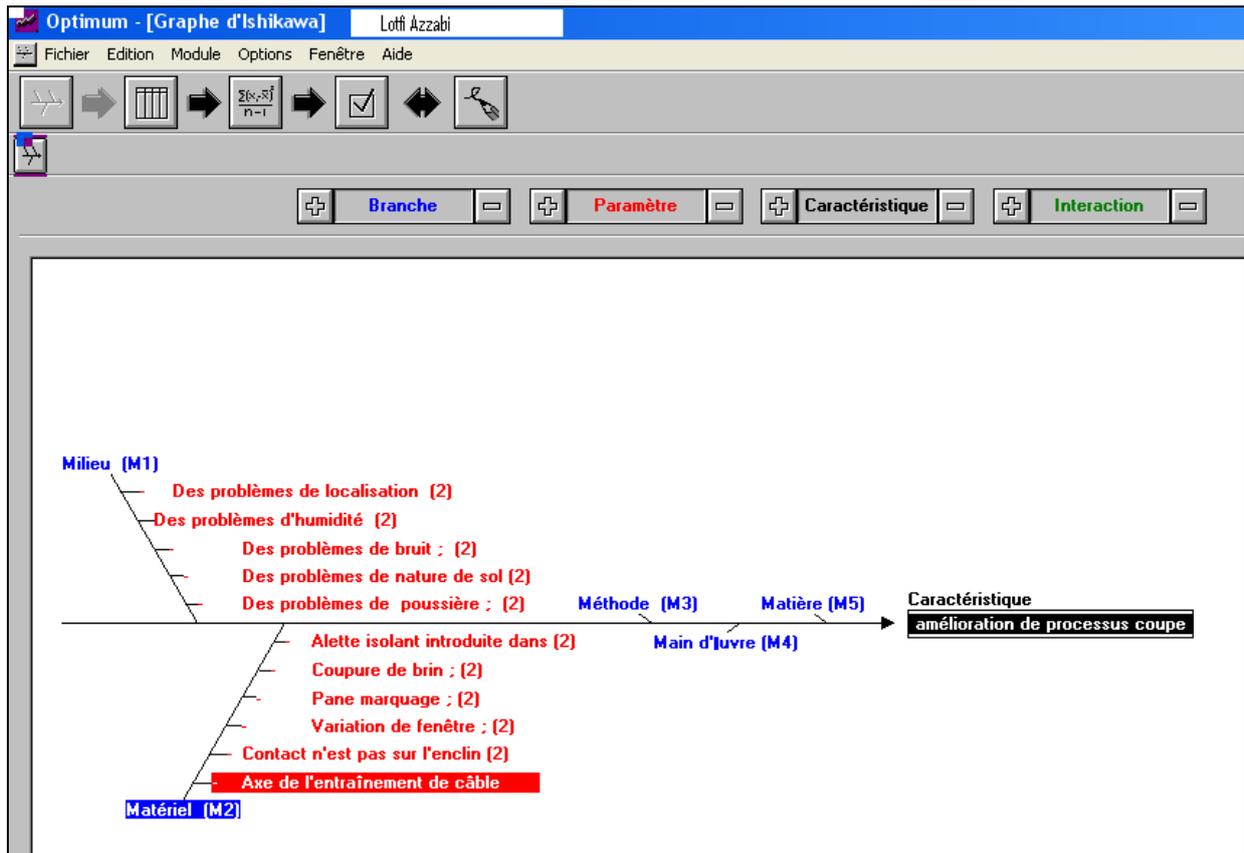


Figure. 82 Graphique d'Ishikawa pour les problèmes de M1 et M2

- (M3) : Méthode

- **Description des Méthodes appliquées dans le processus coupe**

C'est la façon de faire, les modes opératoires, les instructions, les programmes, les procédés, écrits ou non, imposés ou non, personnels ou collectifs. En résumé ce sont les procédures ou modes opératoires utilisés.

- **Identification des problèmes**

Nous allons déterminer tous les problèmes qui se passent dans les méthodes de processus coupe.

Les problèmes sont :

- Absence de suivi du programme de maintenance,
- Pas d'analyse des causes de panne. Les actions d'intervention sont plutôt curatives,
- Les interventions ne sont pas systématiquement enregistrées,
- Les fiches techniques de certaines machines ne sont pas disponibles,
- Il n'y a pas un moyen de suivre la consommation des machines en pièces de rechanges,
- Absence de suivi de la capacité des machines ce qui engendre des non conformités.

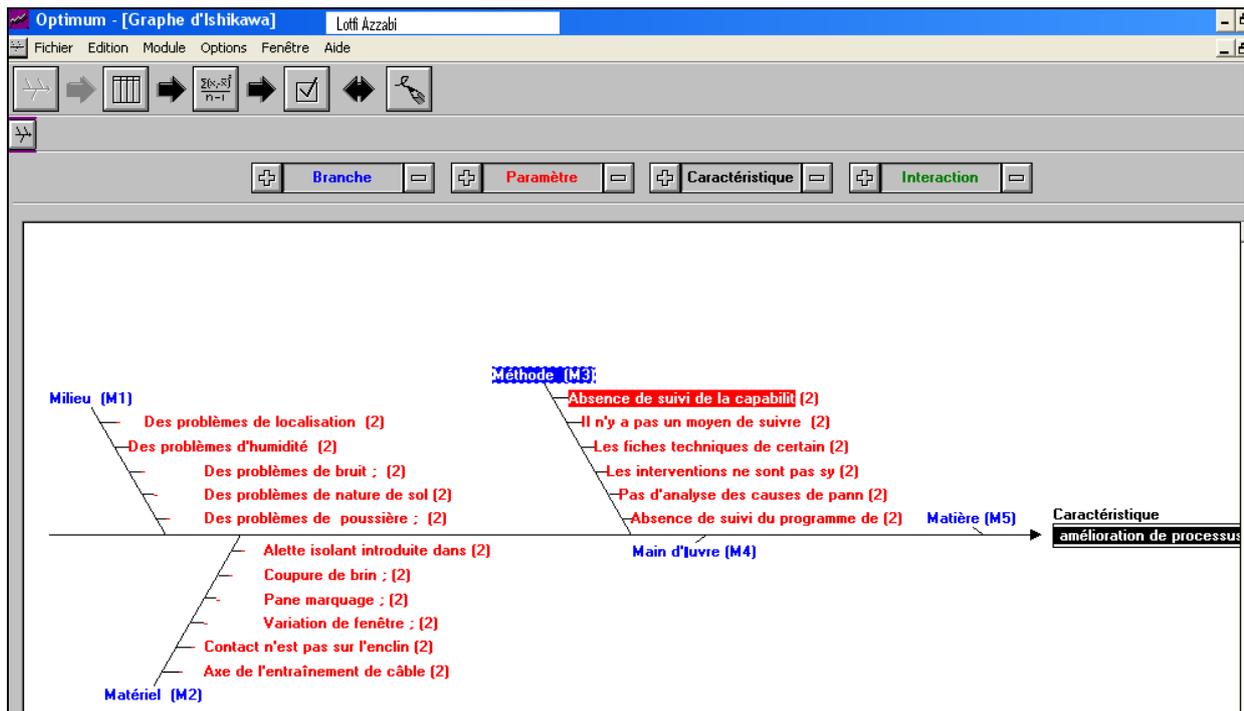


Figure. 83 Graphique d'Ishikawa pour les problèmes de M1 ,M2 et M3

- (M4) : Main d'œuvre

- Description des Main d'œuvre

C'est le personnel, les membres, la hiérarchie... toute personne qui contribue à la marche de l'entreprise n'est plus précisément au processus de coupe qui est :

- Le responsable de production,
- Les opérateurs qualifiés,
- Les personnes de maintenance,
- Contrôleur qualité,
- Animatrice qualité.

- Identification des problèmes

Les problèmes des Main d'œuvre, sont :

- Problème de compétence,
- Problème d'organisation,
- Problème de management,
- Problème de formation.

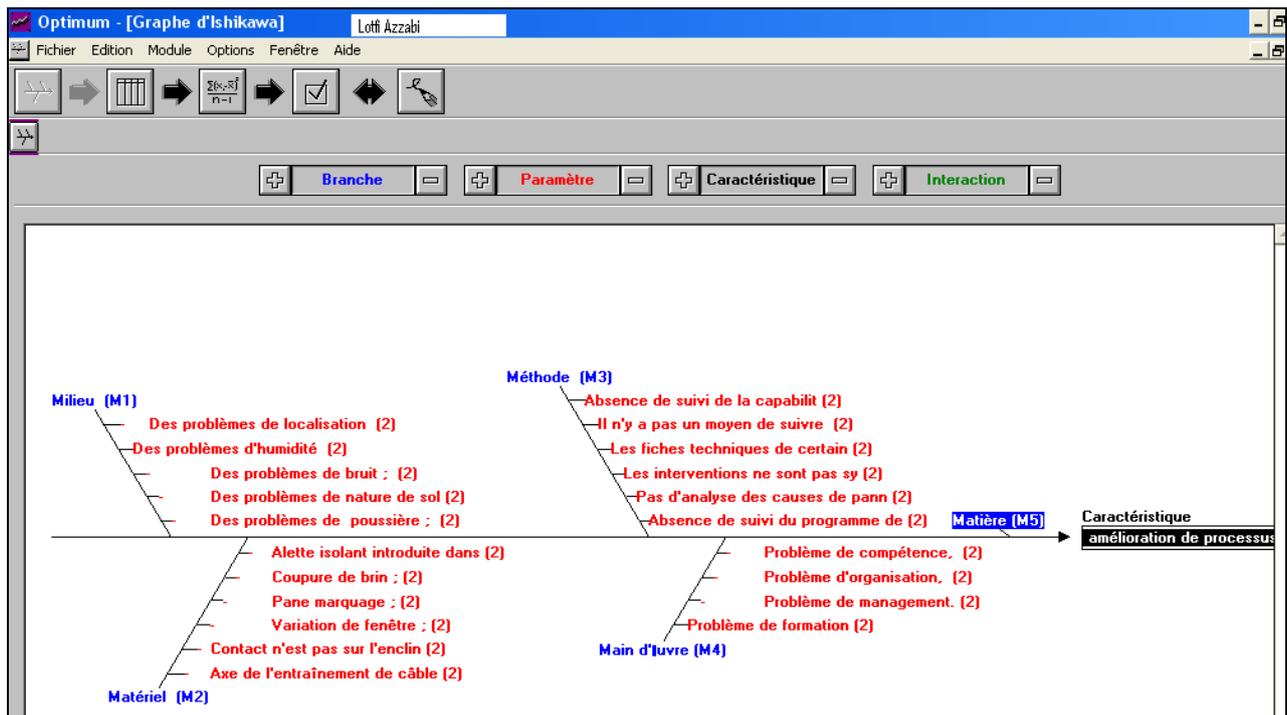


Figure. 84 Graphique d'Ishikawa pour les problèmes de M1,M2,M3 et M4

- (M5) : Matière

- Description des Matières

C'est tout ce qui est consommable, les fluides, les matières premières, le papier...

Dans notre cas d'étude il s'agit des bobines des fils, ...

- Identification des problèmes

- Il n'y a pas un guichet auquel s'adressent les cheftaines pour prendre leurs besoins en matière première, donc il y a un risque de prendre de la matière première sans enregistrer la sortie de ces composants.
- Les demandes de sortie matière sont verbales, il y a un risque que le magasinier oublie d'enregistrer ces sorties.
- Il n'y a pas un logiciel fiable qui aide à faire l'approvisionnement et il y a un risque d'erreurs humaines lorsqu'on travaille sans logiciel à cause du grand nombre des références matière première.

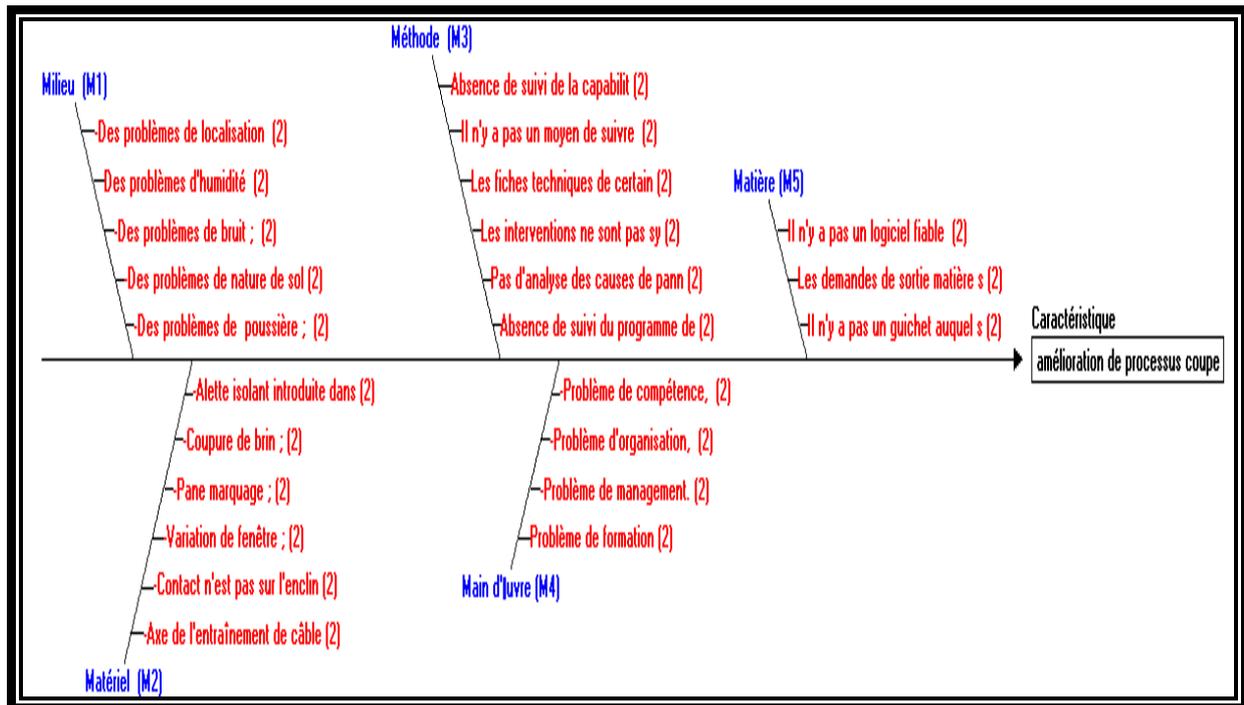


Figure. 85 Graphique d'Ishikawa pour les problèmes de M1, M2, M3, M4 et M5

### 3.2.3 Définir l'objectif à atteindre

L'objectif de notre étude est :

L'amélioration de système de production et plus particulièrement le processus coupe (Améliorations des 5 M de processus coupe) et ceci par la maximisation de l'utilité des solutions proposées et de leurs niveaux de réalisation.

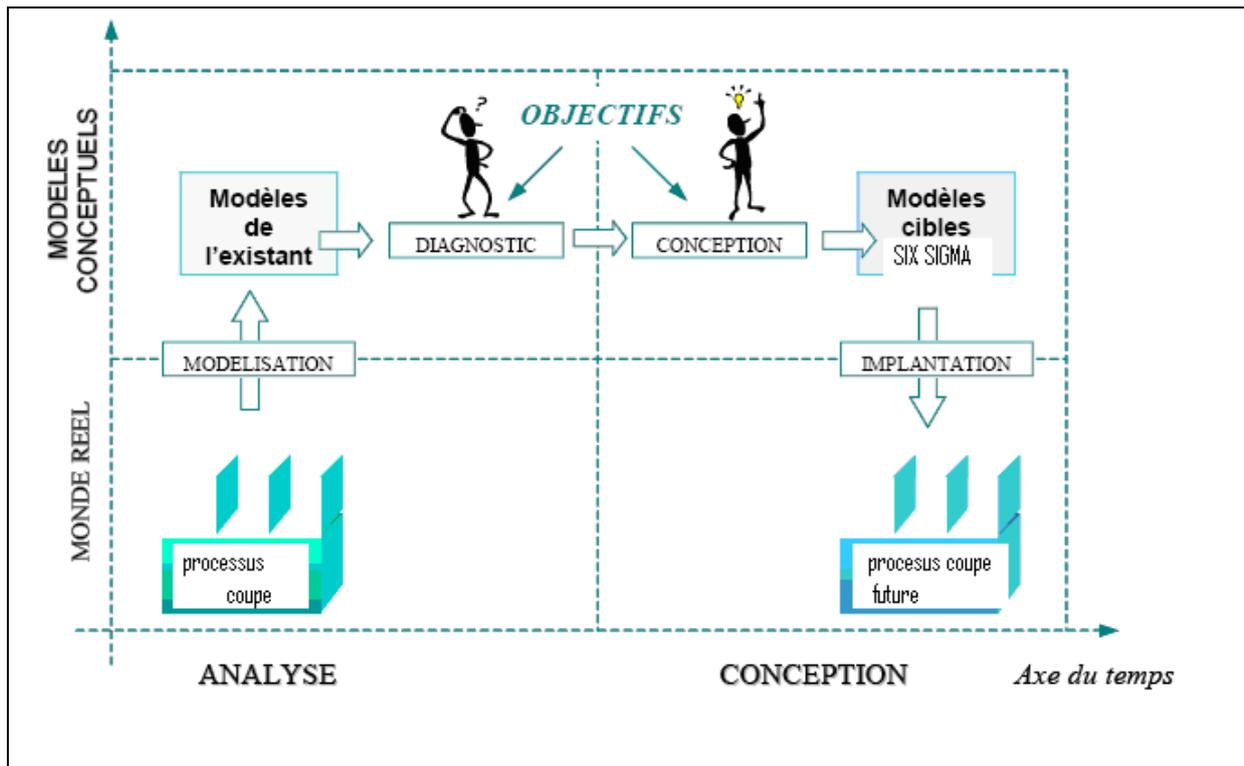


Figure. 86 Démarche de réorganisation

### 3.3 Etape 2: Mesurer

Une fois les problèmes définis, on peut commencer par décrire la situation actuelle par la mesure. Le recueil des informations se focalise sur les données les plus pertinentes. Pour cela nous allons rechercher les données mesurables caractérisant le processus concerné, mesurer le résultat existant.

Après avoir déterminé les problèmes rencontrés, on peut commencer par mesurer l'aptitude du processus en question en mesurant par exemple le rapport du nombre de non conformités réalisées sur le nombre des non conformités possibles.

Certaines entreprises comptent le nombre de non conformités qui se produisent, mais pas le nombre d'événements, elles ne savent donc pas vraiment de quoi le processus est capable, ni son niveau actuel.

Pour cela nous allons valider notre processus de mesure par identification de deux processus élémentaire :

- Le processus principal (processus coupe),
- Ces 5 M (Moyen, Milieu, Méthodes, Matière, Main-d'œuvre).

Le processus de mesure doit avoir des propriétés de répétabilité (plusieurs mesures dans les mêmes conditions doivent donner un résultat similaire) et de reproductibilité (indépendance de

la mesure à un changement de condition tel que l'opérateur) afin que sa dispersion soit faible par rapport aux variations de la réponse Y.

Un des objectifs de l'étape « Mesurer » est de mettre en place un processus de mesure capable de traduire la façon dont on peut satisfaire le client. Et il faut bien maîtriser le processus avant de l'utiliser.

Une partie de la dispersion provient du processus de production, et une autre du processus de mesure.

### ***3.3.1 Etude de l'aptitude du processus coupe***

- **Etude de la stabilité**

#### **-Données**

Une fois les problèmes bien définis, on peut commencer par mesurer l'aptitude du processus en question. Des fils sont coupés par la machine KOMAX, on prélève sur le court terme des échantillons à intervalles réguliers pour contrôler leurs hauteurs. On veut vérifier que cette machine est capable de produire des pièces dans les tolérances fixées par la norme.

Prenons l'exemple de client : EAGLE. Désignation de l'équipement : Outil de sertissage pour terminal de réf: 7114-4103-02,

Code interne : EA-06,

Caractéristique de contrôle : Mesure des hauteurs sur cuivre pour 50 échantillons,

Valeur de la caractéristique ( $V_c$ ) : 1,4 mm pour la section 0,75 mm<sup>2</sup>,

Type de l'action de capacité : Phase contrôle ordinaire  $C_{mk} \geq 1,67$ ,

Moyen de Contrôle : Dynamomètre,

Tolérance maxi :  $T_M$  : 1,45,

Tolérance mini :  $T_m$  : 1,35.

- **Etude de la normalité**

Avant de tracer la carte (X, S) de Shewhart, il faut vérifier l'hypothèse de normalité des observations.

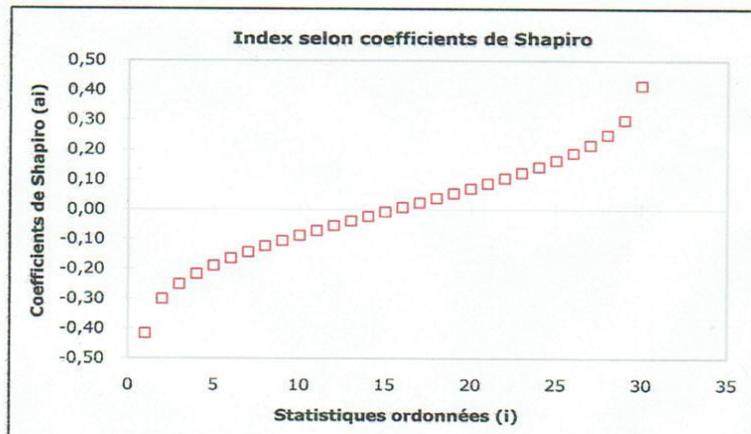
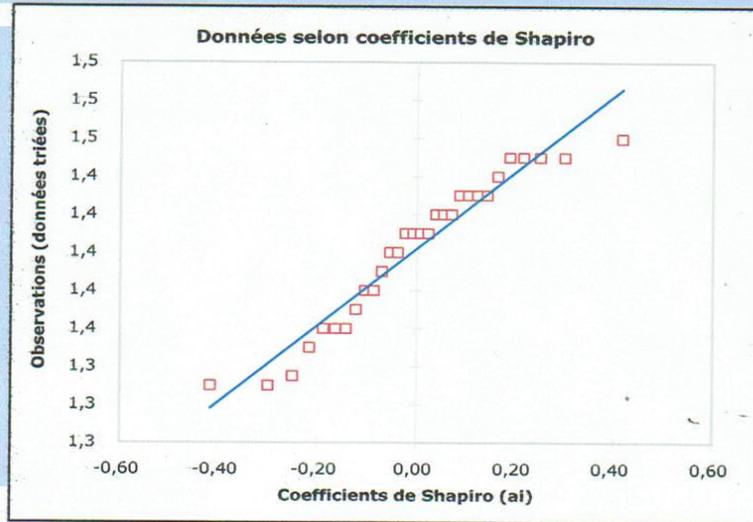


Figure. 87 Coefficient de Shapiro (ANNEXE 1).

### 3.3.2 Cartes de contrôle

- **Carte de contrôle individuelle**

Pour mieux visualiser les prélèvements nous avons tracé une carte de contrôle individuelle pour voir s'il y a présence des points qui dépassent les limites de contrôle. La figure n°88 montre le résultat de mesure .on attend que quelque point sont hors limites.

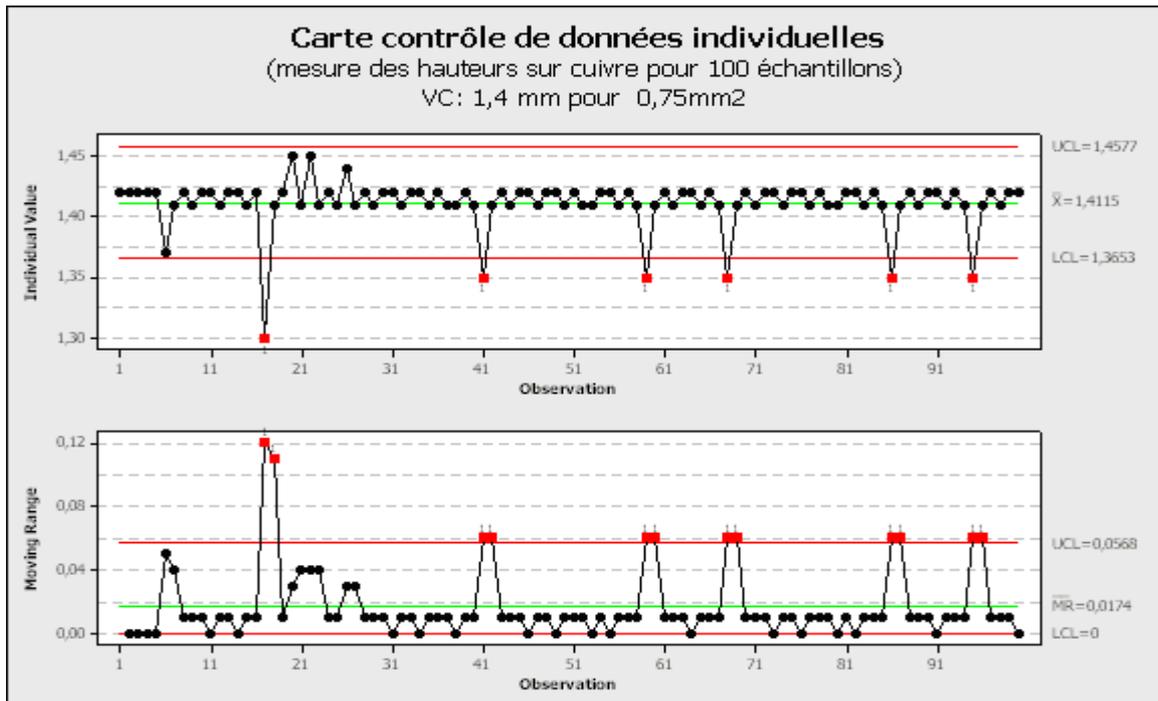


Figure. 88 Carte de contrôle individuel (ANNEXE 2)

#### - Carte de contrôle EWMA

Lorsque l'on cherche à mettre en évidence de petit dérèglement du procédé, il convient d'utiliser la carte de contrôles moyens mobiles avec pondérations exponentielles (La carte EWMA).

Ainsi en examinant la carte EWMA nous trouvons la présence des points à l'extérieur des limites de contrôle, le procédé est déclaré hors contrôle. Les points hors limites indiquent les moments où les causes spéciales sont présentées dans le procédé.

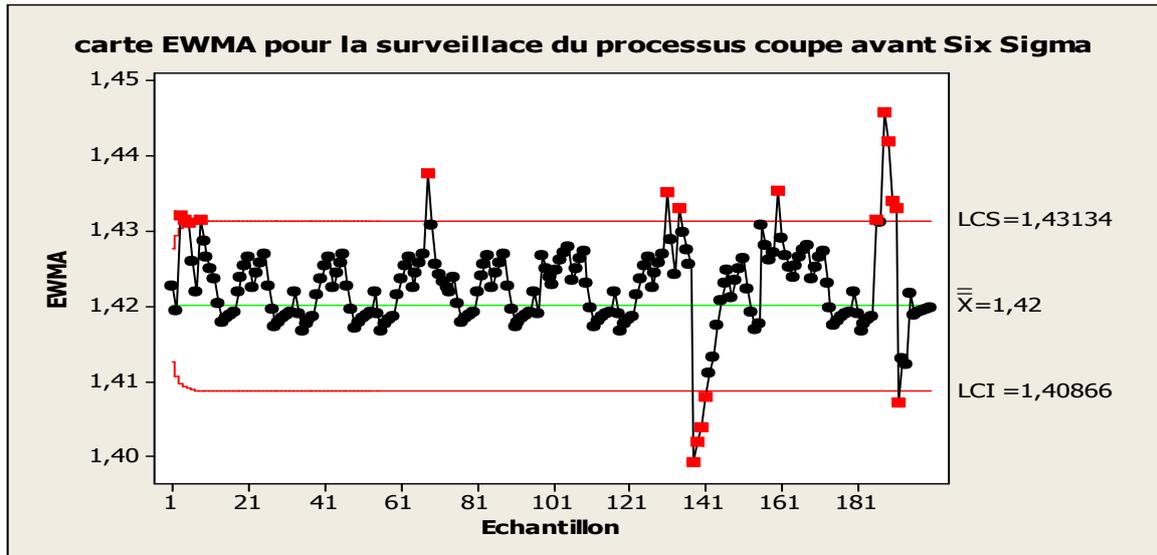


Figure. 89 Carte EWMA pour la surveillance du processus coupe (ANNEXE 3)

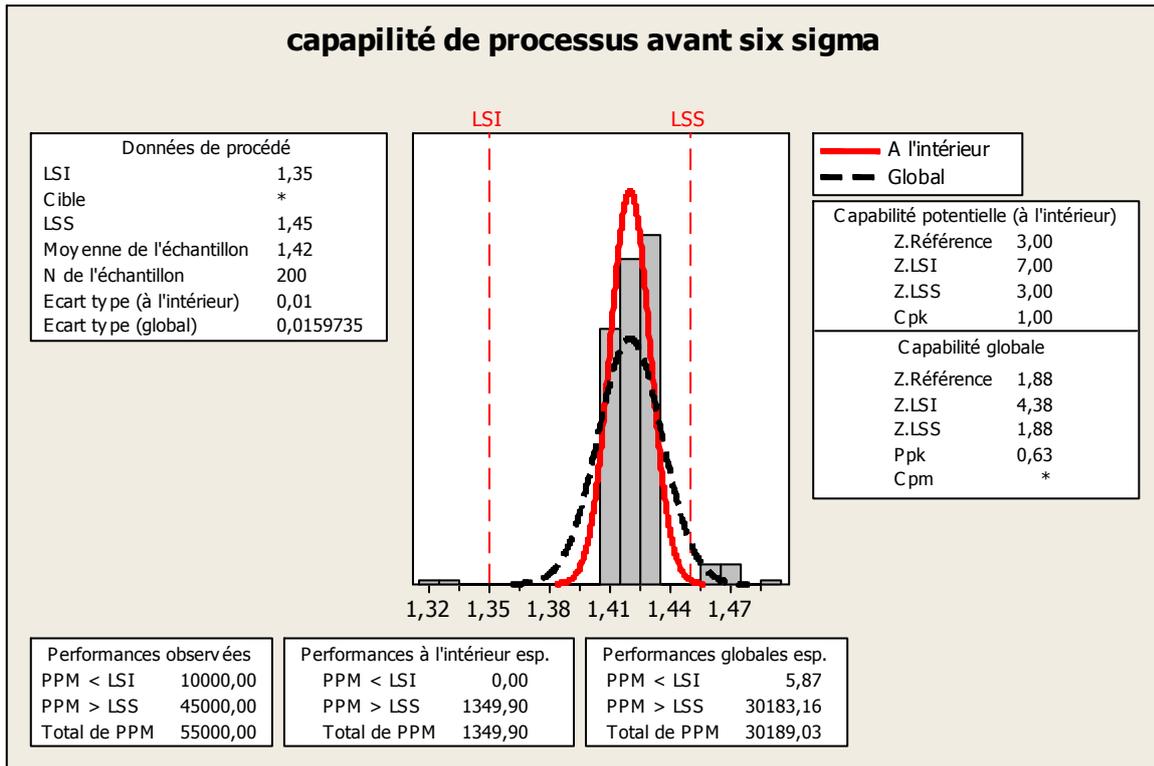
Donc il faut déterminer les causes de ces anomalies qui seront l'objet de l'étape analyser.

### 3.3.3 Capacité de procédé de processus coupe

La capacité est une analyse importante car la qualité est la satisfaction du client. Or le calcul de capacité fait entrer dans le calcul statistique les besoins du client. C'est le moment où l'entreprise peut vérifier qu'elle est en mesure de répondre à un cahier des charges. Les calculs présentés ci dessous se font donc avec des pièces déjà produites.

Notre procédé correspond à une combinaison des **5 M** (Main-d'œuvre, Matériaux, Machines, Méthodes, matières)

Selon AFNOR X06-030 : « Un processus sera déclaré "apte" s'il a démontré, pour les caractéristiques sélectionnées, qu'il était capable de produire pendant une période suffisamment longue, avec un taux théorique de non-conformités inférieur aux exigences internes à l'entreprise ou contractuelles. Ce taux est fréquemment fixé à partir de la valeur de l'écart type  $\sigma$  ( $\approx 6\sigma$ ).



**Figure. 90** Capabilité du processus coupe avant Six Sigma (ANNEXE 3)

Cp n'exige pas la connaissance de la moyenne pour son évaluation. L'indice Cpk est introduit afin de donner une certaine influence à la moyenne.

- Cp et Cpk supérieurs à 1 procédé capable et bien centré,
- Cp>1 et Cpk<1 procédé capable et mal centré,
- Cp<1 procédé non capable.

Ainsi dans notre cas le cpk <1 donc le procédé capable et mal centré.

### 3.3.4 La capabilité de la machine KOMAX Cm et Cmk

**La capabilité** d'une machine est l'aptitude de cette machine à réaliser des pièces bonnes.

Avec une distribution normale des valeurs, l'indicateur de capabilité  $C_m$  tient compte à la fois, de la dispersion de la machine et du centrage de la valeur moyenne  $\bar{X}$ , par rapport aux spécifications.

**La capabilité** d'une machine ou d'un système est donnée par la relation :

$$C_{ms} = \frac{T_s - \bar{X}}{3\sigma} \text{ et } C_{mi} = \frac{\bar{X} - T_i}{3\sigma}$$

Avec ,  $T_s$  et  $T_i$  : sont respectivement limite supérieure et limite inférieure de la tolérance,

$\bar{X}$  : moyenne ;  $\sigma$  : écart - type de la dispersion de la machine.

L'amplitude de la capabilité est reconnue bonne si chacun de ces deux termes est égal ou supérieur à 1.

Autrement dit  $C_m = \frac{T_s - T_i}{6\sigma} > 1$  en considérant l'inégalité strict dans les deux relations précédentes.

Avec :

- $T_s - T_i$ , limite supérieure de tolérance - limite inférieure = intervalle de tolérance.
- $\sigma$  écart - type de la dispersion de la machine.

Les industriels se basent sur des normes bien données pour définir la capabilité de leurs procédés et de leurs machines. Comme par exemple la norme « AFNOR X06-030 ».

La capabilité machine **C<sub>m</sub>** et **C<sub>mk</sub>** : Ces calculs se font à partir de 50 pièces fabriquées de manière consécutive sans changer de réglage. Lorsqu'une pièce passe à travers différentes machines, les variances s'ajoutent.

Pour les industriels le **C<sub>m</sub>** doit être supérieure à 1,33.

- Si **C<sub>m</sub>** et **C<sub>mk</sub>** supérieurs à 1,33 machine capable et bien centrée,
- Si **C<sub>m</sub>** > 1,33 et **C<sub>mk</sub>** < 1,33 machine capable et mal centrée,
- Si **C<sub>m</sub>** < 1,33 machine non capable.

Pour notre cas **C<sub>m</sub>** = 1,66 > 1,33 et **C<sub>mk</sub>** < 1,33 donc Komax est capable de produire mais elle est mal centrée.

Utiliser l'histogramme des capabilités comme dans la **Figure. 90** c'est pour évaluer la normalité des données et pour comparer les lois de distribution avec des valeurs hypothétiques de la variation à l'intérieur des sous-groupes et de la variation globale . L'histogramme des mesures comporte les éléments suivants :

- Les courbes "à l'intérieur" (rouge) et globale (noire) sont superposées dans l'histogramme. Ces courbes sont des fonctions de densité de probabilité normales utilisant la moyenne du procédé et différentes variances. La courbe "à l'intérieur" utilise la variance à l'intérieur des sous-groupes alors que la courbe globale utilise la variance globale de l'échantillon.

Evaluer la normalité des données en comparant la courbe et l'histogramme. Une loi normale est symétrique et en forme de cloche. Examiner les courbes pour vérifier si elles sont proches l'une de l'autre. Une différence substantielle entre les courbes "à l'intérieur" et globale peut indiquer que le procédé est hors contrôle ou qu'il existe des sources de variation que la composante "à l'intérieur" n'a pas estimées.

- La cible et les limites de spécification supérieure et inférieure sont représentées sur l'histogramme par les lignes pointillées verticales vertes et rouges. Comparer les barres de l'histogramme aux lignes pour évaluer :
  - Si les mesures sont centrées sur la cible,
  - Si les mesures sont à l'intérieur des limites de spécification.

Dans le graphique d'analyse de capabilité, la section sur les données du procédé comporte les éléments suivants :

- Limites de spécification supérieure et inférieure (LSS et LSI) : ce sont les limites que nous avons spécifiées,
- Cible : valeur de la cible que nous avons spécifiée,
- Moyenne : moyenne de toutes les mesures, autour de laquelle le procédé est centré,
- N de l'échantillon : nombre total d'observations dans les données,
- Ecart type "à l'intérieur" : mesure de la variation à l'intérieur des sous-groupes,
- Ecart type global : mesure de la variation de l'ensemble des mesures.

Une différence substantielle entre les indices de capabilité globale et "à l'intérieur" peut indiquer que le procédé est hors contrôle ou que les sources de variation ne sont pas estimées par la composante de variation à l'intérieur des sous-groupes.

Il est à noter qu'un écart de 1,5 Sigma correspond à un écart de 0,5 de Cp. Autrement dit un résultat de 6 Sigma sur le long terme représente un Cp de 2, et sur le court terme un CP de 1,5.

### ***3.4 Etape 3: Analyser***

Si toutes les phases de la démarche DMAIC sont importantes, la phase d'Analyse est souvent considérée comme majeure car elle oriente sur les solutions à mettre en œuvre à partir des données préalablement recueillies. L'analyse va consister à rechercher les causes qui ont un effet négatif sur le dysfonctionnement du processus coupe. Pour cela nous allons déterminer toutes les causes. Nous allons appliquer l'approche « MACBETH » qui est une approche pratique d'aide à la décision destinée à évaluer des options compte tenu de critères multiples.

#### ***3.4.1 Identification des causes de dysfonctionnement***

Suite à la phase de mesure, on arrive à mieux comprendre le fonctionnement des différents sous système et à analyser la situation courante de l'entreprise. Donc il devient plus aisé de dégager les différents dysfonctionnements du système.

Ce travail est présenté sous forme des tableaux qui présentent les causes des 5 M du processus coupe comme suit :

<b>Causes 1 : les causes qui ont un impact direct sur M1</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Le milieu de travail sain par la mise en œuvre d'un programme de sécurité n'est pas assez satisfait.</li><li>• Absence d'un système de contrôle de l'humidité.</li><li>• La fréquence du bruit n'est pas mesurée.</li></ul>

**Tableau. 23 Les causes de dysfonctionnement de M1**

<b>Causes 2 : les causes qui ont un impact direct sur M2</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• La fréquence de suivi de la capacité des machines ce qui engendre des non conformités est insuffisante.</li><li>• Le suivi de la maintenance des machines pour quelques interventions est non justifié.</li><li>• La planification de la maintenance est parfois mal définie ou mal appliqué.</li><li>• Les causes racines des pannes sont mal définis et les actions d'interventions sont plutôt curative que préventives.</li></ul>

**Tableau. 24 Les causes de dysfonctionnement de M2**

<b>Causes 3 : les causes qui ont un impact direct sur M3(Méthode)</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Les interventions ne sont pas systématiquement enregistrées.</li><li>• Les interventions ne sont pas planifiées et gênent la production dans la plupart des cas.</li><li>• Les fiches techniques de certaines machines ne sont pas disponibles.</li><li>• Absence de suivi des coûts relatifs à la maintenance.</li><li>• Les coûts engendrés par l'arrêt de la production (Le manque à gagner) ne sont pas valorisés</li><li>• Mauvais gestion des pièces de rechanges par le service maintenance.</li></ul>

**Tableau. 25 Les causes de dysfonctionnement de M3**

<b>Causes 4: les causes qui ont un impact direct sur M4 (Main d'œuvre)</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Manque de qualification absolue pour certaines opératrices.</li><li>• Mauvaise répartition des opérateurs dans leurs postes par rapport au planning.</li><li>• Mauvaises utilisations des instructions des postes de travail.</li></ul>

**Tableau. 26 Les causes de dysfonctionnement de M4**

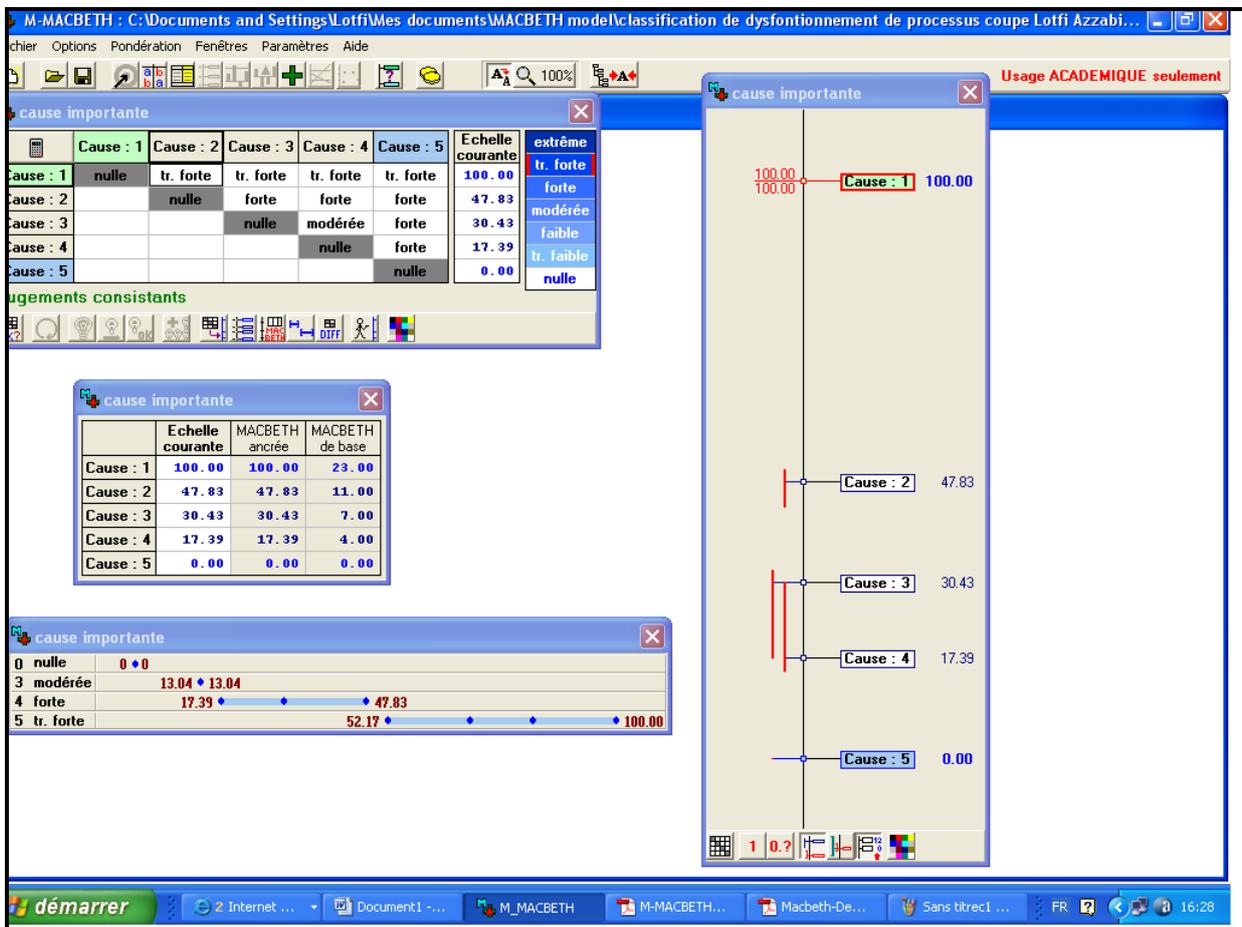
<b>Causes5: les causes qui ont un impact direct sur M5 (Matière Première)</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Les références sur des bobines sont ignorées.</li><li>• Les sorties et les appels des M.P ne sont pas maîtrisées.</li></ul>

**Tableau. 27 Les causes de dysfonctionnement de M5**

### 3.4.2 Application de la méthode MACBETH

Nous allons appliquer l'outil logiciel MACBETH qui permet au décideur de formuler ses préférences et d'obtenir rapidement une évaluation des actions sur une échelle numérique sans avoir à formuler le programme linéaire. L'outil MACBETH est très convivial, facile à apprendre et à manipuler. Par ailleurs, il englobe plusieurs options dont notamment la détection des incompatibilités (situation d'incohérence et / ou situation d'inconsistance sémantique).

L'outil suggère des alternatives pour traiter l'incompatibilité. L'utilisation de cet outil pour la matrice des jugements de la **Figure. 91** a permis de générer l'échelle numérique de base présentée ci-dessous.

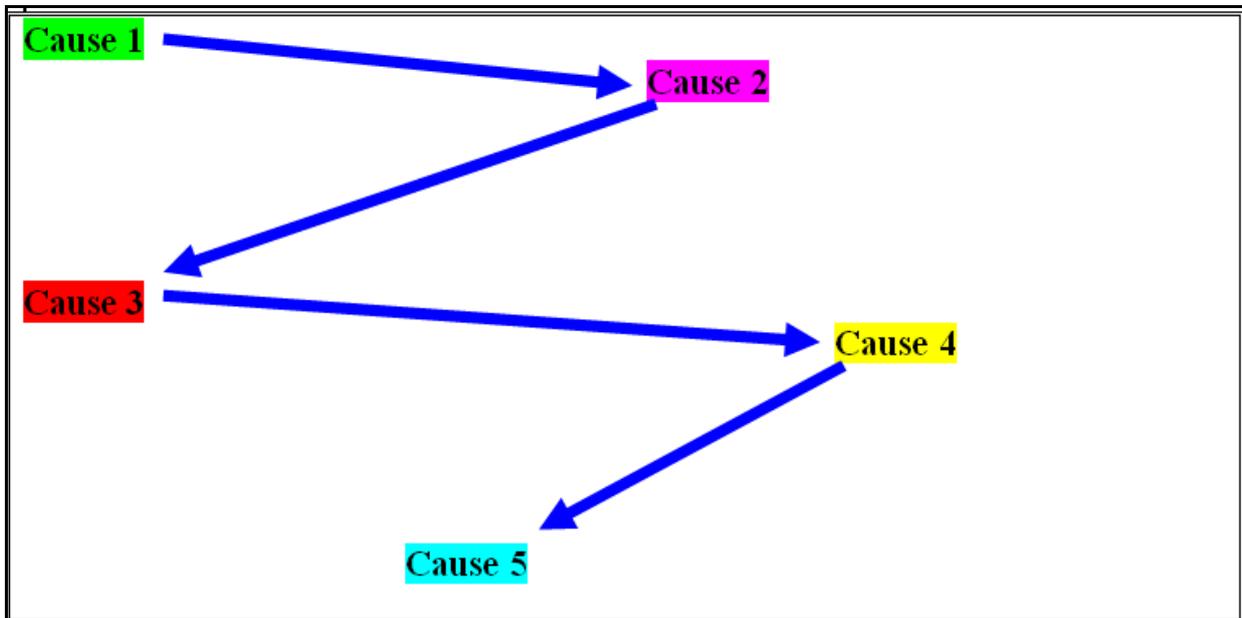


**Figure. 91** Résultat d'application de la méthode MACBETH

Nous avons utilisé le terme « échelle intervalle » dans notre exemple. Cette terminologie est due au fait suivant : à chacune des catégories  $\{C_0 : \text{nulle}, C_1 : \text{très faible}, \dots, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6 : \text{extrême}\}$ , nous associons un intervalle. Par exemple, dans la **Figure. 91**, la différence d'attractivité entre deux actions est considérée « forte » si l'écart de leurs évaluations respective appartient à l'intervalle  $[17.39 ; 47.83]$ .

La détermination des intervalles correspondant aux catégories est très simple. Elle se fait de la façon suivante : d'abord, sélectionner une catégorie (par exemple : C<sub>5</sub> : très forte). Ensuite, déterminer la différence des scores de chaque paire d'actions appartenant à la catégorie objet de l'étude (pour la catégorie C<sub>5</sub> :  $\Phi$  (cause 1) –  $\Phi$  (cause 4) = 82.61,  $\Phi$  (cause 2) –  $\Phi$  (cause 4) = 30.44,  $\Phi$  (cause 3) –  $\Phi$  (cause 5) = 30.43,  $\Phi$  (cause 4) –  $\Phi$  (cause 5) = 17.39). La différence de score la plus faible et la différence la plus forte constituent les bornes de l'intervalle (Ainsi, pour la catégorie C<sub>5</sub>, l'intervalle est [17.39; 82.61]).

Donc la classification des causes sera :



**Figure. 92 Classement des causes**

Après avoir repéré les causes principales pour le dysfonctionnement de processus coupe nous allons passer à l'étape améliorer afin de définir les solutions correspondant aux causes profondes

### ***3.5 Etape 4: Améliorer***

Il faudra alors innover pour améliorer les processus concernés, ceux dont les paramètres sont critiques pour la qualité, et mettre en œuvre des solutions innovantes.

Après avoir analysé toutes les causes qui sont responsables de tous les problèmes dans le processus coupe, nous allons déterminer les solutions possibles afin d'améliorer ce dernier.

### 3.5.1 La génération des solutions

Après des séances de brainstorming nous avons généré les solutions suivantes :

Les solutions
<ul style="list-style-type: none"><li>- Un système de santé efficace grâce à un milieu de travail sain (SM11),</li><li>- Améliorer les voies de circulations (SM12),</li><li>- Création d'un milieu de travail sain par la mise en œuvre d'un programme de sécurité (SM13),</li><li>- Projet de création d'un plan d'action préventif sur la santé en milieu de travail par l'analyse intégrée de données (SM14),</li><li>- Création d'un protocole d'évaluation des risques professionnels au poste de travail afin de minimiser le bruit (SM15),</li><li>- Résoudre le problème de l'humidité car elle a un effet négatif pour les fils électrique et pour les personelles (SM16),</li><li>- Améliorer la luminosité de milieu travail (SM17),</li><li>- S'intéresser à l'application de la maintenance préventive régulière (SM21),</li><li>- Améliorer la performance des machines, réduire les temps d'arrêt machine et par la suite garantir la qualité et les délais (SM22),</li><li>- changer Komax par bt 722 qui a une presse de sertissage de table qui se caractérise par une durée de cycle rapide, des temps de conversion et de réglage courts ainsi qu'une surface utilisateur TopTouch conviviale. Livrable en option avec le dispositif programmable de dénudage et le dispositif de coupe de pièces défectueuses, cette presse garantit une confection de câbles de très haute qualité, sans intervention de l'opérateur (SM23),</li><li>- Les fiches de suivi des pannes machines doivent être remplit avec rigueur (SM24),</li><li>- Consigner les dépenses et bien estimer les coûts des travaux d'entretien et de maintenance afin de tenter de les réduire, car il s'agit d'une charge indirecte relative à un service non productif au sein de l'entreprise (SM25),</li><li>- Utiliser des indicateurs de performance au niveau maintenance qui indiquent la disponibilité des machines, et qui donnent une idée sur leurs états de fonctionnement, ainsi que sur la consommation des pièces de rechanges (SM26),</li><li>- Améliorer les systèmes d'arrêt automatique (affichage du type d'arrêt ainsi que des causes), (SM27),</li><li>- Améliorer l'implantation des 5S (application du PDCA) (SM31),</li><li>- Introduire la méthode Six Sigma dans les bureaux (SM32),</li></ul>

- Améliorer davantage les standards de layout et d'entreposage (SM33),
- Développer des outils adéquats de maîtrise et gestion du temps (SM34),
- Consolider les indicateurs de performances clients (SM35),
- Appliquer la MSP "Maîtrise statistique des processus" qui permet de détecter le dérèglement du processus avant l'apparition de la non-conformité et par la suite donner la possibilité d'agir pour régler le processus au bon moment (SM36),
- Appliquer la méthode AMDEC afin d'agir directement sur la cause, éviter la réapparition des défauts (SM37),
- Sensibiliser les opérateurs de production ainsi que celles du contrôle qualité à la notion de TQM "Total Quality Management" en faisant des formations afin de garantir la qualité au niveau production et par la suite réduire les coûts de non-conformité (SM41),
- Former les ouvriers sur les modes de sécurité et mettre à leur disponibilité les moyens nécessaires pour leur sécurité et en particulier pour le bruit (SM42),
- Focaliser les formations sur le développement de l'esprit Six Sigma (SM43),
- Formation continue sur les besoins de l'entreprise (SM44),
- Etre plus flexibles aux modifications clients : les causes de défaillances, les actions correctives adéquates,... (SM45),
- Assurer efficacement la formation technique du personnel, pour qu'il maîtrise les tâches qu'il est en train d'accomplir et pour assurer une polyvalence des opérateurs (SM46),
- Développer des indicateurs de santé et sécurité (SM47),
- Optimiser l'analyse des flux de stocks et des encours (SM51),
- Renouveler les objectifs (en termes du Lead time et du coût) en ce qui concerne le JAT client (SM52),
- Développer des méthodes efficaces pour diminuer les stocks et les encours (SM53),
- Assurer le suivi du logiciel avec le fournisseur afin de l'adopter aux besoins de SEDILEC (SM54),
- Affecter le magasin pièces de rechange ainsi que sa gestion au responsable magasin matière première afin de bien gérer les entrées et sorties des PDR (SM55),
- Rendre le magasin inaccessible que pour le magasinier afin d'éviter les erreurs au niveau de la valorisation de la quantité disponible en stock (SM56),
- Préparer des baguis de besoin quotidien de chaque ligne de production afin d'effectuer une seule opération de livraison par jour vers la zone de production (SM57).

**Tableau. 28 Génération des solutions proposées**

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>
SM11	Solution 1 de M1
SM12	Solution 2 de M1
SM13	Solution 3 de M1
SM14	Solution 4 de M1
SM15	Solution 5 de M1
SM16	Solution 6 de M1
SM17	Solution 7 de M1
SM21	Solution 1 de M2
SM22	Solution 2 de M2
SM23	Solution 3 de M2
SM24	Solution 4 de M2
SM25	Solution 5 de M2
SM26	Solution 6 de M2
SM27	Solution 7 de M2
SM31	Solution 1 de M3
SM32	Solution 2 de M3
SM33	Solution 3 de M3
SM34	Solution 4 de M3
SM35	Solution 5 de M3
SM36	Solution 6 de M3
SM37	Solution 7 de M3
SM41	Solution 1 de M4
SM42	Solution 2 de M4
SM43	Solution 3 de M4
SM44	Solution 4 de M4
SM45	Solution 5 de M4
SM46	Solution 6 de M4
SM47	Solution 7 de M4
SM51	Solution 1 de M5
SM52	Solution 2 de M5
SM53	Solution 3 de M5
SM54	Solution 4 de M5
SM55	Solution 5 de M5
SM56	Solution 6 de M5
SM57	Solution 7 de M5

**Tableau. 29 Tableaux des abréviations**

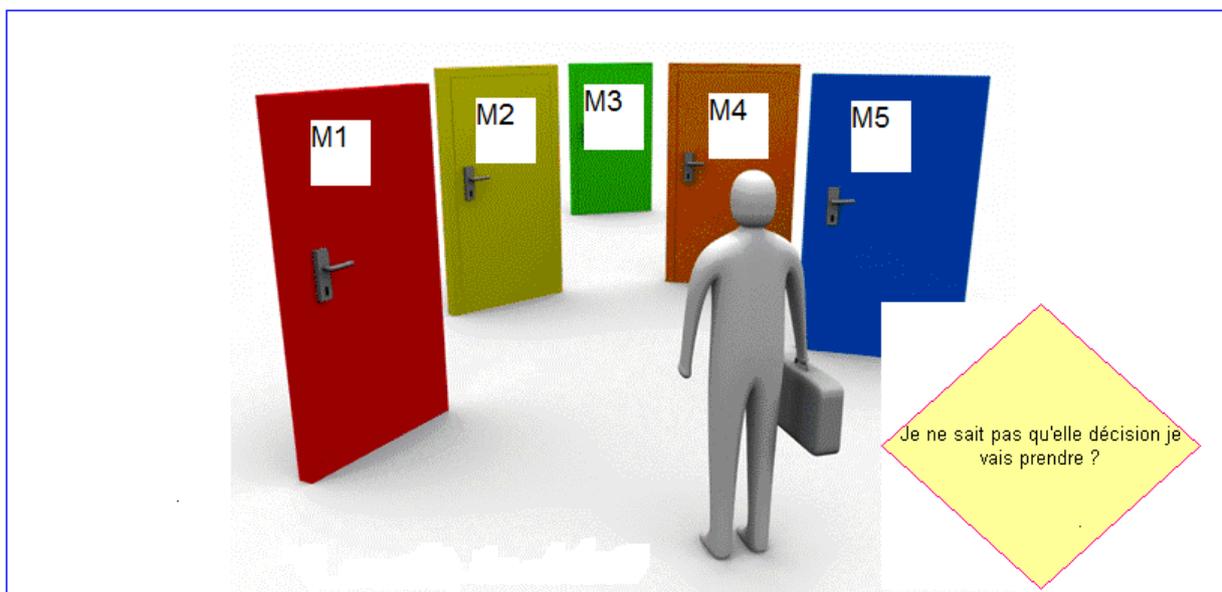
### 3.5.2. La prise de décision

La question maintenant devant cette quantité de solutions est de définir qu'elle est la décision qu'on va prendre ? Pour cela nous allons proposer une démarche intégrée d'aide à la décision pour améliorer le premier système de production (processus coupe).

Dans la suite de travail, « intégration » signifie : regrouper diverses entités ayant des interactions directes ou indirectes dans un ensemble unique afin de traiter cet ensemble et au lieu de traiter séparément chaque entité.

Mais il faut remarquer que l'intégration de toutes les décisions ayant des interactions, risque de nécessiter un modèle très grand et un ensemble d'information très important, ce qui peut rendre très difficile l'application de ce type d'intégration. Rappelons que dans ce travail nous nous intéressons à l'intégration des cinq décisions opérationnelles d'un processus de production complexe qui sont :

- Amélioration de **Milieu** (M1)
- Amélioration de **Matériel** (M2)
- Amélioration de **Méthode** (M3)
- Amélioration de **Main d'œuvre** (M4)
- Amélioration de **Matière** (M5)



**Figure. 93 Proposition des décisions de choix**

L'intégration décisionnelle sera significative s'il existe une dépendance mutuelle entre décisions. On peut distinguer trois types de situations entre deux ou plusieurs décisions :

- Il n'y a pas de relation entre les décisions : dans cette relation deux décisions sont complètement indépendantes l'une de l'autre. Ceci signifie que, quelle que soit la solution retenue pour une décision, elle n'influera pas la solution optimale de l'autre. Dans cette situation une intégration décisionnelle n'amène aucun avantage.
- Une relation hiérarchisée. Dans cette situation une décision influe l'autre mais la réciproque n'est pas vraie. Dans ce cas, une solution globalement optimale peut être trouvée par une approche séquentielle. On trouve la solution optimale de la décision influente et ensuite on cherche la solution optimale de la décision dominée.
- Une relation mutuelle. Dans cette situation il y a une dépendance mutuelle des décisions. Une démarche indépendante ou une solution hiérarchisée ne garantissent pas d'arriver à la solution optimale. Dans ce cas une démarche intégrée sera nécessaire pour trouver la solution optimale. Ici, nous nous plaçons dans l'optique d'une démarche intégrée qui considère en même temps les cinq décisions. Vu l'importance de ces décisions et leur influence sur l'enchaînement de processus de production, tout effort pour améliorer le choix de l'entreprise sera important.

En absence d'une démarche intégrée l'entreprise peut traiter ces décisions en utilisant :

- Une démarche séparée. Selon cette approche chaque décision est prise à partir de critères qui lui sont propres. Autrement dit, le décideur ne considère pas les interactions entre les décisions,
- Une démarche hiérarchisée (ou séquentielle). On commence par la décision que l'entreprise estime la plus importante, en ne retenant que des critères indépendants des autres décisions. La deuxième décision sera prise en considérant le choix retenu pour la première décision et évidemment sans tenir compte des critères qui nécessitent le résultat de la troisième décision. La dernière décision sera prise en considérant les choix retenus pour les deux premières décisions.
- Une énumération complète des hiérarchisations possibles (6 hiérarchisations possibles dans le cas de trois décisions) on détermine la solution de chacune des hiérarchisations et on choisit la hiérarchisation qui donne la meilleure solution.
- Une démarche hiérarchisée avec des allers-retours (cycliques), en commençant par une décision et en revenant sur cette décision si nécessaire.

La première démarche ne propose pas généralement une solution optimale, car les décisions ne sont pas prises à partir de tous les critères. En effet dans cette démarche les critères dépendants ne sont pas pris en compte.

La deuxième démarche propose une solution meilleure que la première démarche, car on considère partiellement les critères dépendants. Mais la solution proposée par cette approche n'est pas toujours optimale car on ne considère pas la totalité des critères de décisions. Autrement dit la solution finale est le résultat d'une suite d'optimisations locales qui ne donnent pas toujours la solution optimale.

La troisième démarche examine un ensemble plus important de solutions possibles. Donc elle peut fournir une solution meilleure (en tout état de cause, pas plus mauvaise) que les deux premières approches.

La quatrième démarche, se situe entre une démarche intégrée et une démarche hiérarchisée. Cette démarche nécessite des règles de retour souvent très subjectives et difficiles à définir et à mettre en œuvre. Cette démarche de manière générale, ne trouve pas la solution optimale. Cette démarche peut être l'objet d'un travail de recherche intéressant.

### ***3.5.3 Analyse des relations inter-décisionnelles***

Cette section présente les interactions entre les cinq décisions : « décision d'améliorer M1 : DM1 », « décision d'améliorer M2 : DM2 », « décision d'améliorer M3 : DM3 », « décision d'améliorer M4 : DM4 » et « décision d'améliorer M5 : DM5 ». Cette analyse nous aide à mieux comprendre les dynamiques des relations entre ces décisions. Cette connaissance est essentielle pour développer une démarche intégrée d'aide à la décision.

Les Figures (94,95, 96,97, 98) montrent les modalités d'impact de chaque décision par apport aux autres décisions.

Rappelons que la décision A, a un impact (ou une influence) sur la décision B, si le choix adopté pour la décision A fournit des informations nécessaires pour décider sur B.

Autrement dit nous disons que la décision A, a un impact (ou une influence) sur la décision B, si le choix adopté pour la décision A influe sur un ou plusieurs des critères de décision de B. Ces critères sont appelés les « critères influencés » par la décision A.

### ***3.5.4 Analyse d'impact des cinq décisions***

- **Les critères d'amélioration de Milieu (M1)**

Les abréviations utilisées dans la Figure 94, sont les suivantes :

**A : Qualité de milieu de travail :**

**A.O : Minimiser le bruit dans l'entreprise.**

AF1 : une culture de sécurité.

AF2 : un milieu de travail sain par la mise en œuvre d'un programme de sécurité.

AF3 : un plan d'action préventif sur la santé en milieu de travail par l'analyse intégrée de données.

AF4 : un protocole d'évaluation des risques professionnels au poste de travail.

AF5 : les conditions de travail.

AF6 : les moyens d'amélioration.

**AI1 : formation des ouvriers.**

**AI2 : Qualification des ouvriers.**

**AI3 : Sensibilisation des ouvriers.**

**B. Les voies de circulations :**

**BO : Maximiser la possibilité de circuler facilement.**

BF1 : Distance entre les machines.

BF2 Position des chariots.

BF3 Localisation des machines et des bobines.

BI1 : l'ordonnancement des machines et des bobines.

**C : Luminosité :**

**CO : Maximiser l'accès à cet avantage.**

CF1 : les conditions de travail.

CF2 : nature des lampes.

CF3 : Position des lampes.

**CI 1: Le matériel.**

**D : Humidité :**

**DO : Minimiser l'humidité :**

DF1 : la condensation sur les murs extérieurs.

DF2 : Les infiltrations du sol.

DF3 : Les infiltrations pluviales.

DF4 : Les remontées capillaires.

**DI1 : Le milieu.**

**E : Sauvegarde de l'environnement.**

**EO : Minimiser l'effet indésirable sur l'environnement.**

EF1 : Moyen de se débarrasser des déchets.

EF2 : Technologie de production.

**EI 1: Matière.**

**F : Coût d'amélioration de Milieu.**

**FO : Minimiser le coût d'amélioration de Milieu.**

FF1 : Les moyens d'amélioration.

FF2 : Le temps pour l'amélioration.

**FI 1: Les méthodes appliquées.**

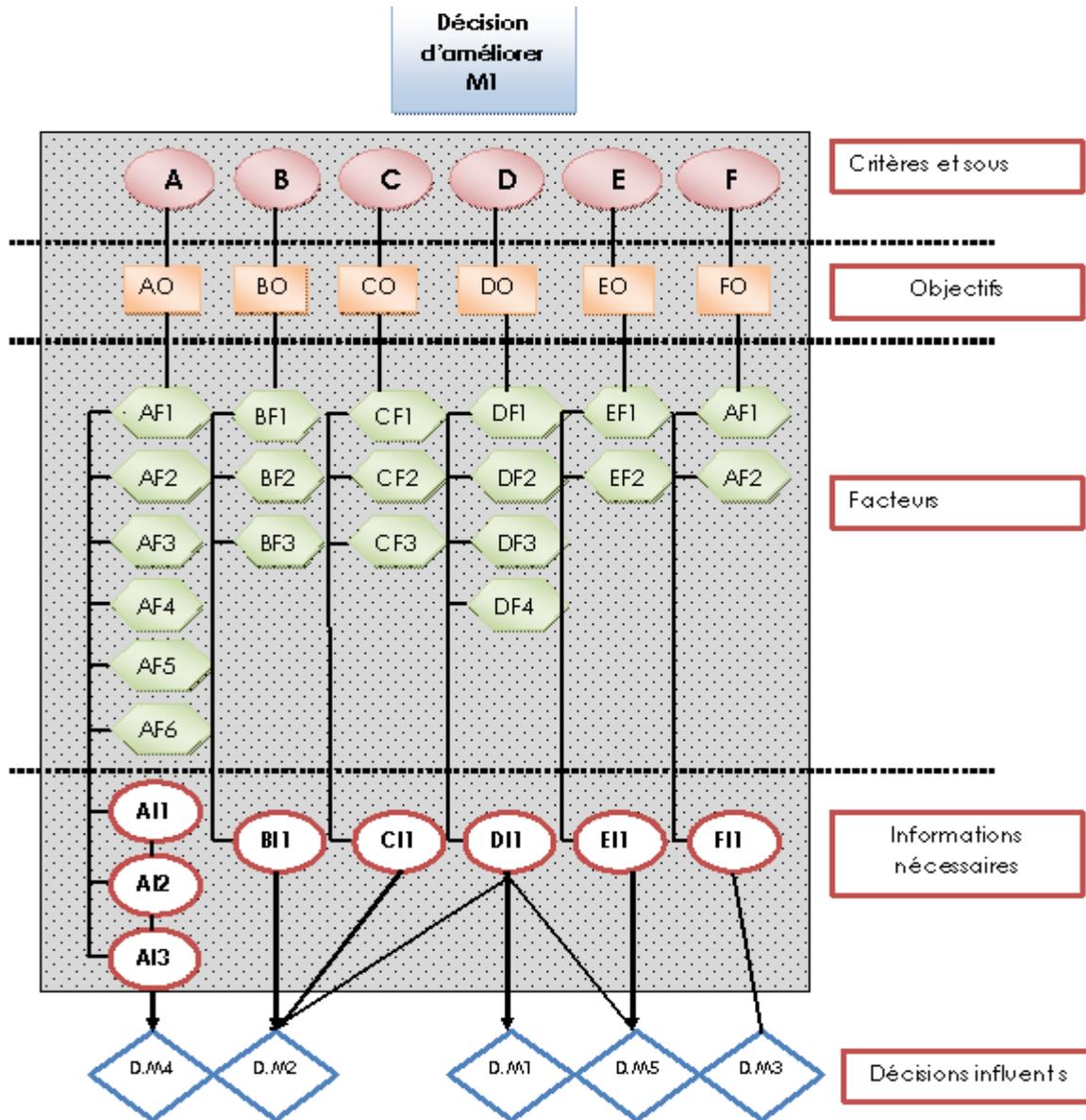


Figure. 94 Représentation graphique d'analyse d'impact de M1

- **Décision d'améliorer M1(DM1)**

Les critères influencés :

A : Qualité de milieu de travail

B. Les vois de circulations

C : Luminosité

D : Humidité

E : Sauvegarde de l'environnement

F : Coût d'amélioration de Milieu

Les modalités d'impact :

**A : Qualité de milieu de travail :**

L'entreprise souhaite minimiser le bruit dans l'entreprise (A.O) mais l'absence d'une culture de sécurité (AF1) et d'un protocole d'évaluation des risques professionnels au poste de travail (AF4) conduisent à un milieu de travail où la probabilité des risques professionnels est importante. Alors la formation des ouvriers (AI1), la qualification des ouvriers (AI2) et la sensibilisation des ouvriers (AI3) sont importantes pour créer un milieu de travail sain vis-à-vis de critère A. L'amélioration de milieu de travail dépend donc de la décision d'amélioration de main d'œuvre (DM4).

**B. Les voies de circulations :**

L'entreprise désire maximiser la possibilité de circuler facilement, alors que la mauvaise position des chariots (BF2), la mauvaise localisation des machines et des bobines (BF3) conduisent à une difficulté de circuler pour les ouvriers. Alors l'ordonnancement des machines et des bobines (BI1) est important pour élargir les voies de circulations. Ceci prouve que la décision d'améliorer les matériels (DM2).

**C : Luminosité :**

L'entreprise désire maximiser l'accès à cet avantage (CO), pour cela il faut d'abord connaître les conditions de travail (CF1), la nature des lampes (CF2) et les positions des lampes (CF3).

La luminosité joue un rôle important pour l'entreprise donc les lampes appartiennent à l'ensemble des matériels pour l'entreprise, et si on veut améliorer ce dernier il faut donc prendre la décision d'améliorer le matériel (DM2).

**D : Humidité :**

L'entreprise souhaite minimiser l'humidité (DO), pour mesurer ce critère il faut d'abord connaître la condensation sur les murs extérieurs (DF1), les infiltrations du sol (DF2), les infiltrations pluviales (DF3) et les remontées capillaires (DF4).

L'humidité a un effet négatif que se soit pour les ouvriers, pour les produits et pour les machines par conséquent la décision d'améliorer le milieu (DM1), matériel(DM2) et matière (DM5) influent ce critère de décision.

***E : Sauvegarde de l'environnement :***

L'entreprise désire minimiser l'effet indésirable sur l'environnement (EO), pour cela il faut d'abord appliquer des technologies de production (EF2) et des matières premières peu polluantes qui diminuent les effets négatifs sur l'environnement. Ceci prouve que la décision d'améliorer les matières (DM5) influe sur ce critère de décision.

***F : Coût d'amélioration de Milieu :***

Le Coût d'amélioration de milieu dépend de la qualité des moyens, des méthodes appliqués et des temps mis pour améliorer le milieu. Ceci prouve que la décision d'améliorer les méthodes (DM3) influe sur ce critère de décision.

- **Les critères d'amélioration de Matériel (M2)**

Les abréviations utilisées dans la Figure 95, sont les suivantes :

***G : Maintenance.***

**GO : Maximiser le rendement des machines.**

GF1 : les machines.

GF2 : Le temps d'arrêt machine.

GF3 : Les gaspillages.

GF4 : Ordonnancement des machines.

GF5 : L'humidité.

**GI1 : Formation des personelles**

***H : Suivi de programme des machines.***

**HO : Minimiser la quantité des pièces non-conformité.**

HF1 : Opérateur.

HF2 : Responsable de production.

HF3 : Le contrôleur de la qualité.

**HI 1: Qualification des mains d'œuvres.**

***I : Coût d'amélioration de Matériel.***

**IO : Minimiser le coût d'amélioration de matériel.**

IF1 : Les moyens d'amélioration.

IF2 : les machines.

IF3 : les lampes.

IF4 : Les logiciels.

**II1 : Les méthodes appliquées.**

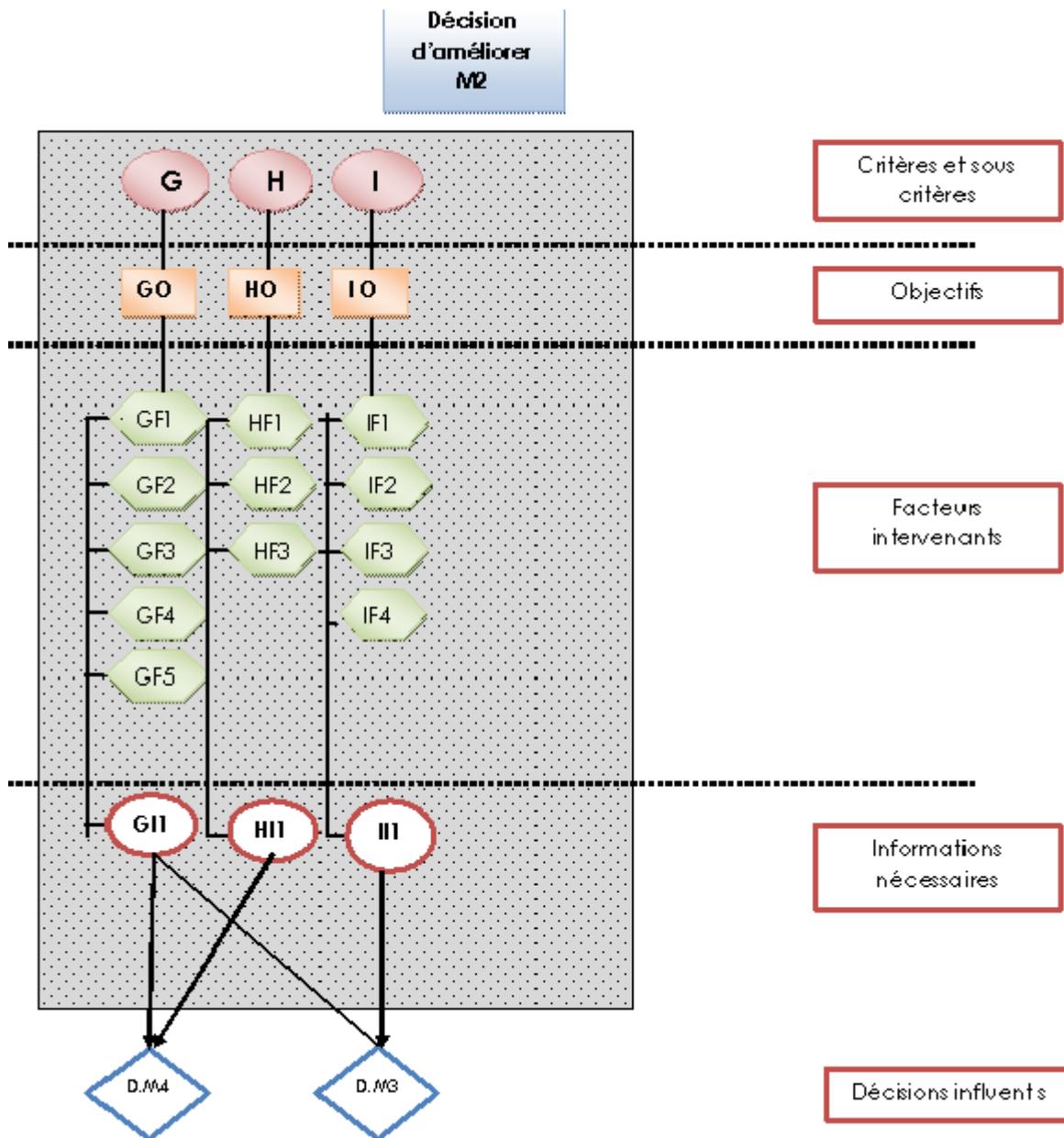


Figure. 95 Représentation graphique d'analyse d'impact de M2

- **Amélioration de Matériel**

Les critères influencés :

G : Maintenance

H : Suivie de programme des machines

I : Coût d'amélioration de matériel

Les modalités d'impact :

**G : Maintenance :**

L'entreprise souhaite maximiser le rendement des machines (**GO**) pour cela elle a besoin de s'intéresser à l'application de la maintenance préventive régulière et à la réduction des temps d'arrêt machine (IF2). Alors la situation de réviser les méthodes de travail ainsi que la formation des ouvriers sur les machines est importante. Donc les décisions d'améliorer les mains d'œuvre (DM4) et les méthodes (DM3) influent sur ce critère de décision.

**H : Suivre de programme des machines :**

L'entreprise souhaite minimiser la quantité des pièces non-conformes (**HO**) et ceci par la formation des opérateurs (HF1), des responsables de production (HF2) et de contrôleur de la qualité (HF3). Ceci prouve le suivi de programme des machines dépend de la décision d'améliorer la main d'œuvre (DM4).

**I : Coût d'amélioration de Matériel :**

Le Coût d'amélioration de matériel dépend de la qualité des moyens ( les machines (IF2) , les lampes (IF3) : et Les logiciels (IF4 )) et des temps mis pour améliorer les matériels . Ceci prouve que la décision d'améliorer les méthodes (DM3) influe sur ce critère.

- **Les critères d'amélioration de méthode (M3).**

Les abréviations utilisées dans la Figure 96, sont les suivantes :

**K : les avantages concurrentiels (qualité de produit et de service, coût de produit, ...).**

**K1 : Qualité du produit.**

**K 2: Prix.**

**K 3 : Flexibilité.**

**K10: maximiser l'accès à cet avantage.**

**K20: maximiser l'accès à cet avantage.**

**K30 : maximiser l'accès à cet avantage.**

KF1 : Matière première

KF2 : flexibilité des personnelles

**KI : Matière première**

**L : Coût d'amélioration de méthode.**

**LO : Minimiser le coût d'amélioration de méthode.**

LF1 : Les moyens d'amélioration.

LF2 : Le temps pour l'amélioration.

LI : Les méthodes appliquées.

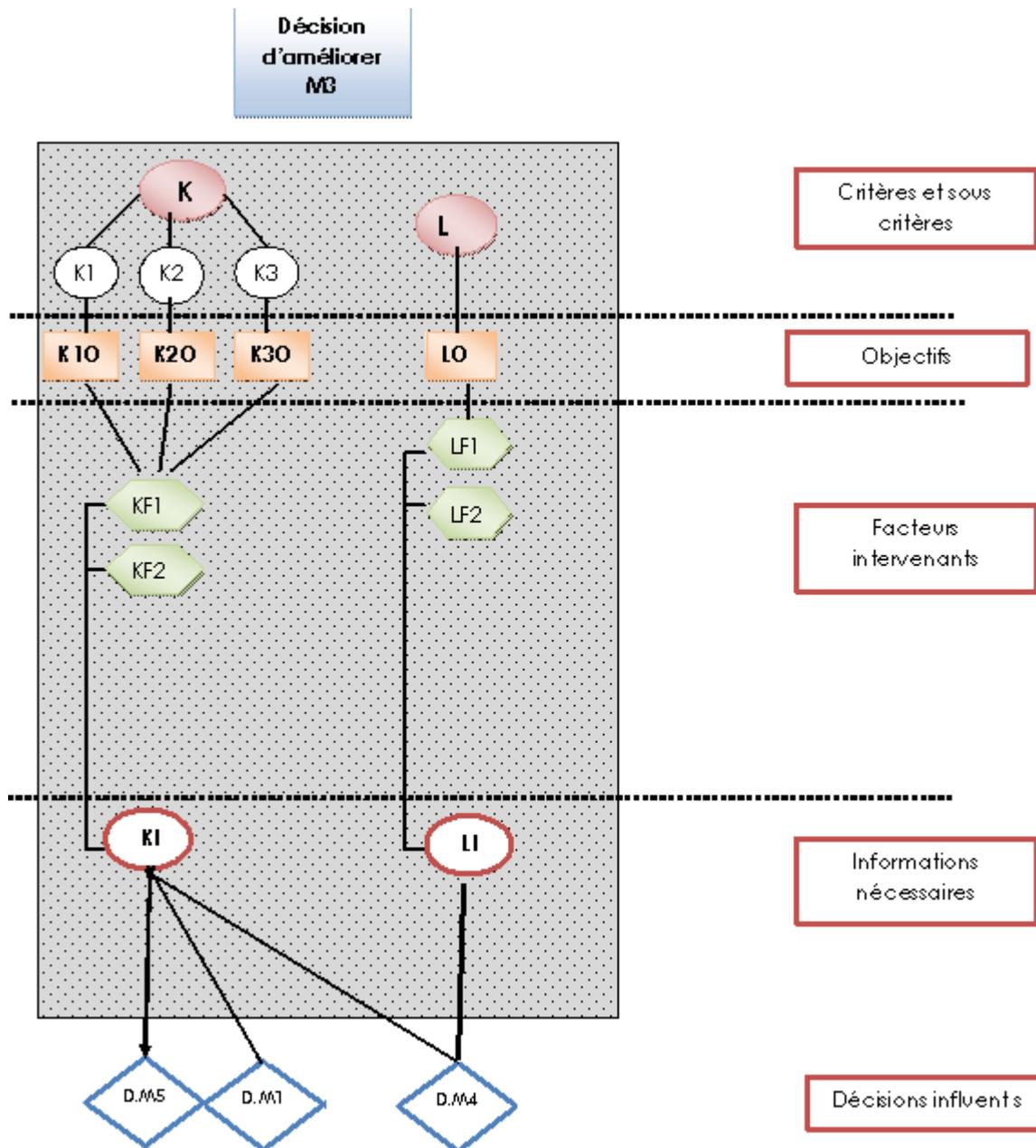


Figure. 96 Représentation graphique d'analyse d'impact de M3

- **L'amélioration de Méthode**

Les critères influencés :

K : les avantages concurrentiels (qualité de produit et de service, coût de produit, ...),

L : Coût d'amélioration des Méthodes,

Les modalités d'impact

***K : les avantages concurrentiels (qualité de produit et de service, coût de produit, ...)***

Les paramètres affectant les avantages concurrentiels sont la qualité du produit (K1), le prix (K2), et la flexibilité des ouvriers (K3). Ceci veut dire que la décision d'améliorer la main d'œuvre (DM4), le milieu (DM1) et la matière (DM5) affectent ce critère de la décision qui concerne l'amélioration des méthodes.

***L : Coût d'amélioration de Méthode :***

Le Coût de programme d'amélioration de méthode dépend de la qualité des méthodes (Six Sigma par exemple), des logiciels (IF4)) et des compétences de mains d'œuvre. Ceci prouve que la décision d'améliorer les mains d'œuvre (DM4) influe sur ce critère.

- **Les critères d'amélioration de main d'œuvre (M4).**

Les abréviations utilisées dans la Figure 97, sont les suivantes :

***M : Formation et sensibilisation à prendre les protecteurs comme les bouchons pour les orteils.***

**MO : Minimiser les risques pour les ouvriers.**

MF1 : Les formations.

MF2 : Les moyens de les sensibiliser (les affiches).

MF3 : L'humidité.

**MI 1: Les méthodes appliquées.**

***N : Rendement de l'ouvrier.***

**NO : Améliorer le rendement de l'ouvrier.**

NF1 : Les motivations et les primes de rendements.

NF2 : Les aides visuels.

NF3 : Les conditions de travail.

**NI 1: Les méthodes appliquées.**

***O : Continuité de l'ouvrier.***

**OO : Minimiser les taux d'absence pour les ouvriers.**

OF1 : Sensibilisation.

OF2 : Motivation.

**OI 1: les ouvriers.**

***P : Coût d'amélioration de main d'œuvre.***

**PO : Minimiser le coût d'amélioration de main d'œuvre.**

PF1 : Les moyens d'amélioration.

PF2 : Le temps pour l'amélioration.

PI1 : Les méthodes appliquées.

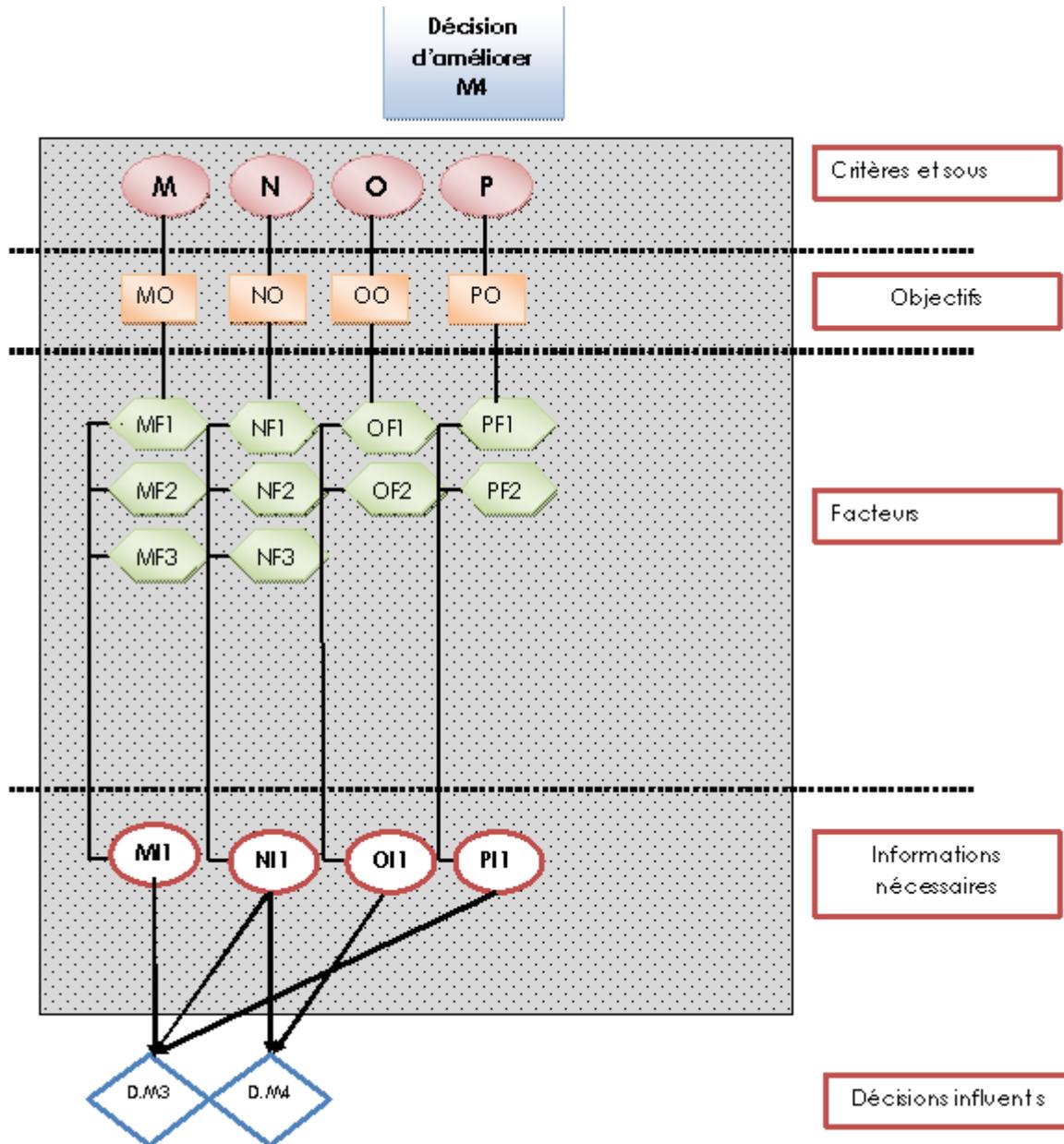


Figure. 97 Représentation graphique d'analyse d'impact de M4

- L'amélioration de la main d'œuvre

Les critères influencés :

M : Formation et sensibilisation à prendre les protecteurs comme les bouchons pour les orteils,

N: Rendement de l'ouvrier,

O : Continuité de l'ouvrier,

P : Coût d'amélioration de main d'œuvre.

Les modalités d'impact

**M : Formation et sensibilisation à prendre les protecteurs comme les bouchons pour les orteils :**

L'entreprise souhaite minimiser les risques pour les ouvriers (MO) pour cela elle a besoin de s'intéresser à faire des formations afin de sensibiliser les ouvriers. Ainsi, la situation de réviser les méthodes de travail et la formation des ouvriers sur les machines sont importantes. Donc les décisions d'améliorer les méthodes (DM3) influent sur ce critère.

**N: Rendement de l'ouvrier :**

L'entreprise souhaite améliorer le rendement de l'ouvrier (NO) et ceci par Les motivations et les primes de rendements (NF1), les aides visuels(NF2) et les conditions de travail (NF3).

Ceci nécessite de réviser les méthodes appliquées qui dépendent de la décision d'améliorer la main d'œuvre (DM4), et les méthodes (DM3).

**O : Continuité de l'ouvrier :**

L'entreprise souhaite minimiser les taux d'absence pour les ouvriers (OO) et ceci par la sensibilisation (OF1) et la motivation (OF2).

Ceci nécessite une bonne continuation avec l'ouvrier qui dépend de la décision d'améliorer la main d'œuvre (DM4).

**P : Coût d'amélioration de main d'œuvre :**

Le Coût de programme d'amélioration de la main d'œuvre dépend des moyens d'amélioration (PF1) et du temps pour l'amélioration (PF2). Ceci prouve que la décision d'améliorer les méthodes (DM3) influe sur ce critère.

- **Les critères d'amélioration de matière (M5).**

Les abréviations utilisées dans la Figure 98, sont les suivantes :

**Q : Intensité d'un courant.**

**QO: Maximiser l'accès à cet avantage.**

QF1 : La quantité d'électricité.

**QI1: Matériel.**

**R : La tension.**

**RO: Maximiser l'accès à cet avantage.**

RF1 : la circulation d'électricité.

**RI 1: Méthode.**

**S : Résistance.**

**SO: Maximiser l'accès à cet avantage.**

SF1 : Longueur.

SF2 : Diamètre.

SF3 : La nature du matériau.

**SI 1: Matière.**

**T : Coût de d'amélioration de Matière.**

**TO : Minimiser le coût d'amélioration de Matière.**

TF1 : Les moyens d'amélioration.

TF2 : Le temps pour l'amélioration.

**TI1 : Les méthodes appliquées.**

**U : La couleur des câbles.**

UF1 : couleur rouge.

UF2 : Couleur bleue.

UF3 : Noire.

UF4 : Verte.

**UI1 : Matière.**

**V : L'isolation des câbles.**

**VO: Maximiser l'accès à cet avantage.**

VF1 : les câbles.

VF2 : matière plastique.

**VI1 : Matière.**

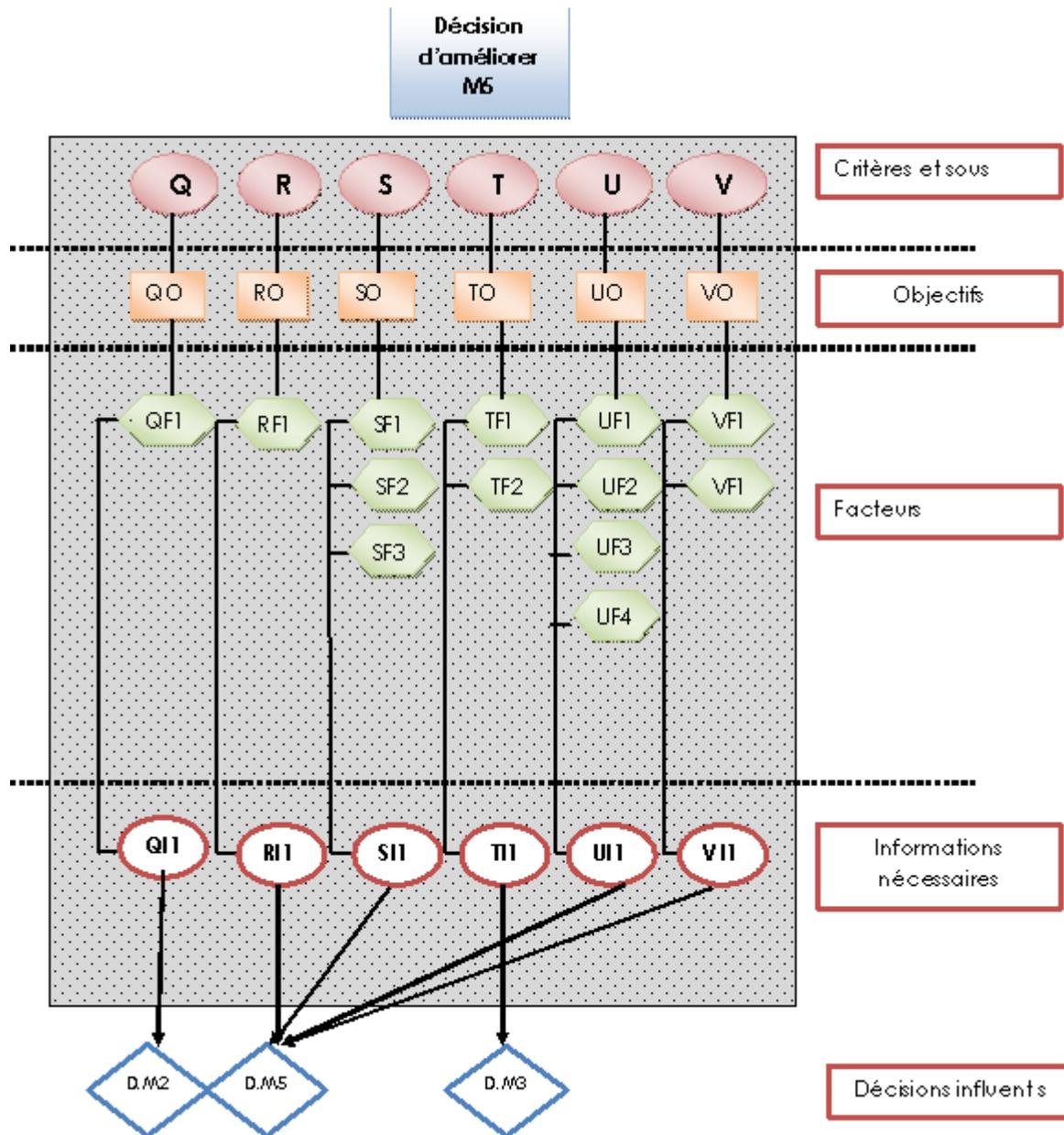


Figure. 98 Représentation graphique d'analyse d'impact de M5

- **Amélioration de matière**

Les critères influencés

Q : Intensité du courant.

R : La tension.

S : Résistance.

T : Coût de d'amélioration de Matière.

U : La couleur des câbles.

V : L'isolation des câbles.

***Q : Intensité d'un courant :***

L'entreprise souhaite maximiser l'accès à cet avantage. Ceci passe la quantité d'électricité (QO), et par conséquent des décisions d'améliorer les matériaux (DM2) sont à prendre.

***R : La tension :***

L'entreprise souhaite maximiser la circulation d'électricité. Et ceci revient à assurer un bon achat des matières premières des fils électriques. Par conséquent les décisions d'améliorer les matériaux (DM2) et les matières (DM5) influent sur ce critère de décision.

***S : Résistance :***

L'entreprise souhaite assurer un bon achat des matières premières des fils électriques sous forme des bobines. Par conséquent les décisions d'améliorer les matières (DM5) et les mains d'œuvre (DM4) influent sur ce critère de décision.

***T : Coût de d'amélioration de Matière :***

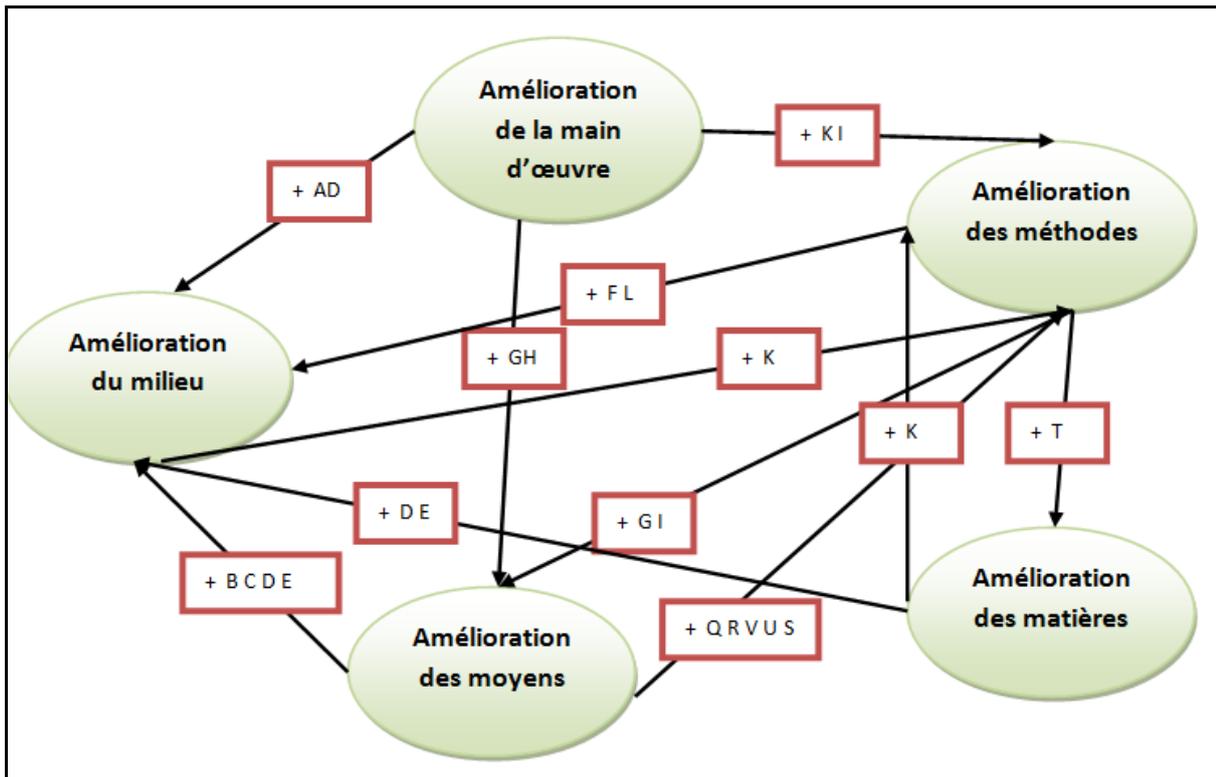
Le Coût d'amélioration de matériel dépend de la qualité des moyens (les machines (IF2), moyens financiers), donc la décision est d'améliorer les méthodes (DM3) influe ce critère.

***U: La couleur des câbles :***

L'entreprise souhaite identifier les couleurs des câbles, tel que ne couleur rouge (UF1), la couleur bleu (UF2), la couleur noire (UF3) et la couleur vert (UF4) la décision d'améliorer les matières (DM5) ont un impact sur ce critère.

***V : L'isolation des câbles :***

L'entreprise souhaite Maximiser l'accès à cet avantage. Par conséquent les décisions d'améliorer les matières (DM5) et les mains d'œuvre (DM4) influent sur ce critère de décision.



**Figure. 99 Les impacts inter décisionnelles**

La figure 99 résume les impacts entre les décisions. Dans cette figure les arcs montrent les impacts d'une décision sur l'autre. Par exemple la décision « d'améliorer le milieu de travail » influe les critères B, C, D et E de la décision d'améliorer les moyens de travail.

Comme on peut le voir sur la figure 99, ces cinq décisions dépendent de l'une de l'autre. D'où ces relations montrent qu'une approche qui traite ces décisions d'une manière intégrée.

### ***3.5.5 Démarche d'aide à la décision***

Dans cette section, la démarche d'aide à la décision pour l'intégration des décisions d'amélioration est présentée dans la figure 100 qui montre les deux étapes principales de cette démarche.

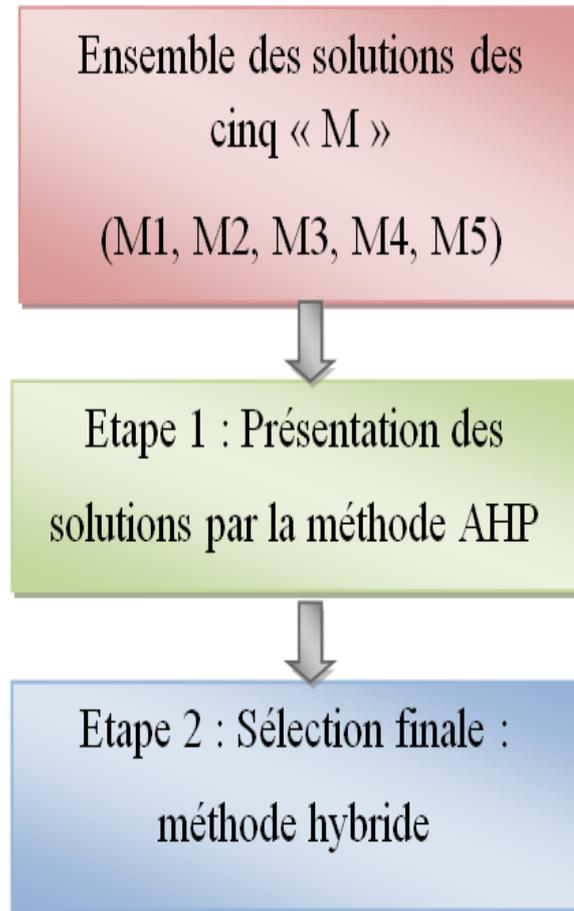


Figure. 100 Démarche d'aide à la décision

### **-Etape 1 : Présélection des solutions**

La première étape a pour but de préciser les solutions d'amélioration pour les cinq M. Cette étape de présélection diminue le nombre des solutions potentielles à examiner dans la troisième étape de la démarche. Ceci permettra aussi que le modèle mathématique de la troisième étape puisse trouver la solution optimale dans un délai raisonnable. Dans cette étape nous allons appliquer la méthode AHP afin de sélectionner les meilleures solutions de chaque M.

#### **Amélioration de Milieu (M1) :**

Les solutions :

- un système de santé efficace grâce à un milieu de travail sain (SM11),
- améliorer les voies de circulations (SM12),
- création d'un milieu de travail sain par la mise en œuvre d'un programme de sécurité (SM13),

- projet de création d'un plan d'action préventif sur la santé en milieu de travail par l'analyse intégrée de données (SM14),
- création d'un protocole d'évaluation des risques professionnels au poste de travail afin de minimiser le bruit (SM15),
- résoudre le problème de l'humidité car elle a un effet négatif pour les fils électrique et pour les personelles. (SM16),
- améliorer la luminosité de milieu travail. (SM17),

Pour l'amélioration de milieu, nous avons proposé trois critères. qui sont :

- *Qualité de milieu de travail.*
- *Coût de d'amélioration de Milieu.*
- *Durée (jours.)*

**Application de la méthode AHP (Logiciel : Expert Choice):**

**Étape 1 :** Décomposition du problème en une hiérarchie d'éléments inter reliés. La structure hiérarchique du problème est la suivantes.

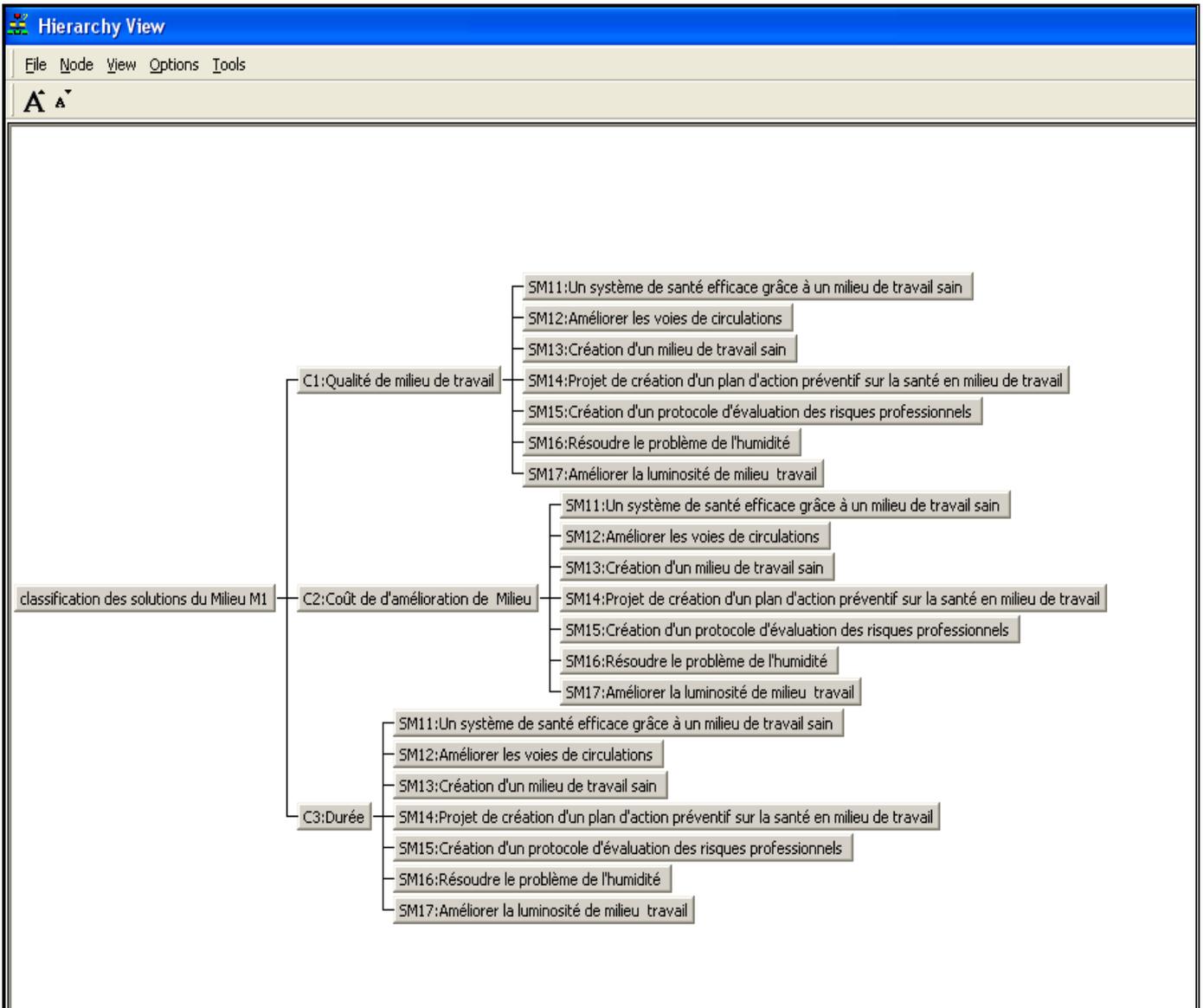


Figure. 101 Structure hiérarchique du problème

-Étape 2 : Comparaisons par paires des éléments de chaque niveau hiérarchique par rapport à un élément du niveau hiérarchique supérieur.

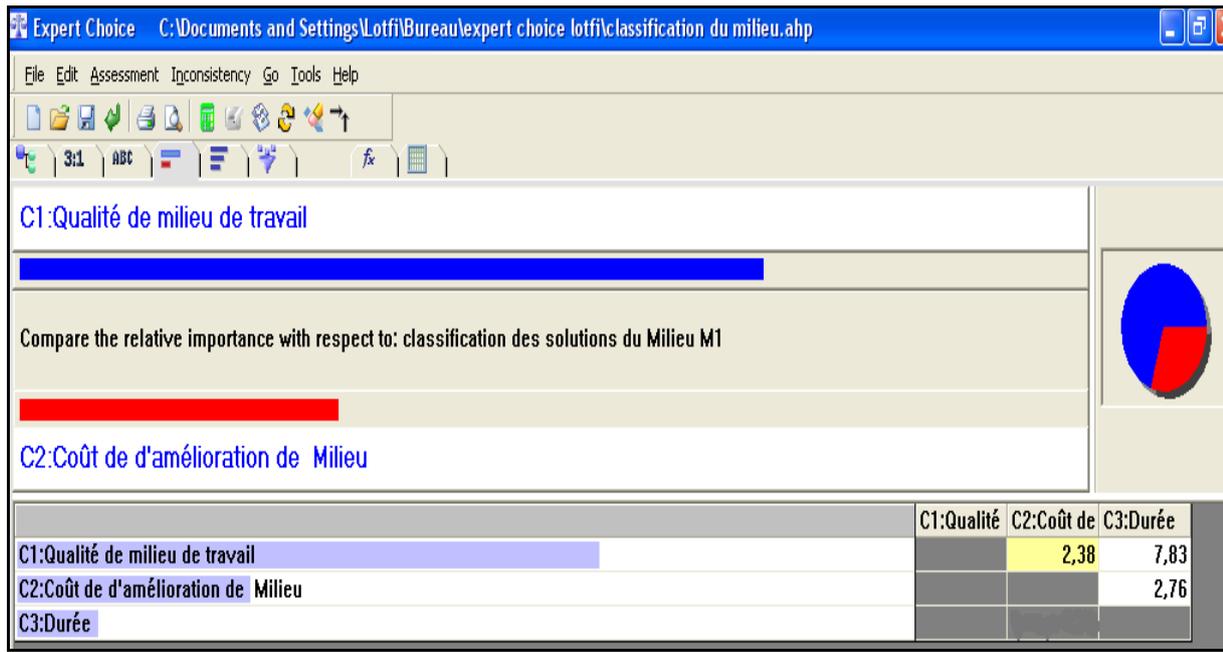


Figure. 102 Comparaison par paires des critères

La matrice de comparaison par paires des critères a pour objectif d'identifier le classement prioritaire du décideur des critères d'évaluations, selon une comparaison deux à deux de ces critères. Pour le décideur, le critère le plus important par rapport aux autres critères est C1 : Qualité de milieu de travail, par après le critère C2 : Coût d'amélioration de milieu, et enfin C3 : Durée.

**-Étape 3 :** Détermination de l'importance relative des éléments en calculant les vecteurs propres correspondants aux valeurs propres maximales des matrices de comparaisons.

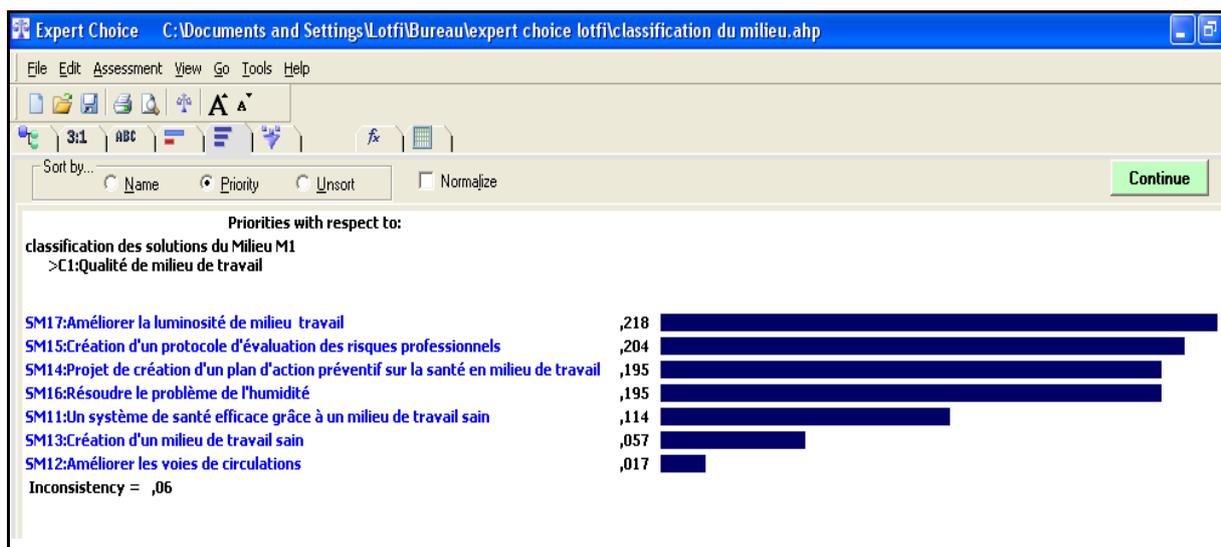


Figure. 103 Vecteur propre correspondant au critère « Qualité du milieu de travail ».

Le calcul du vecteur propre correspondant au critère C1 : Qualité du milieu de travail, a permis de faire un classement des sept solutions selon l'ordre de priorité. Ainsi, la solution SM17 : *Améliorer la luminosité du milieu de travail* est classée la plus adéquate selon le critère C1, et la solution SM12 : *Améliorer les voies de circulations* est considérée selon ce critère comme une solution non appropriée.

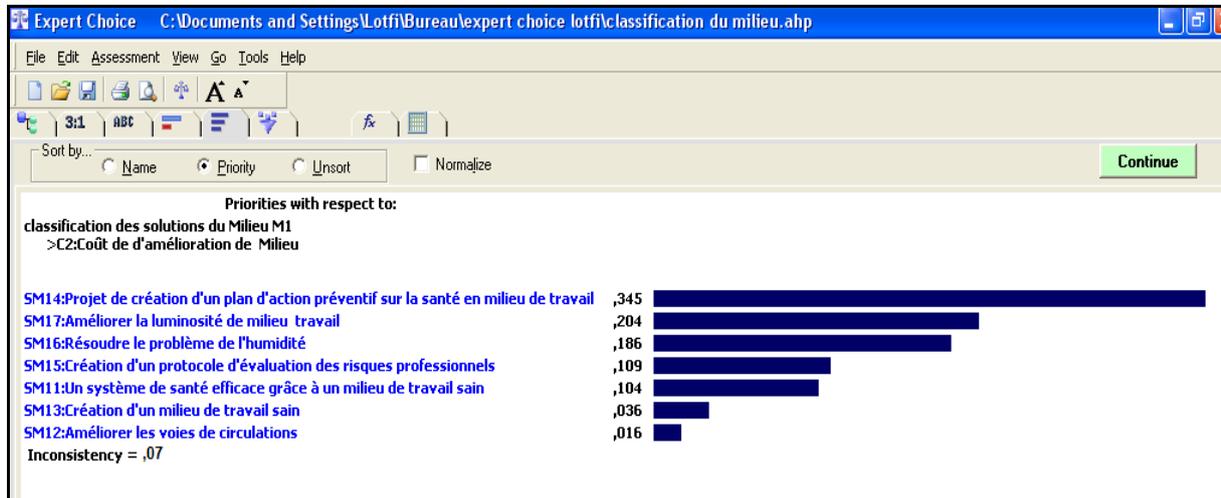


Figure. 104 Vecteur propre correspondant au critère « Coût d'amélioration du milieu».

Pour le deuxième critère : *Coût d'amélioration du milieu*, la solution qui a le poids d'évaluation du vecteur propre le plus élevé est SM14 : *Projet de création d'un plan d'action préventif sur la santé en milieu de travail*. Et la solution SM12 est classée comme une solution non appropriée pour ce critère aussi.

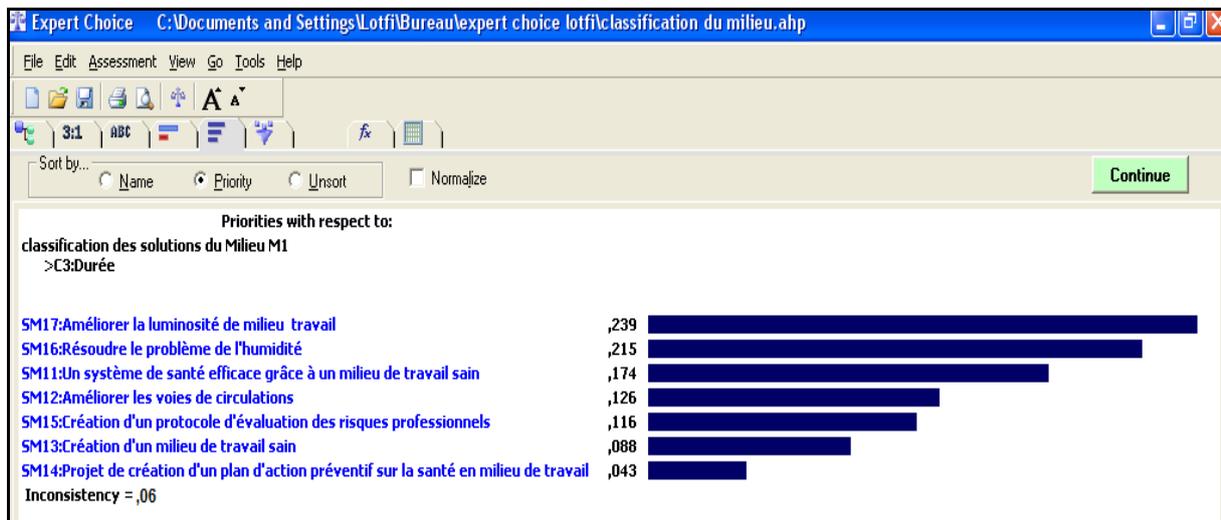


Figure. 105 Vecteur propre correspondant au critère « Durée».

Pour le critère C3 : *Durée*, le classement des solutions selon les préférences d décideur est réalisé aussi le poids d'évaluation de chaque solution. Ainsi, la solution SM17 : *Améliorer la*

luminosité de milieu de travail est considérée comme la plus exacte, et la solution SM14 *Projet de création d'un plan d'action préventif sur la santé en milieu de travail* est non appropriée.

• **Étape 4** : Vérification de la cohérence des jugements. Tous les jugements sont cohérents.

Selon SAATY La cohérence globale d'appréciation est évaluée au moyen de ce ratio de cohérence RC. La valeur de ce dernier doit être au plus égale à **10%**.

Dans le cas ou cette valeur dépasse 10%, les appréciations peuvent exiger certaines révisions, et la cohérence est dit non acceptée.

- C1 : cohérence acceptée ( $0.06 < 10\%$ ),
- C2 : cohérence acceptée ( $0.07 < 10\%$ ),
- C3 : cohérence acceptée ( $0.06 < 10\%$ ).

• **Étape 5** : Calcul de la performance relative de chacune des actions.

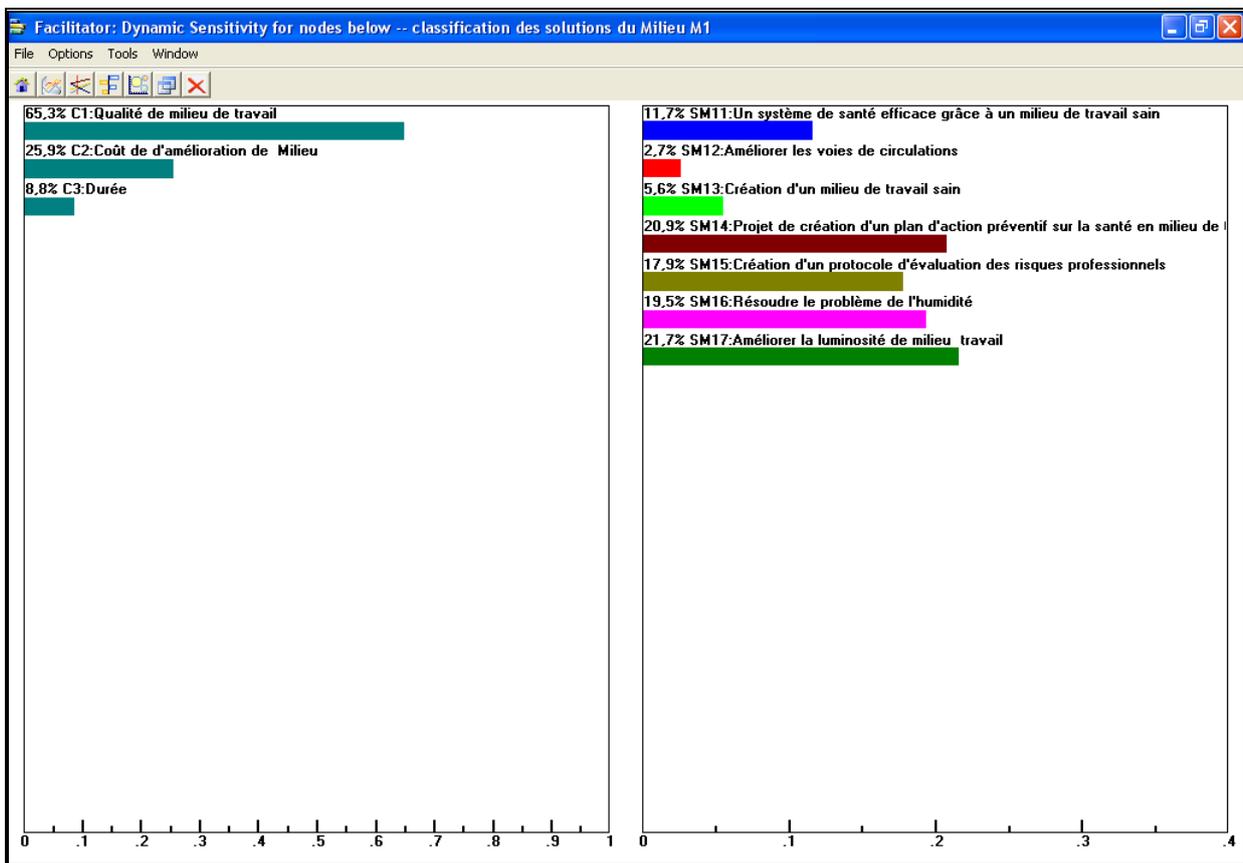
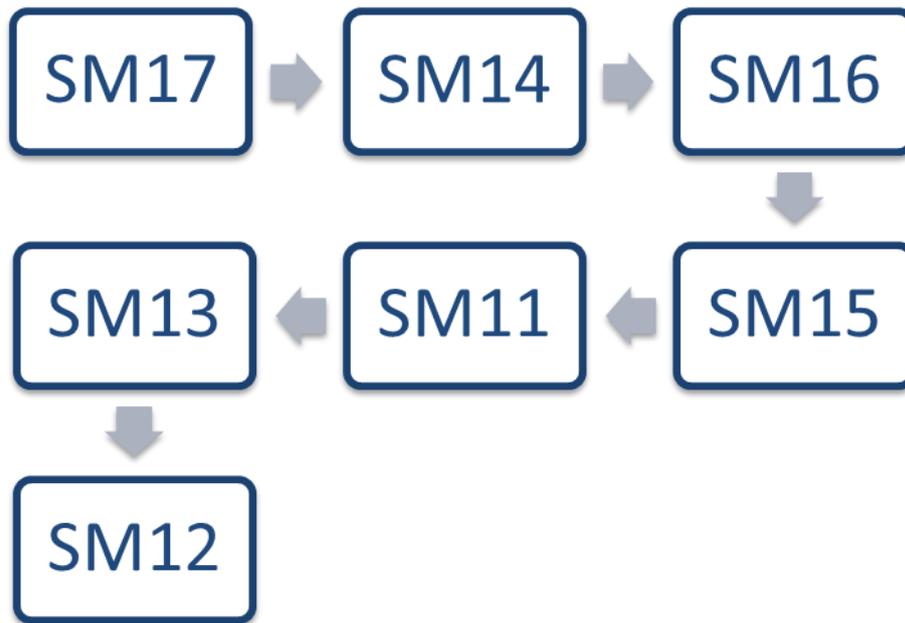


Figure. 106 Performance des actions

Le classement final des sept solutions selon la méthode AHP par ordre de priorité pour améliorer M1 est schématisé comme suit :



**Figure. 107 Classement final des solutions de M1**

**Amélioration de Matériel (M2)**

Les solutions :

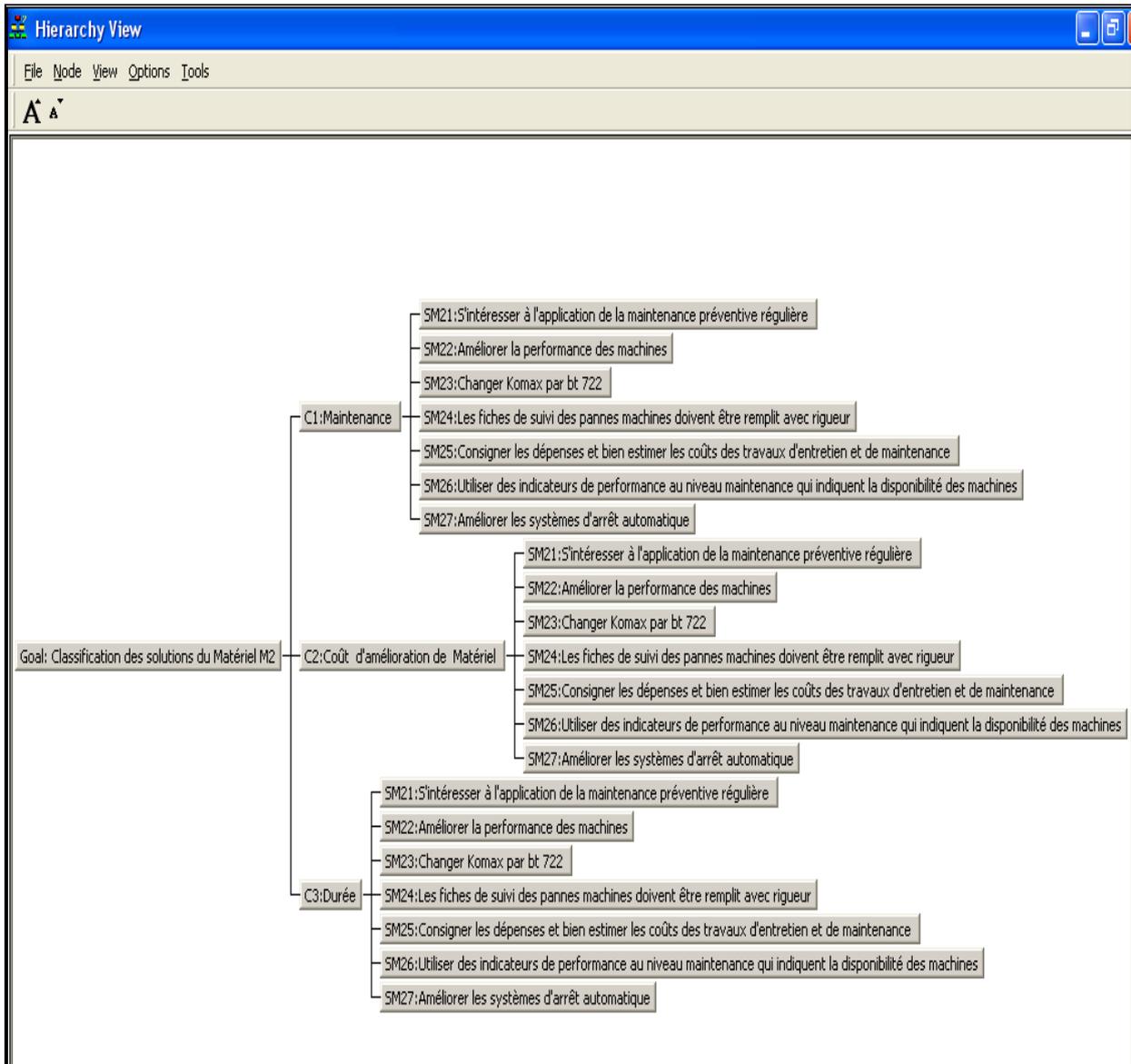
- s'intéresser à l'application de la maintenance préventive régulière (SM21),
- améliorer la performance des machines, réduire les temps d'arrêt machine et par la suite garantir la qualité et les délais (SM22),
- changer Komax par bt 722 qui une presse de sertissage de table qui se caractérise par une durée de cycle rapide, des temps de conversion et de réglage courts ainsi qu'une surface utilisateur TopTouch conviviale. Livrable en option avec le dispositif programmable de dénudage et le dispositif de coupe de pièces défectueuses, cette presse garantit une confection de câbles de très haute qualité, sans intervention de l'opérateur (SM23),
- les fiches de suivi des pannes machines doivent être remplit avec rigueur (SM24),
- consigner les dépenses et bien estimer les coûts des travaux d'entretien et de maintenance afin de tenter de les réduire, car il s'agit d'une charge indirecte relative à un service non productif au sein de l'entreprise (SM25),
- utiliser des indicateurs de performance au niveau maintenance qui indiquent la disponibilité des machines, et qui donnent une idée sur leurs états de fonctionnement, ainsi que sur la consommation des pièces de rechanges (SM26),
- améliorer les systèmes d'arrêt automatique (affichage du type d'arrêt ainsi que des causes), (SM27) .

Pour l'amélioration Matériel, nous avons proposé trois critères. Ce sont :

- *Maintenance*
- *Coût d'amélioration de Matériel*
- *Durée (jours)*

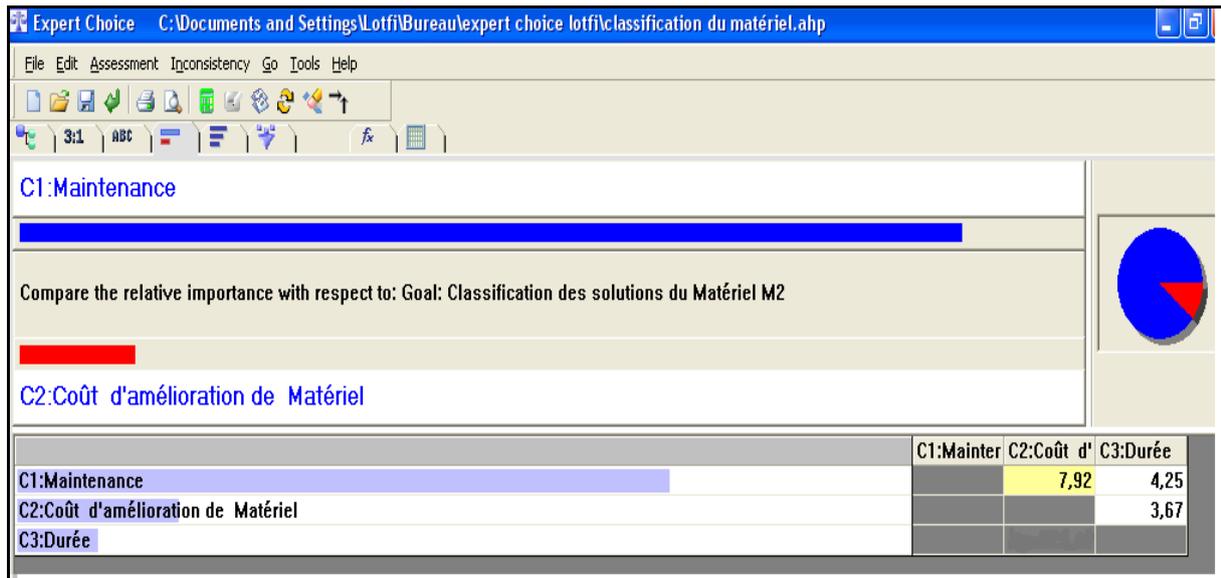
**Application de AHP (Logiciel : Expert Choice):**

-**Étape 1** : Décomposition du problème en une hiérarchie d'éléments inter reliés. La structure hiérarchique du problème est la suivante.



**Figure. 108 Structure hiérarchique du problème**

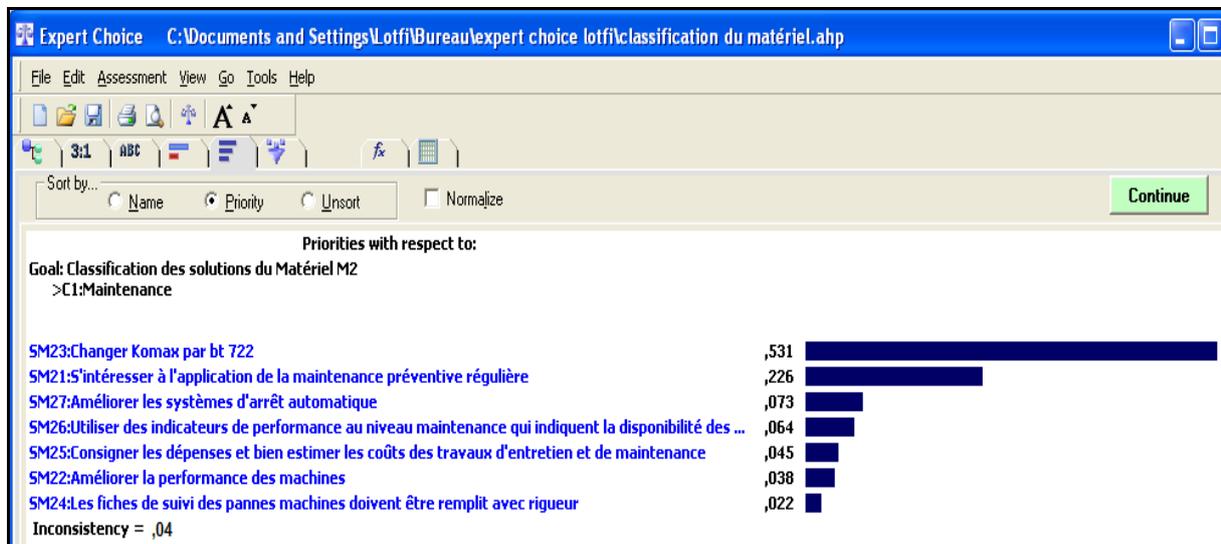
- **Étape 2** : Comparaisons par paires des éléments de chaque niveau hiérarchique par rapport à un élément du niveau hiérarchique supérieur.



**Figure. 109 Comparaison par paires des critères**

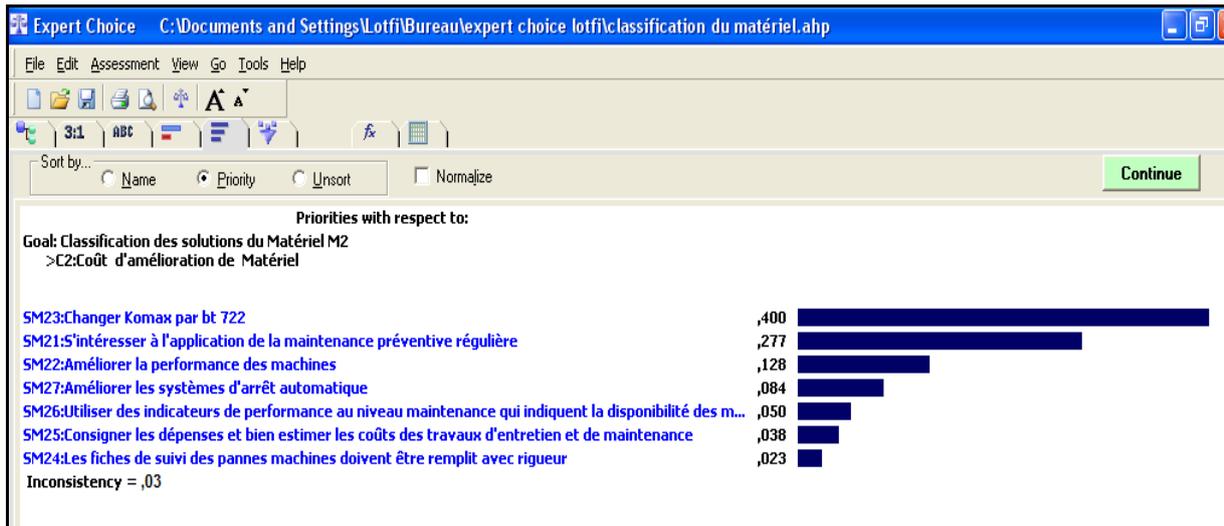
A partir de la matrice de comparaison par paires des critères, le décideur surclasse le critère C1 *Maintenance* comme un critère prioritaire, puis le critère C2 *Coût d'amélioration de matériel* et enfin le critère C3 *Durée* est considéré comme surabondant pour l'amélioration de M2.

- **Étape 3** : Détermination de l'importance relative des éléments en calculant les vecteurs propres correspondants aux valeurs propres maximales des matrices de comparaisons.



**Figure. 110 Vecteur propre correspondant au critère «Maintenance».**

Selon le vecteur correspondant au critère C1 *Maintenance*, la solution la plus adéquate est SM23 *Changer Komax par bt 722*, avec un poids d'évaluation de (0,531), tandis que les solutions SM22 *Améliorer la performance des machines* et SM24 *Les fiches de suivi des pannes doivent être remplies avec rigueur*, sont considérées comme non appropriées avec des vecteurs poids respectifs (0.038) et (0.022).



**Figure. 111** Vecteur propre correspondant au critère «Coût d'amélioration du matériel ». Même pour ce critère C2 *Coût d'amélioration du matériel*, le décideur surclasse la solution SM23 *Changer Komax par bt 722*, comme une solution prioritaire d'amélioration de M2. Il considère que SM24 *Les fiches de suivi des pannes machines doivent être remplit avec rigueur* et SM25 *Consigner les dépenses et bien estimer les coûts des travaux d'entretien et de maintenance* comme des solutions à faible importance pour améliorer M2.



**Figure. 112** Vecteur propre correspondant au critère «Durée ».

Pour le critère C3 *Durée*, le poids du vecteur propre le plus élevé est de (0.371) correspondant à la solution SM23 *Changer Komax par bt 722*. Et comme les autres critères, le décideur considère que la solution SM24 *Les fiches de suivi des pannes machines doivent être remplit avec rigueur*, est inadéquate pour l'amélioration de M2.

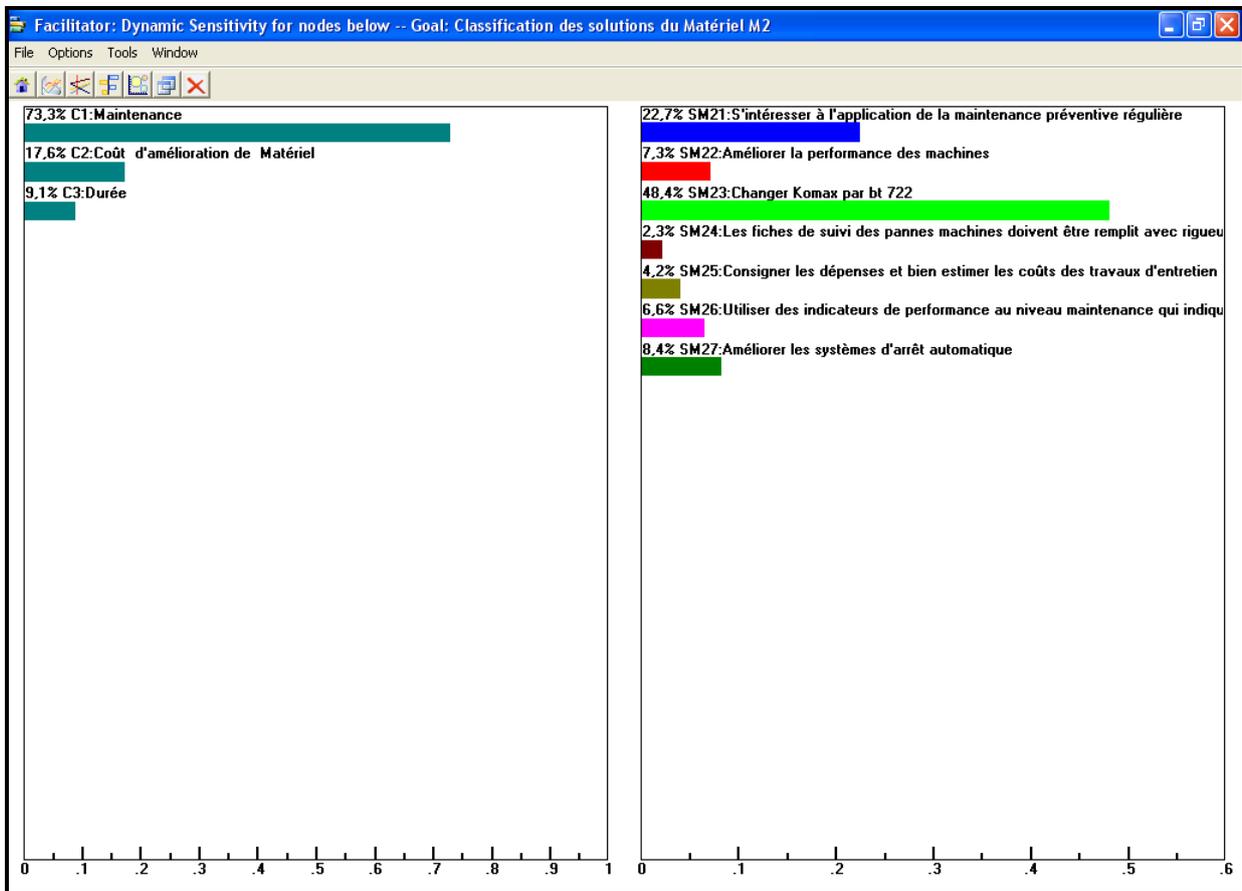
- **Étape 4** : Vérification de la cohérence des jugements. Tous les jugements sont cohérents.

Selon SAATY La cohérence globale d'appréciation est évaluée au moyen de ce ratio de cohérence RC. La valeur de ce dernier doit être au plus égale à **10%**.

Dans le cas ou cette valeur dépasse 10%, les appréciations peuvent exiger certaines révisions, et la cohérence est dit non acceptée.

- C1 : cohérence acceptée ( $0.04 < 10\%$ ),
- C2 : cohérence acceptée ( $0.03 < 10\%$ ),
- C3 : cohérence acceptée ( $0.05 < 10\%$ ).

- **Étape 5** : Calcul de la performance relative de chacune des actions.



**Figure. 113 Performance des actions**

Le classement final des sept solutions selon la méthode AHP par ordre de priorité pour améliorer M2 est schématisé comme suit :

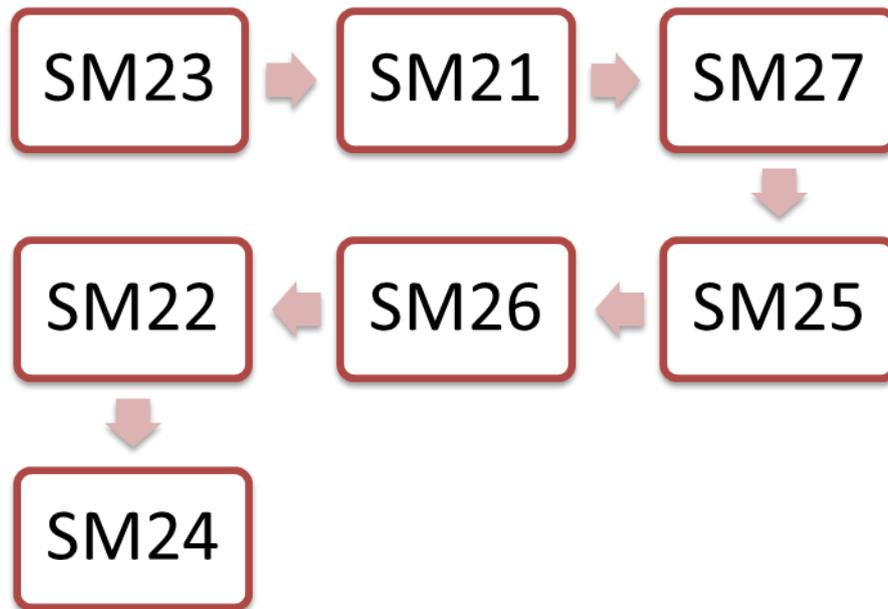


Figure. 114 Classement finale des solutions de M2

### Amélioration de Méthode (M3)

Les solutions :

- améliorer l'implantation des 5S (application du PDCA) (SM31),
- introduire la méthode Six Sigma dans les bureaux (SM32),
- améliorer davantage les standards de layout et d'entreposage (SM33),
- développer des outils adéquats de maîtrise et gestion du temps (SM34),
- consolider les indicateurs de performances clients (SM35),
- appliquer la MSP qui permet de détecter le dérèglement du processus avant l'apparition de la non-conformité et par la suite donner la possibilité d'agir pour régler le processus au bon moment (SM36),
- appliquer la méthode AMDEC afin d'agir directement sur la cause, éviter la réapparition des défauts (SM37),

Pour l'amélioration des Méthodes de travail, nous avons proposé trois critères. Ce sont :

- *Les avantages concurrentiels (qualité de produit et de service, coût de produit, etc.)*
- *Coût d'amélioration de méthode*
- *Durée (jours)*

### Application de AHP (Logiciel : Expert Choice):

-**Étape 1** : Décomposition du problème en une hiérarchie d'éléments inter reliés. La structure hiérarchique du problème est la suivante.

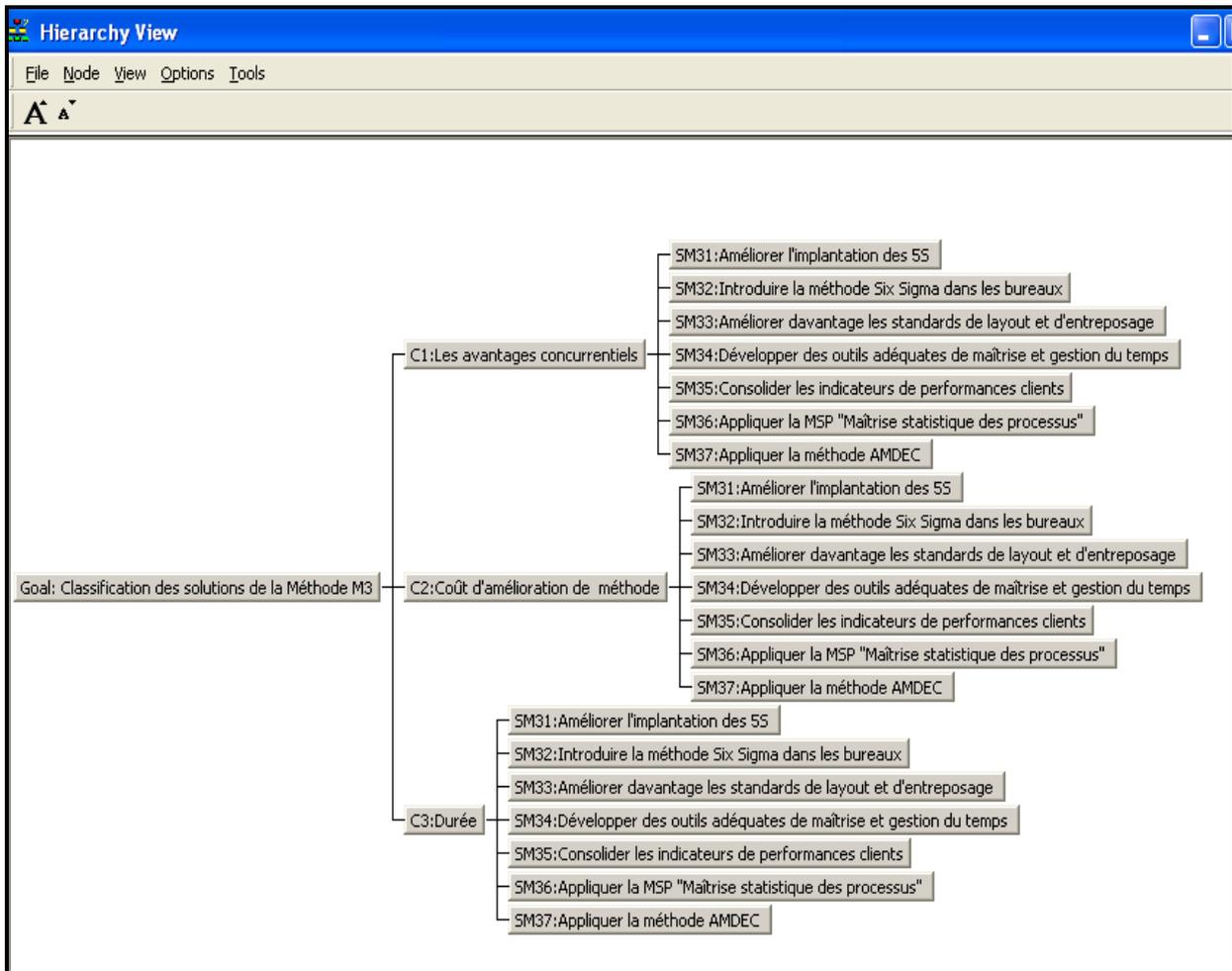


Figure. 115 Structure hiérarchique du problème

- **Étape 2** : Comparaisons par paires des éléments de chaque niveau hiérarchique par rapport à un élément du niveau hiérarchique supérieur.

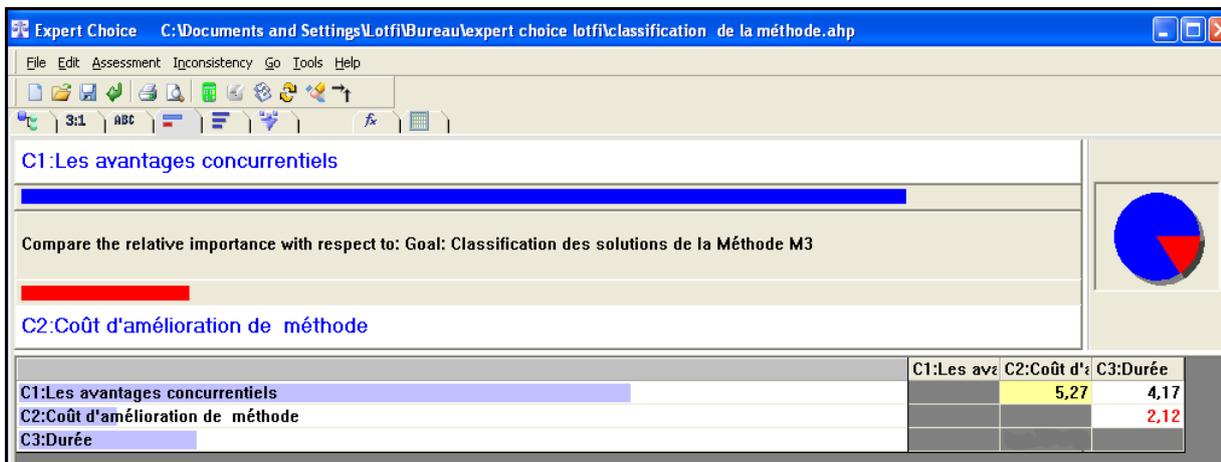


Figure. 116 Comparaison par paires des critères

A partir de la matrice des comparaisons par paires des critères, le décideur surclasse C1 *Les avantages concurrentiels*, par après le critère C3 *Durée*, et enfin, le critère C2 *Coût d'amélioration de méthode*.

-**Étape 3** : Détermination de l'importance relative des éléments en calculant les vecteurs propres correspondants aux valeurs propres maximales des matrices de comparaisons.

Les écrans ci-après décrivent trois façons différentes de représenter les vecteurs propres.

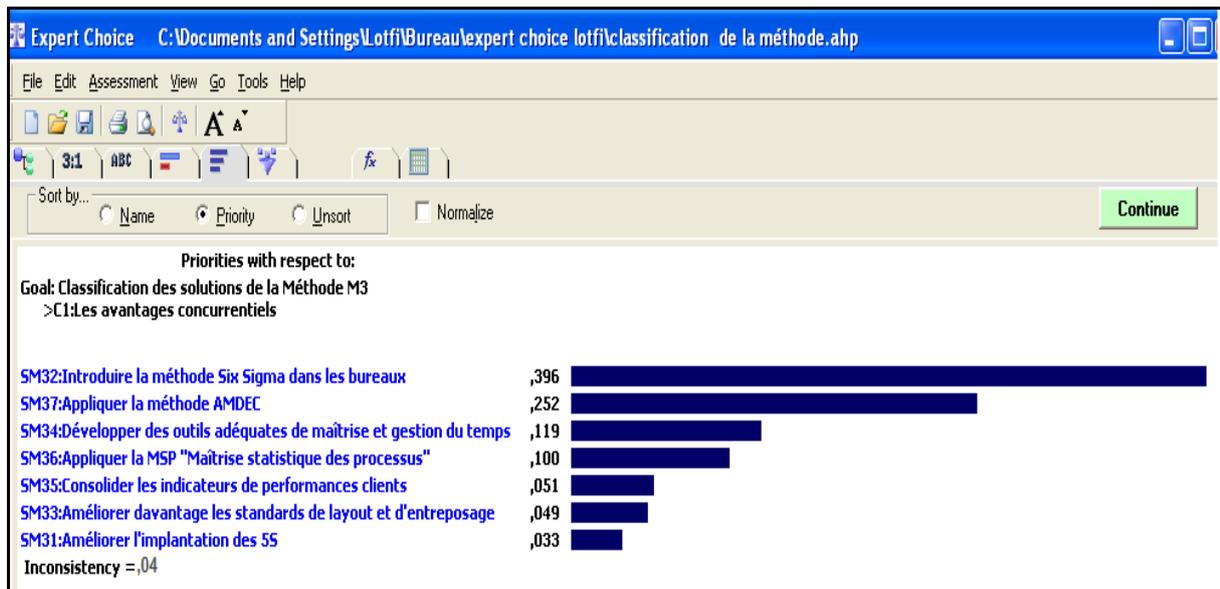


Figure. 117 Vecteur propre correspondant au critère «Les avantages concurrentiels».

Selon le critère C1 *Les avantages concurrentiels*, le décideur ne considère que la solution SM23 *Introduire la méthode Six Sigma dans les bureaux* comme la solution la plus efficace avec un vecteur poids de (0.396), et néglige l'importance de la solution SM31 *Améliorer l'implantation des 5S* avec un vecteur de (0.033) pour réviser de M3.

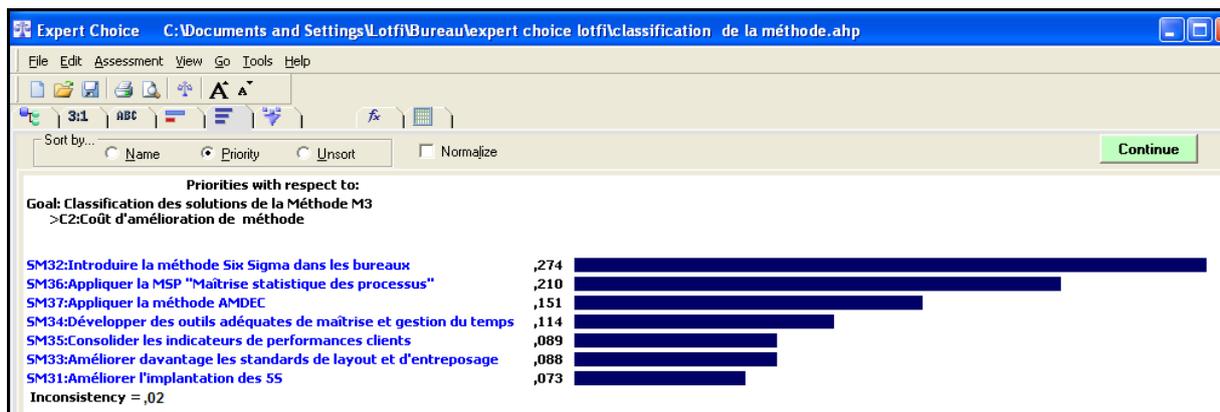
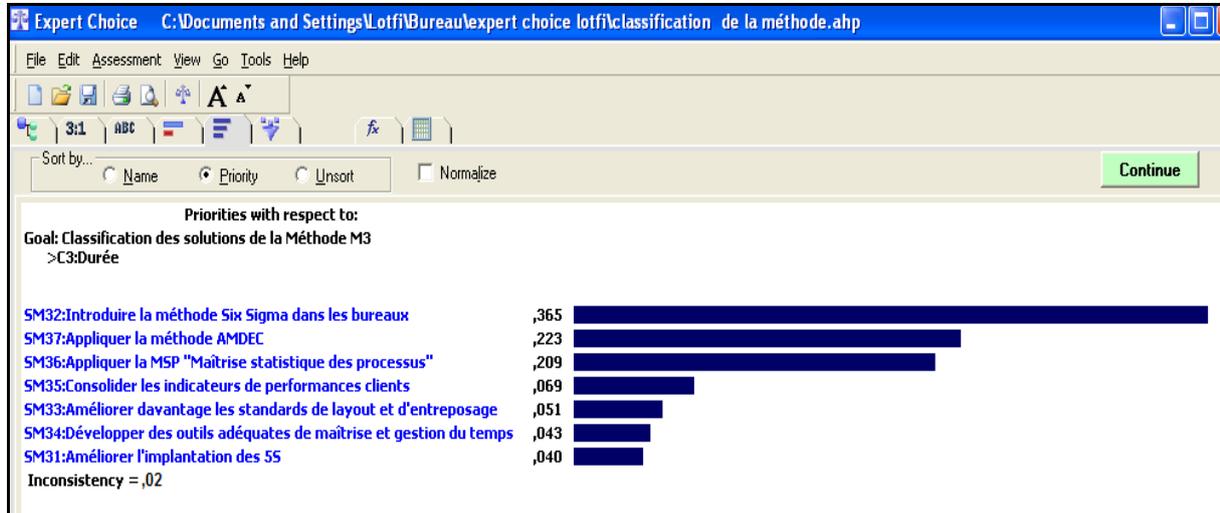


Figure. 118 Vecteur propre correspondant au critère «Coût d'amélioration de la méthode».

Comme pour le critère C1, aussi, pour ce critère C2 *Coût d'amélioration de la méthode*, la solution SM23 *Introduire la méthode Six Sigma dans les bureaux* est surclassée par rapport aux autres solutions. Et la solution SM31 *Améliorer l'implantation des 5S* est considéré comme non approprié pour améliorer M3.



**Figure. 119** Vecteur propre correspondant au critère «Durée».

Le décideur établi aussi le même ordre de hiérarchisation aussi pour ce troisième critère C3 *Durée*, il surclasse SM23 *Introduire la méthode Six Sigma dans les bureaux* par rapport aux autres solutions, et néglige SM31 *Améliorer l'implantation des 5S*.

• **Étape 4** : Vérification de la cohérence des jugements. Tous les jugements sont cohérents.

Selon SAATY La cohérence globale d'appréciation est évaluée au moyen de ce ratio de cohérence RC. La valeur de ce dernier doit être au plus égale à **10%**.

Dans le cas où cette valeur dépasse 10%, les appréciations peuvent exiger certaines révisions, et la cohérence est dit non acceptée.

- C1 : cohérence acceptée ( $0.04 < 10\%$ ),
- C2 : cohérence acceptée ( $0.02 < 10\%$ ),
- C3 : cohérence acceptée ( $0.02 < 10\%$ ).

• **Étape 5** : Calcul de la performance relative de chacune des actions.

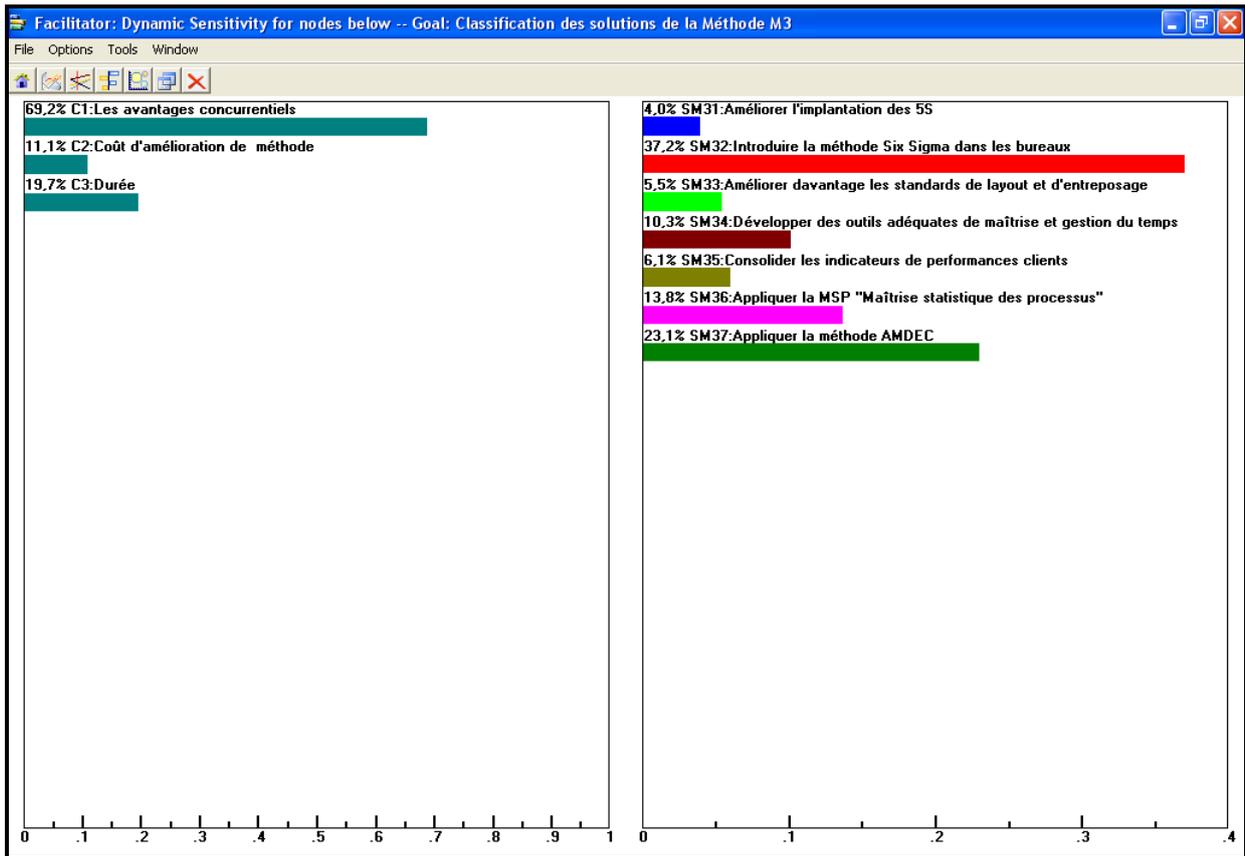


Figure. 120 Performance des actions

Le classement final des sept solutions selon la méthode AHP par ordre de priorité pour améliorer M3 est schématisé comme suit :

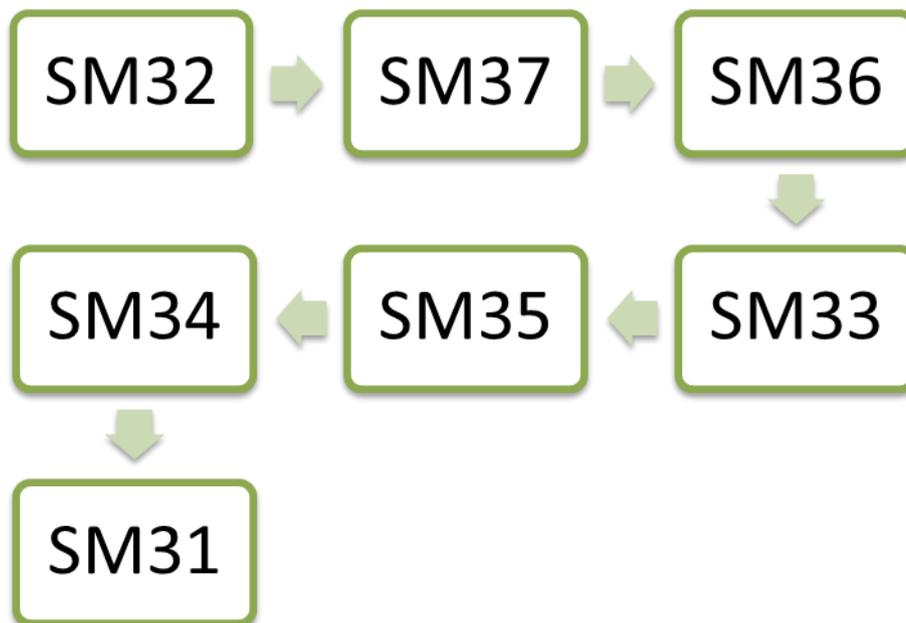


Figure. 121 Classement final des solutions de M3

### **Amélioration de Main d'œuvre (M4)**

Les solutions :

- sensibiliser les opérateurs de production ainsi que celles du contrôle qualité à la notion de TQM "Total Quality Management" en faisant des formations afin de garantir la qualité au niveau production et par la suite réduire les coûts de non-conformité (**SM41**),
- former les ouvriers sur les modes de sécurité et mettre à leur disponibilité les moyens nécessaires pour leur sécurité et en particulier pour le bruit (**SM42**),
- focaliser les formations sur le développement de l'esprit Six Sigma (**SM43**),
- formation continue sur les besoins de l'entreprise (**SM44**),
- être plus flexibles aux modifications clients : les causes de défaillances, les actions correctives adéquates (**SM45**),
- assurer efficacement la formation technique du personnel, pour qu'il maîtrise les tâches qu'il est en train d'accomplir et pour assurer une polyvalence des opérateurs (**SM46**),
- développer des indicateurs de santé et sécurité (**SM47**),

Pour l'amélioration des Mains d'œuvres, nous avons proposé trois critères. Ce sont :

- *Formation et sensibilisation de l'ouvrier.*
- *Coût d'amélioration de main d'œuvre*
- *Durée (jours)*

### **Application de AHP (Logiciel : Expert Choice):**

**Étape 1** : Décomposition du problème en une hiérarchie d'éléments interreliés. La structure hiérarchique du problème est la suivante.

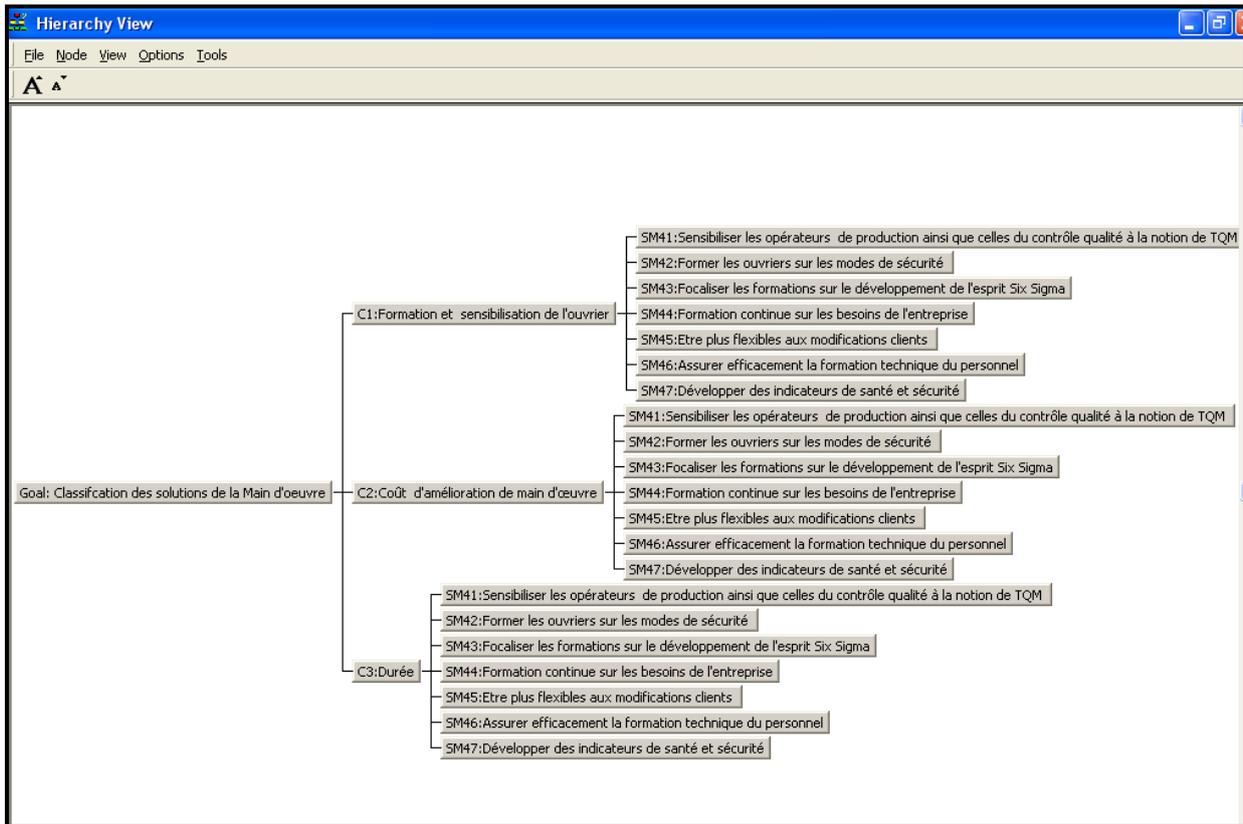


Figure. 122 Structure hiérarchique du problème

- **Étape 2** : Comparaisons par paires des éléments de chaque niveau hiérarchique par rapport à un élément du niveau hiérarchique supérieur.

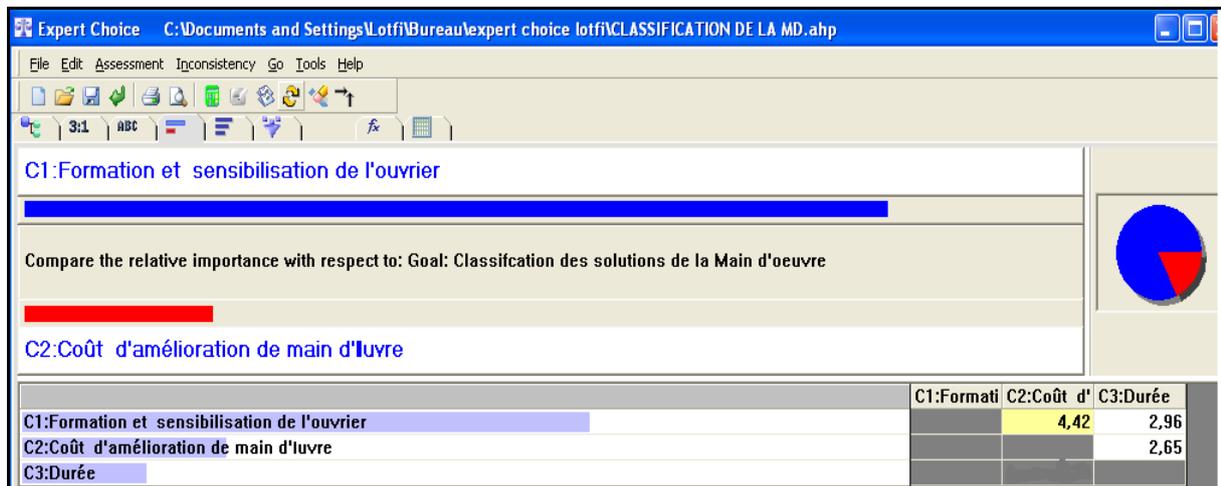
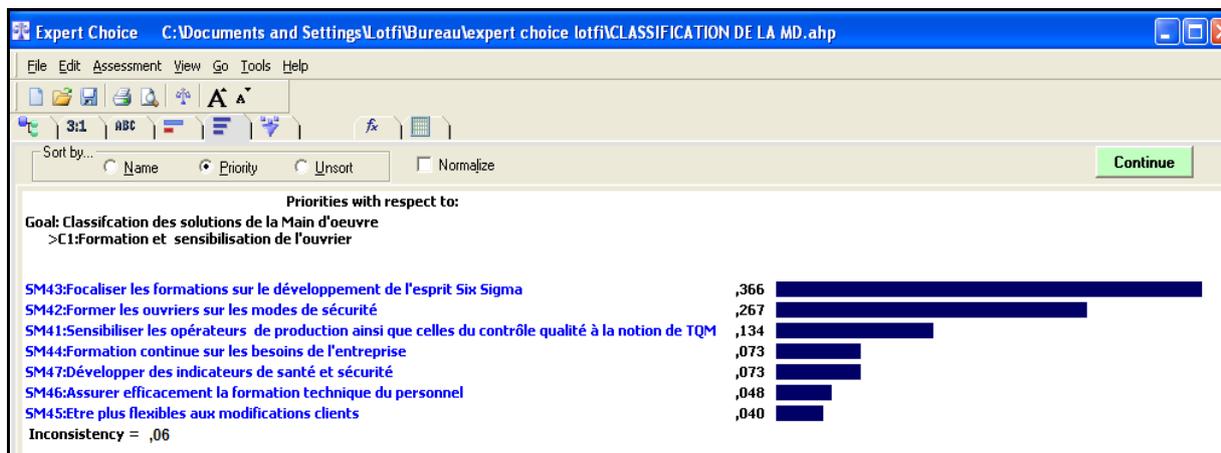


Figure. 123 Comparaison par paires des critères

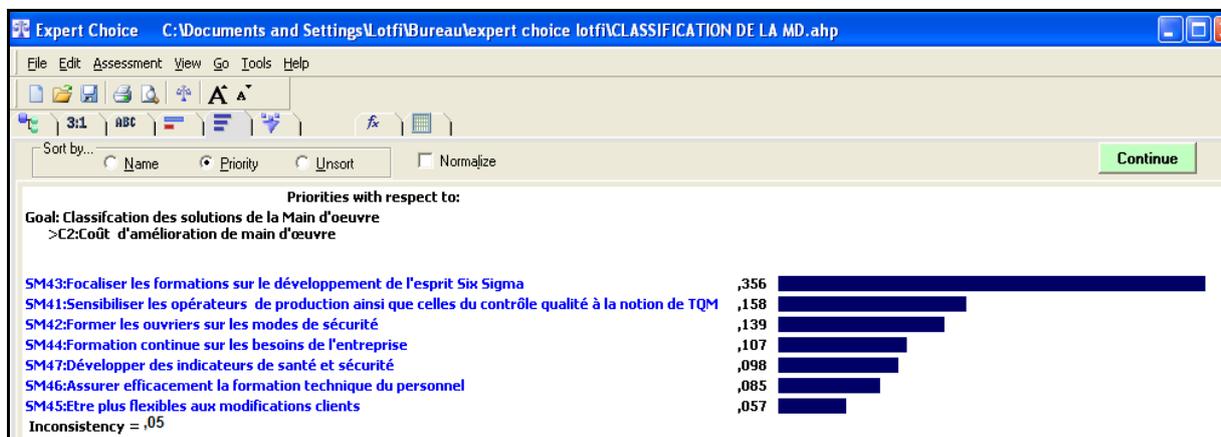
A partir de la matrice de comparaison par paires des critères, le décideur sur classe le critère C1 *Formation et sensibilisation de l'ouvrier*, par après le critère C2 *Coût d'amélioration de la main d'oeuvre* et enfin, le critère C3 *Durée*.

- **Étape 3** : Détermination de l'importance relative des éléments en calculant les vecteurs propres correspondants aux valeurs propres maximales des matrices de comparaisons.



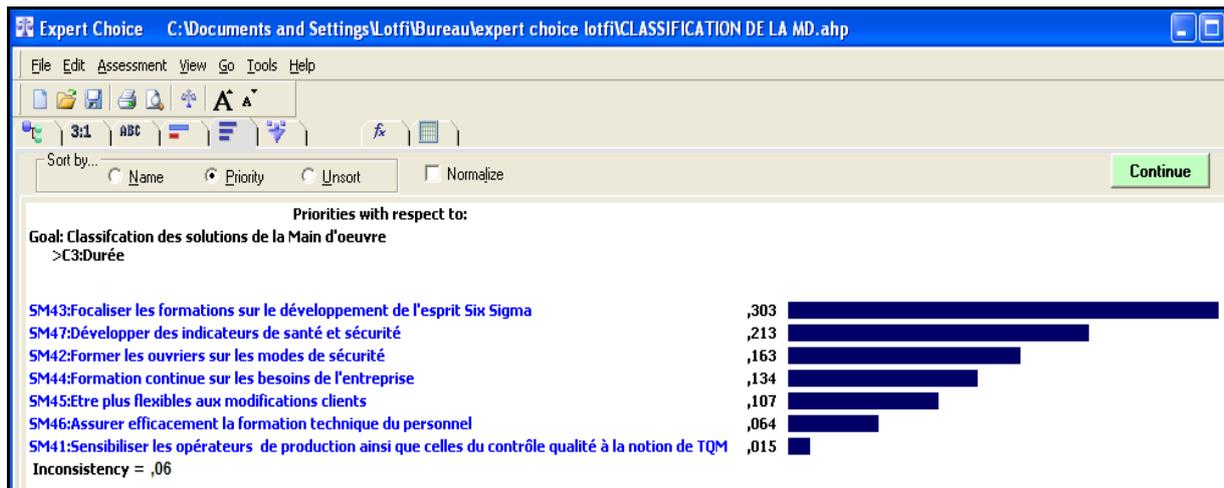
**Figure. 124** Vecteur propre correspondant au critère «Formation et sensibilisation de l'ouvrier »

Pour le premier critère C1 *Formation et sensibilisation de l'ouvrier*, le décideur hiérarchise la solution SM43 *Focaliser les formations sur le développement de l'esprit Six Sigma* avec un poids d'évaluation de (0.366), et considère que les solutions SM46 *Assurer efficacement la formation technique du personnel* et SM45 *Etre flexibles aux modifications clients*, n'ont pas un impact élevé sur l'amélioration de M4.



**Figure. 125** Vecteur propre correspondant au critère «Coût d'amélioration de la main d'œuvre »

Le décideur sur classe la solution SM43 *Focaliser les formations sur le développement de l'esprit Six Sigma*, pour le critère C2 comme pour le critère C1, avec un vecteur poids d'évaluation de (0.356), et considère aussi que SM45 *Etre flexibles aux modifications clients*, n'a pas un impact élevé sur l'amélioration de M4 .



**Figure. 126 Vecteur propre correspondant au critère « Durée ».**

Pour le critère C3 *Durée*, le décideur priorise encore la solution SM43 Focaliser les formations sur le développement de l'esprit Six Sigma par rapport aux autres solutions, et superflue la solution SM41 *Sensibiliser les opérateurs de production ainsi que celles du contrôle qualité à la notion du TQM de l'amélioration de M4*.

- **Étape 4** : Vérification de la cohérence des jugements. Tous les jugements sont cohérents.

Selon SAATY La cohérence globale d'appréciation est évaluée au moyen de ce ratio de cohérence RC. La valeur de ce dernier doit être au plus égale à **10%**.

Dans le cas où cette valeur dépasse 10%, les appréciations peuvent exiger certaines révisions, et la cohérence est dit non acceptée.

- C1 : cohérence acceptée ( $0.06 < 10\%$ ),
- C2 : cohérence acceptée ( $0.05 < 10\%$ ),
- C3 : cohérence acceptée ( $0.06 < 10\%$ ).

-**Étape 5** : Calcul de la performance relative de chacune des actions.

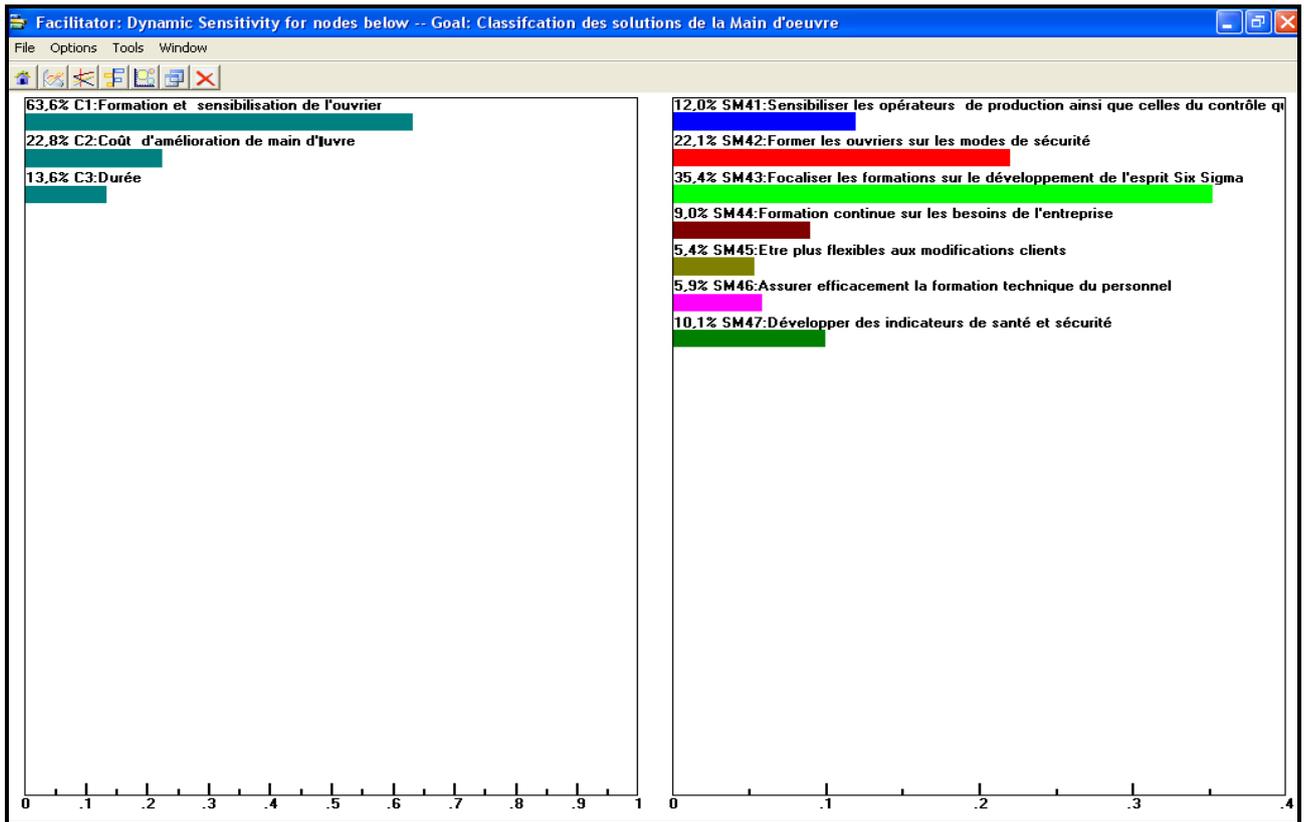


Figure. 127 Performance des actions

Le classement final des sept solutions selon la méthode AHP par ordre de priorité pour améliorer M4 est schématisé comme suit :

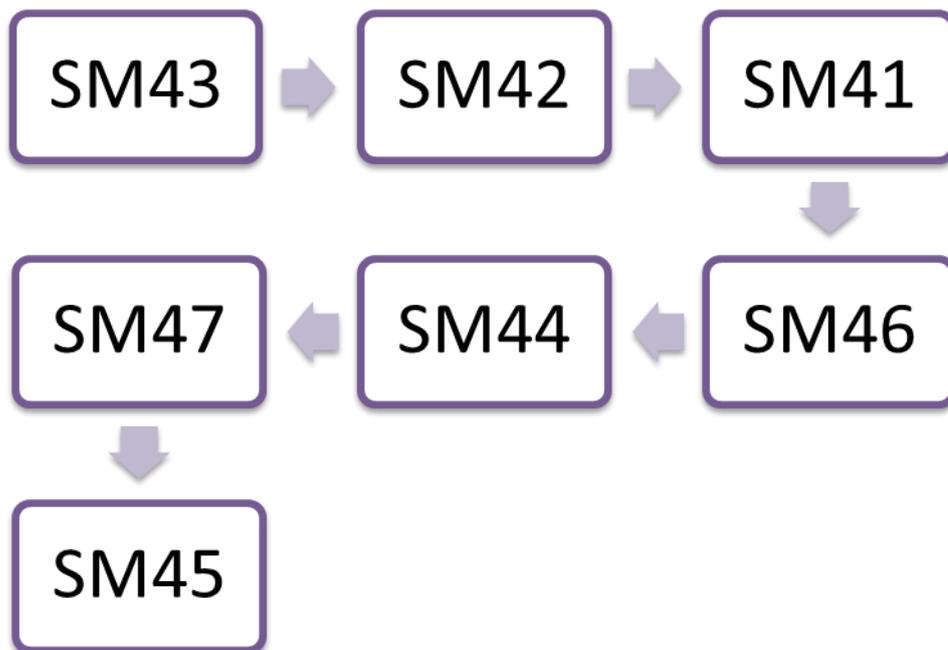


Figure. 128 Classement final des solutions de M4

### **Amélioration de Matière (M5)**

Les solutions :

- optimiser l'analyse des flux de stocks et des encours (**SM51**),
- renouveler les objectifs (en termes du Lead time et du coût) en ce qui concerne le JAT client, (**SM52**),
- développer des méthodes efficaces pour diminuer les stocks et les encours (**SM53**),
- assurer le suivi du logiciel avec le fournisseur afin de l'adopter aux besoins de SEDILEC (**SM54**),
- affecter le magasin pièces de rechange ainsi que sa gestion au responsable magasin matière première afin de bien gérer les entrées et sorties des PDR (**SM55**),
- rendre le magasin inaccessible que pour le magasinier afin d'éviter les erreurs au niveau de la valorisation de la quantité disponible en stock (**SM56**),
- préparer des baguis de besoin quotidien de chaque ligne de production afin d'effectuer une seule opération de livraison par jour vers la zone de production (**SM57**),

Pour l'amélioration des Matières, nous avons proposé deux critères. Ce sont :

- *Coûts d'amélioration des Matière*
- *Durée (jours)*

### **Application de AHP (Logiciel : Expert Choice):**

**-Étape 1 :** Décomposition du problème en une hiérarchie d'éléments interreliés. La structure hiérarchique du problème est la suivante.

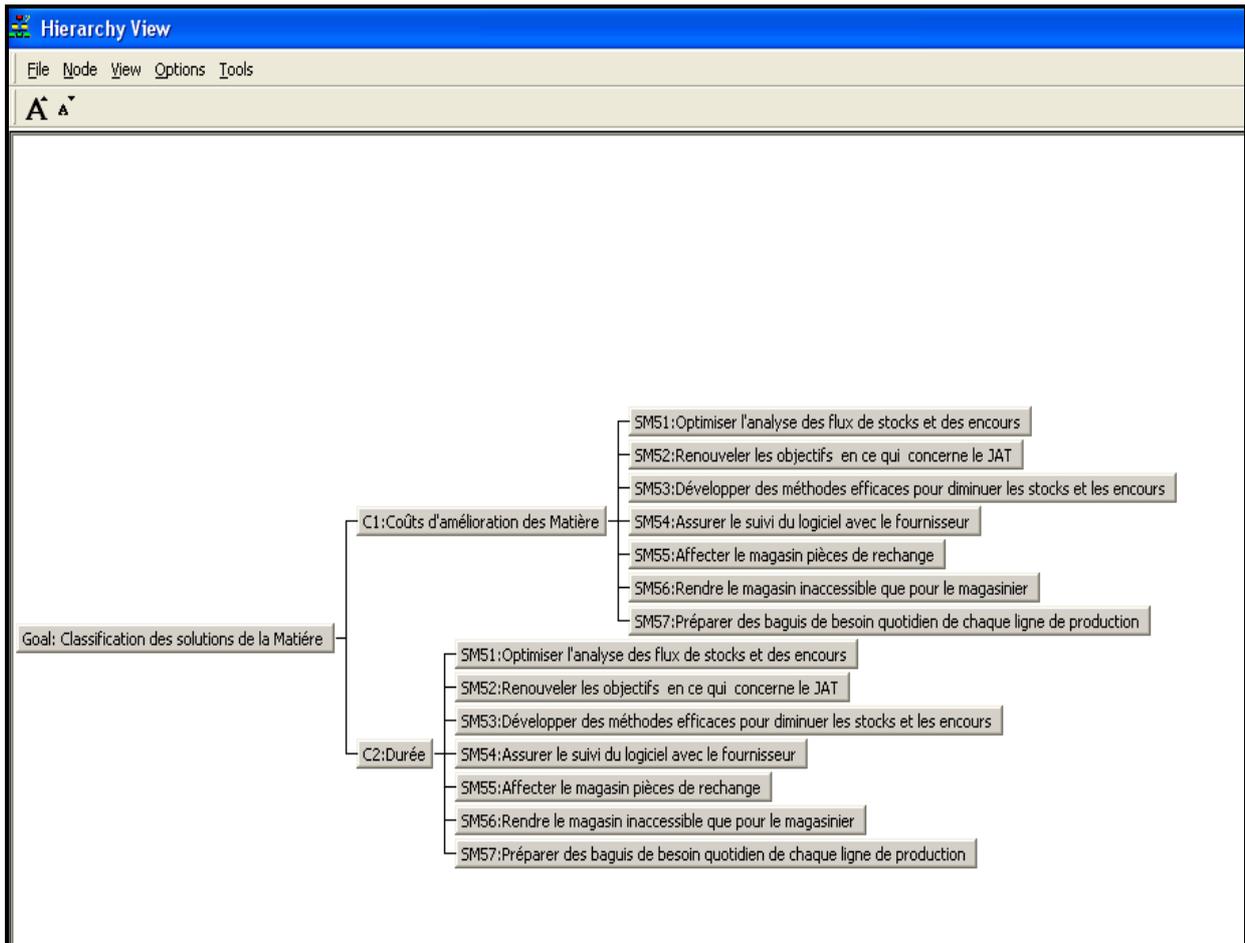


Figure. 129 Structure hiérarchique du problème

-Étape 2 : Comparaisons par paires des éléments de chaque niveau hiérarchique par rapport à un élément du niveau hiérarchique supérieur.

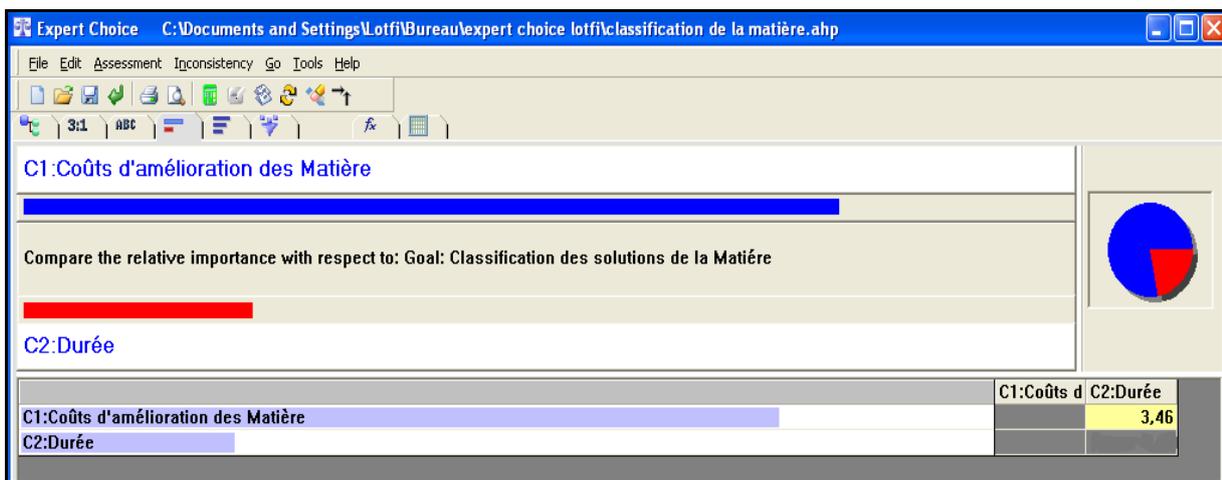
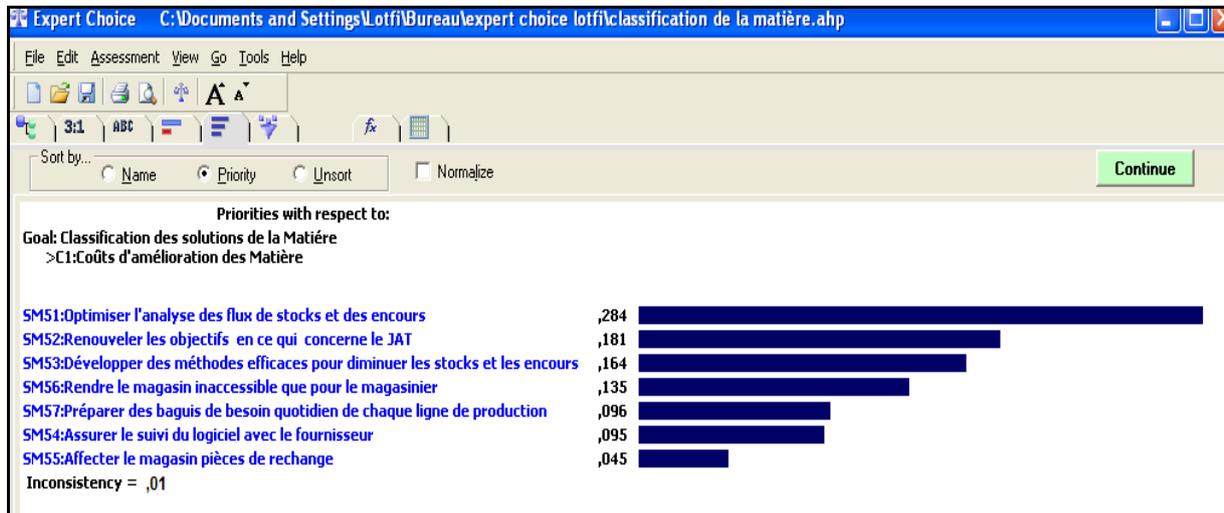


Figure. 130 Comparaison par paires des critères

A partir de la matrice de comparaison par paires des critères, le décideur surclasse le critère C1 *Coût d'amélioration de la matière par rapport au critère, C2 : Durée.*

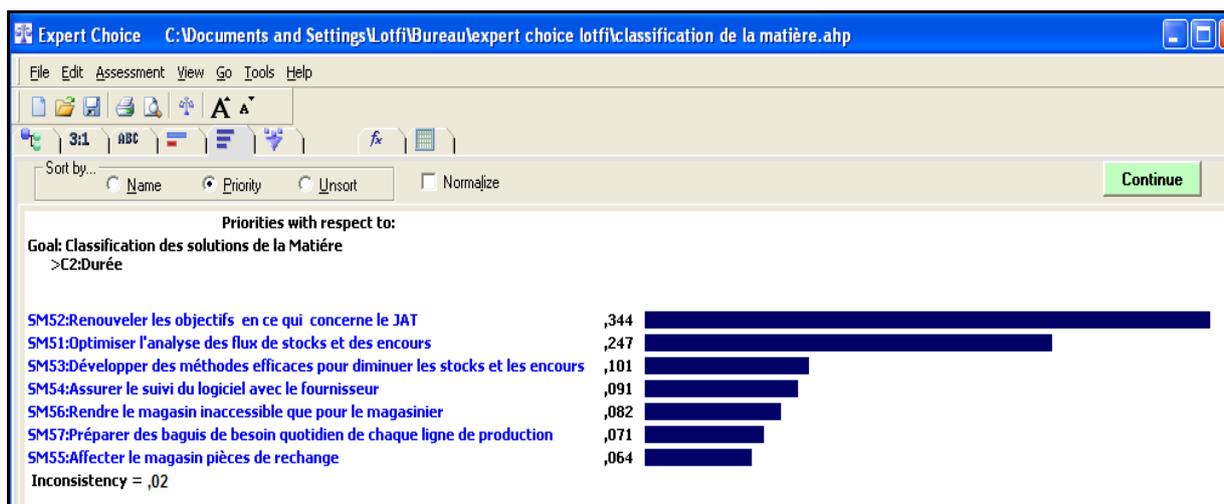
**-Étape 3 :** Détermination de l'importance relative des éléments en calculant les vecteurs propres correspondants aux valeurs propres maximales des matrices de comparaisons.

Les écrans ci-après décrivent trois façons différentes de représenter les vecteurs propres.



**Figure. 131** Vecteur propre correspondant au critère « Coût d'amélioration de la matière ».

Selon le critère C1, la solution la plus efficace pour améliorer M5 est *SM51 Optimiser l'analyse des flux de stocks et des encours* avec un poids d'évaluation de (0.284). Ainsi, la solution *SM55 Affecter le magasin pièces de rechange* est considérée comme non appropriée pour améliorer M5.



**Figure. 132** Vecteur propre correspondant au critère « Durée ».

Pour le critère C2, le décideur sur classe la solution SM52 *Renouveler les objectifs en ce qui concerne le JAT*, avec un poids d'évaluation de (0.344), et considère encore la solution SM55 : *Affecter le magasin pièces de rechange* est considérée comme non appropriée pour améliorer M5.

**-Étape 4** : Vérification de la cohérence des jugements. Tous les jugements sont cohérents.

Selon SAATY La cohérence globale d'appréciation est évaluée au moyen de ce ratio de cohérence RC. La valeur de ce dernier doit être au plus égale à **10%**.

Dans le cas ou cette valeur dépasse 10%, les appréciations peuvent exiger certaines révisions, et la cohérence est dit non acceptée.

- C1 : cohérence acceptée ( $0.01 < 10\%$ ),
- C2 : cohérence acceptée ( $0.02 < 10\%$ ).

**- Étape 5** : Calcul de la performance relative de chacune des actions.

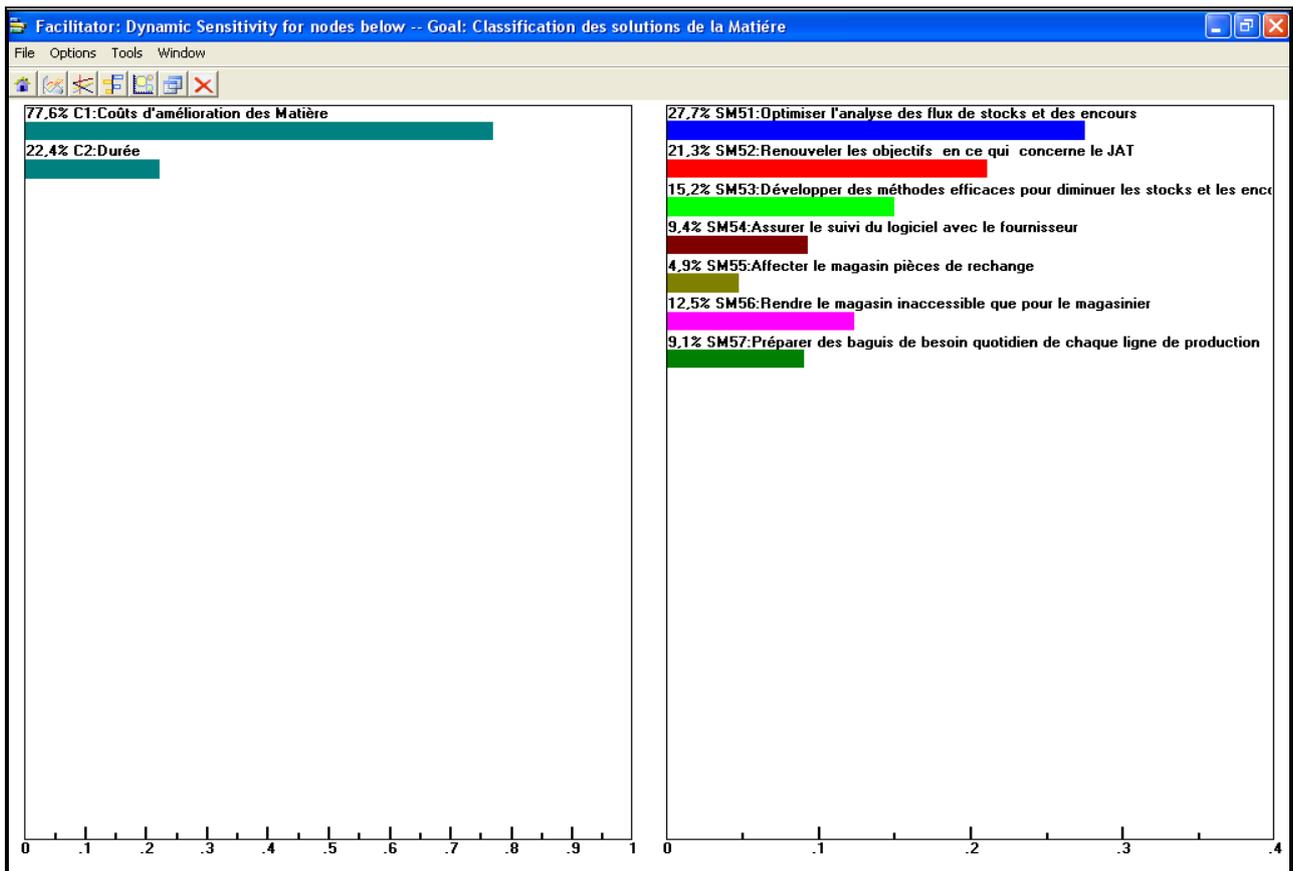


Figure. 133 Performance des actions

Le classement final des sept solutions selon la méthode AHP par ordre de priorité pour améliorer M4 est schématisé comme suit

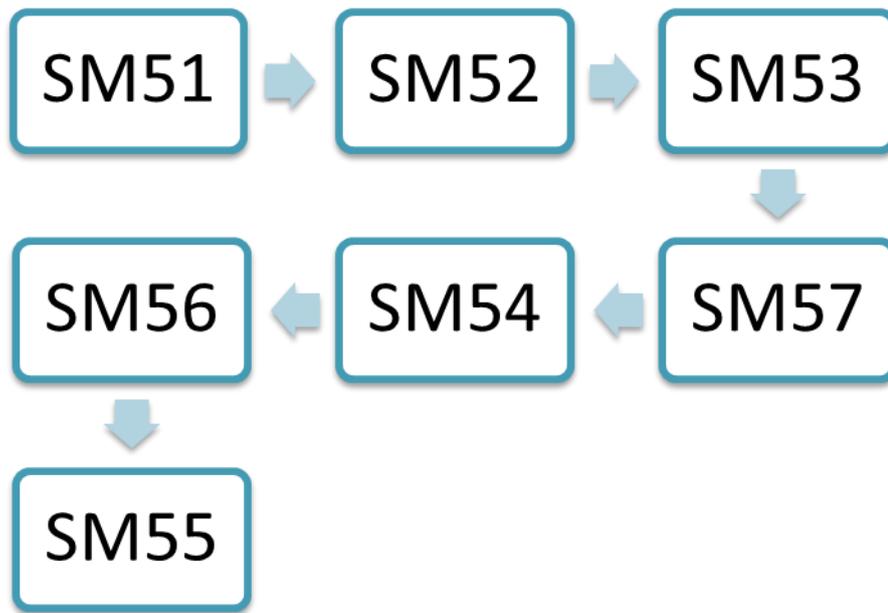


Figure. 134 Classement final des solutions de M5

Pour conclure la classification pour chaque M est :

<i>Classement de M1</i>	<i>Classement de M2</i>	<i>Classement de M3</i>	<i>Classement de M4</i>	<i>Classement de M5</i>
SM17	SM23	SM32	SM43	SM51
SM14	SM21	SM37	SM47	SM52
SM16	SM27	SM36	SM42	SM53
SM15	SM22	SM34	SM44	SM56
SM11	SM26	SM35	SM45	SM54
SM13	SM25	SM33	SM46	SM57
SM12	SM24	SM31	SM41	SM55

Tableau. 30 Classification des solutions de chaque M

**-Etape 2 : Sélection finale**

Dans cette étape un modèle hybride proposé sera utilisé. Ce modèle hybride peut considérer les critères objectifs et subjectifs. Ce modèle hybride précise les améliorations des cinq M à faire (les améliorations pour les quelles la décision n'est pas faite pour la première étape).

### 3.5.6 Application numérique

#### A. Démarche séparée

Supposons que l'entreprise SIDILEC cherche à améliorer son processus de production et en particulier son processus de coupe pour cela l'entreprise cherche quelle décision à prendre parmi les cinq décisions :

- Amélioration de **Milieu** (M1) ; (d1),
- Amélioration de **Matériel** (M2) ; (d2),
- Amélioration de **Méthode** (M3) ; (d3),
- Amélioration de **Main d'œuvre** (M4) ; (d4),
- Amélioration de **Matière** (M5) ; (d5).

Comme dans l'étape de présélection où avons classé les solutions d'amélioration nous avons décidé de choisir pour chaque M les 5 solutions classées les premiers par la méthode AHP.

- Soit **S1** l'ensemble des solutions choisies pour M1 :

<b>S1</b>	<b>SM17</b>	<b>SM14</b>	<b>SM16</b>	<b>SM15</b>	<b>SM11</b>
-----------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

**Tableau. 31 Solutions pour M1**

- Soit **S2** l'ensemble des solutions choisies pour M2 :

<b>S2</b>	<b>SM23</b>	<b>SM21</b>	<b>SM27</b>	<b>SM22</b>	<b>SM26</b>
-----------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

**Tableau. 32 Solutions pour M2**

- Soit **S3** l'ensemble des solutions choisies pour M3 :

<b>S3</b>	<b>SM32</b>	<b>SM37</b>	<b>SM36</b>	<b>SM34</b>	<b>SM35</b>
-----------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

**Tableau. 33 Solutions pour M3**

- Soit **S4** l'ensemble des solutions choisies pour M4 :

<b>S4</b>	<b>SM43</b>	<b>SM47</b>	<b>SM42</b>	<b>SM44</b>	<b>SM45</b>
-----------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

**Tableau. 34 Solutions pour M4**

- Soit **S5** l'ensemble des solutions choisies pour M5 :

<b>S5</b>	<b>SM51</b>	<b>SM52</b>	<b>SM53</b>	<b>SM56</b>	<b>SM54</b>
-----------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

**Tableau. 35 Solutions pour M5**

L'entreprise SIDELEC cherche à améliorer son processus coupe qui est le processus de base pour l'entreprise. Ainsi, pour des contraintes de temps SIDELEC vers quel domaine se tourner en priorité pour améliorer sa performance de M1, M2, M3, M4 ou M5.

Pour cela nous allons appliquer le modèle B qui est une extension de modèle A. Le décideur a proposé des utilités pour les solutions de chaque M, qui sont représenté dans les tableaux suivants :

- Les utilités des solutions choisies de M1 pour les autres M :

Avec :  $X_{ij}$  : la solution i de Mj, (i=1.....5), (j=1.....5)

Utilité	X11	X12	X13	X14	X15
U SM11	1	0.3	0.2	0.2	0.6

Tableau. 36 Les utilités de la solution SM11 pour les cinq M simultanément

On lit par exemple « 0,3 » représente l'utilité de la solution SM11 pour M2.

Utilité	X21	X22	X23	X24	X25
U SM12	0.2	1	0.4	0.4	0.7

Tableau. 37 Les utilités de la solution SM12 pour les cinq M simultanément

Utilité	X31	X32	X33	X34	X35
U SM13	0.2	0.2	1	0.3	0.7

Tableau. 38 Les utilités de la solution SM13 pour les cinq M simultanément

Utilité	X41	X42	X43	X44	X45
U SM14	0.2	0.5	0.4	1	0.6

Tableau. 39 Les utilités de la solution SM14 pour les cinq M simultanément

Utilité	X51	X52	X53	X54	X55
U SM15	0.3	0.4	0.6	0.4	1

Tableau. 40 Les utilités de la solution SM15 pour les cinq M simultanément

- Les utilités des solutions choisies de M2 pour les autres M :

Utilité	X11	X12	X13	X14	X15
U SM21	1	0.5	0.6	0.7	0.8

Tableau. 41 Les utilités de la solution SM21 pour les cinq M simultanément

Utilité	X21	X22	X23	X24	X25
U SM22	0.8	1	0.5	0.3	0.2

Tableau. 42 Les utilités de la solution SM22 pour les cinq M simultanément

Utilité	X31	X32	X33	X34	X35
U SM23	0.4	0.5	1	0.5	0.7

Tableau. 43 Les utilités de la solution SM23 pour les cinq M simultanément

Utilité	X41	X42	X43	X44	X45
U SM24	0.4	0.5	0.3	1	0.8

Tableau. 44 Les utilités de la solution SM24 pour les cinq M simultanément

Utilité	X51	X52	X53	X54	X55
U SM25	0.5	0.4	0.6	0.3	1

Tableau. 45 Les utilités de la solution SM25 pour les cinq M simultanément

- Les utilités des solutions choisies de M3 pour les autres M :

Utilité	X11	X12	X13	X14	X15
U SM31	1	0.6	0.3	0.8	0.4

Tableau. 46 Les utilités de la solution SM31 pour les cinq M simultanément

Utilité	X21	X22	X23	X24	X25
U SM32	0.2	1	0.7	0.5	0.6

Tableau. 47 Les utilités de la solution SM32 pour les cinq M simultanément

Utilité	X31	X32	X33	X34	X35
U SM33	0.5	0.8	1	0.6	0.4

Tableau. 48 Les utilités de la solution SM33 pour les cinq M simultanément

Utilité	X41	X42	X43	X44	X45
U SM34	0.2	0.5	0.8	1	0.4

Tableau. 49 Les utilités de la solution SM34 pour les cinq M simultanément

Utilité	X51	X52	X53	X54	X55
U SM35	0.25	0.5	0.7	0.6	1

Tableau. 50 Les utilités de la solution SM35 pour les cinq M simultanément

- Les utilités des solutions choisies de M4 pour les autres M :

Utilité	X11	X12	X13	X14	X15
U SM41	1	0.4	0.36	0.45	0.8

Tableau. 51 Les utilités de la solution SM41 pour les cinq M simultanément

Utilité	X21	X22	X23	X24	X25
U SM42	0.45	1	0.75	0.65	0.25

Tableau. 52 Les utilités de la solution SM42 pour les cinq M simultanément

Utilité	X31	X32	X33	X34	X35
U SM43	0.45	0.65	1	0.7	0.8

Tableau. 53 Les utilités de la solution SM43 pour les cinq M simultanément

Utilité	X41	X42	X43	X44	X45
U SM44	0.2	0.5	0.7	1	0.45

Tableau. 54 Les utilités de la solution SM44 pour les cinq M simultanément

Utilité	X51	X52	X53	X54	X55
U SM45	0.25	0.75	0.8	0.45	1

Tableau. 55 Les utilités de la solution SM45 pour les cinq M simultanément

- Les utilités des solutions choisies de M5 pour les autres M :

Utilité	X11	X12	X13	X14	X15
U SM51	1	0.45	0.45	0.55	0.7

Tableau. 56 Les utilités de la solution SM51 pour les cinq M simultanément

Utilité	X21	X22	X23	X24	X25
U SM52	0.55	1	0.45	0.45	0.55

Tableau. 57 Les utilités de la solution SM52 pour les cinq M simultanément

Utilité	X31	X32	X33	X34	X35
U SM53	0.45	0.65	1	0.7	0.8

Tableau. 58 Les utilités de la solution SM53 pour les cinq M simultanément

Utilité	X41	X42	X43	X44	X45
U SM54	0.8	0.5	0.6	1	0.5

Tableau. 59 Les utilités de la solution SM54 pour les cinq M simultanément

Utilité	X51	X52	X53	X54	X55
U SM55	0.25	0.75	0.87	0.55	1

Tableau. 60 Les utilités de la solution SM55 pour les cinq M simultanément

Ainsi, le nombre de solution pour chaque M, est résumé dans le Tableau.60 :

Les solutions	Solutions (M1)	Solutions (M2)	Solutions (M3)	Solutions (M4)	Solutions (M5)
Nombre de solutions	5	5	5	5	5

Tableau. 61 Nombre des solutions pour chaque M

Selon la méthode proposée modèle B, nous devons résoudre le modèle simplifié cinq fois (d = 5).

Pour d =1 est en utilisant le progiciel LINGO 10, le montant de la fonction objectif est la solution optimale sont :

- **Pour d = 1 c'est-à-dire décision d'améliorer M1 :**

$$U = 5$$

d=1	X13	X14	X15	X21	X22	X23	X24	X25	X31	X32	X33	X34	X35	X41	X42	X43	X44	X45	X51
Xij	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0

Tableau. 62 Les solutions optimales pour d=1

Pour d =2 est en utilisant le progiciel LINGO 10, le montant de la fonction objectif et la solution optimale sont :

- **Pour d = 2 c'est-à-dire décision d'améliorer M2 :**

$$U = 5$$

d=2	X13	X14	X15	X21	X22	X23	X24	X25	X31	X32	X33	X34	X35	X41	X42	X43	X44	X45	X51
Xij	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0

Tableau. 63 Les solutions optimales pour d=2

Pour d =3 est en utilisant le progiciel LINGO 10, le montant de la fonction objectif et la solution optimale sont :

- **Pour d = 3 c'est-à-dire décision d'améliorer M3 :**

$$U = 5$$

d=3	X13	X14	X15	X21	X22	X23	X24	X25	X31	X32	X33	X34	X35	X41	X42	X43	X44	X45	X51
Xij	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0

Tableau. 64 Les solutions optimales pour d=3

Pour d = 4 est en utilisant le progiciel LINGO 10, le montant de la fonction objectif et la solution optimale sont :

- **Pour d = 4 c'est-à-dire décision d'améliorer M4 :**

$$U = 5$$

d=4	X13	X14	X15	X21	X22	X23	X24	X25	X31	X32	X33	X34	X35	X41	X42	X43	X44	X45	X51
Xij	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0

**Tableau. 65 Les solutions optimales pour d=4**

Pour d =5 est en utilisant le progiciel LINGO 10, le montant de la fonction objectif et la solution optimale sont :

- **Pour d = 5 c'est-à-dire décision d'améliorer M5 :**

U =5

d=5	X13	X14	X15	X21	X22	X23	X24	X25	X31	X32	X33	X34	X35	X41	X42	X43	X44	X45	X51
Xij	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0

**Tableau. 66 Les solutions optimales pour d=5**

Le décideur va prendre la décision où Uij est importante c'est-à-dire la décision qui a un Uij plus grand.

Cependant après avoir déterminé les sorties de LINGO nous avons trouvé que la solution optimale pour les 5 décisions est égale à 5 (ANNEXE 4).

Donc le décideur se trouve devant 5 décisions optimales ou il ne peut pas faire un choix sur ce qu'il convient d'améliorer (qu'elle M ?).Et voilà la nécessité d'une démarche intégrée qui a comme but de nous aider à prendre les meilleures décisions d'amélioration.

**B. démarche intégrée :**

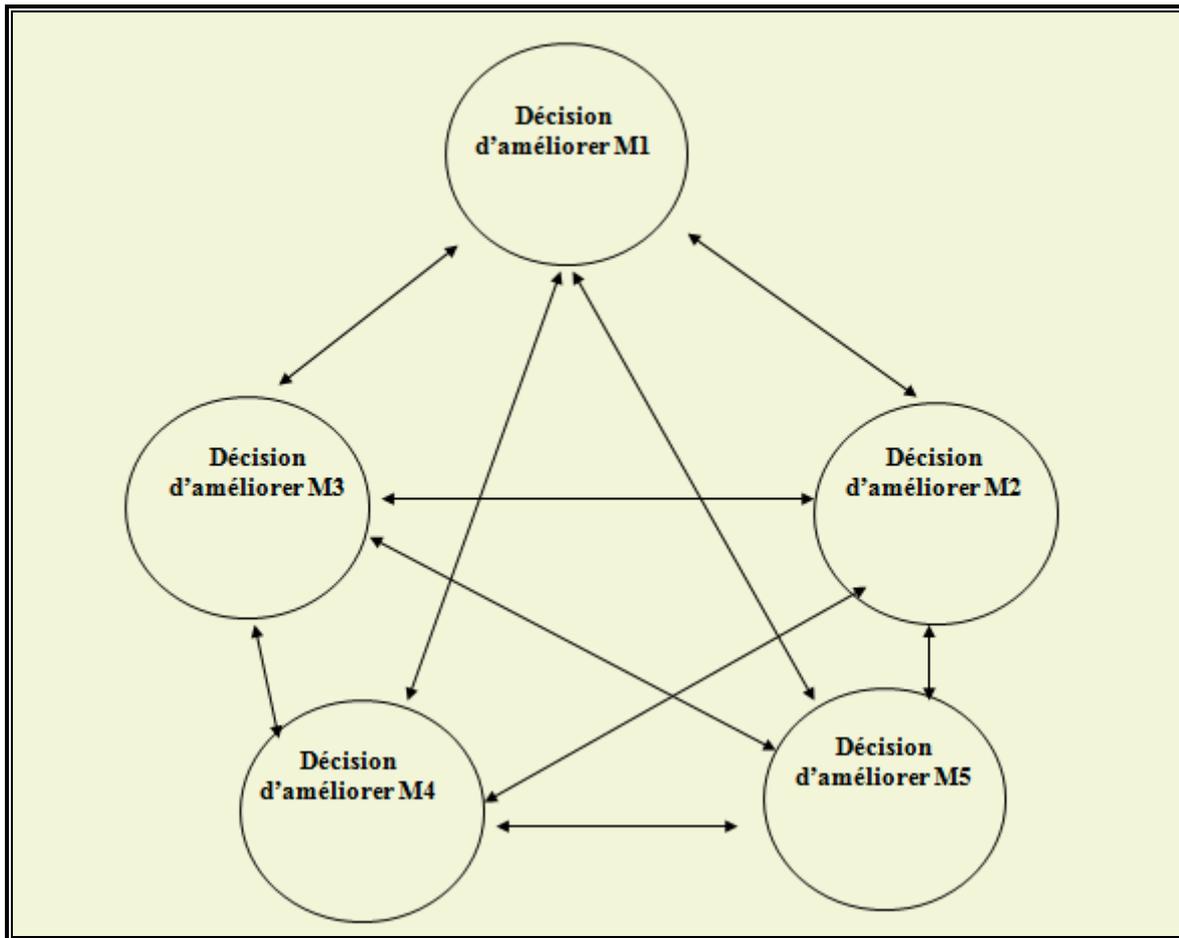
L'entreprise a décidé d'améliorer son processus de production et en particulier le processus coupe pour cela nous allons calculer les utilités Uij pour les 5 décisions d'améliorations. Elle cherche aussi des solutions pertinentes pour améliorer les 5 M de son processus, elle va prendre les 5 décisions eu même temps. C'est-à-dire de manière simultanée.

Pour cela les critères de décisions retenues par cette entreprise sont les suivants :

	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>
<b>Durée</b>	A	C	E	G	I
<b>Coûts</b>	B	D	F	H	J

**Tableau. 67 Les critères de décisions**

L'impact inter décisionnel des décisions d'amélioration donne le résultat suivant (Figure.135).



**Figure. 135 Interaction entre les décisions**

Dans cet exemple nous allons comparer les deux stratégies de prise de décision suivantes.

**- stratégie séparée :**

Dans cette stratégie, l'entreprise traite chaque décision de manière complètement séparée.

**- stratégie intégrée :**

Dans cette stratégie, le modèle intégré proposé dans cette thèse sera appliqué.

**B.1. Calculer le degré d'importance des critères de chaque décision**

Pour cela une approche de type A.H.P. peut nous aider à trier des critères. Le résultat de cette étape est la suivante (Tableau. 68).

Nous prenons par exemple pour la décision d'améliorer M1 on a pris les deux critères A et B où le poids de A est 0.35 et B est de 0.65

<b>d = 1 : décision d'améliorer M1</b>		<b>d = 1 : décision d'améliorer M2</b>		<b>d = 1 : décision d'améliorer M3</b>		<b>d = 1 : décision d'améliorer M4</b>		<b>d = 1 : décision d'améliorer M5</b>	
<b>Critères</b>	<b>Poids</b>	<b>Critères</b>	<b>Poids</b>	<b>Critères</b>	<b>Poids</b>	<b>Critères</b>	<b>Poids</b>	<b>Critères</b>	<b>Poids</b>
<b>A</b>	0.35	<b>C</b>	0.25	<b>E</b>	0.55	<b>G</b>	0.40	<b>I</b>	<b>0.25</b>
<b>B</b>	0.65	<b>D</b>	0.75	<b>F</b>	0.45	<b>H</b>	0.60	<b>J</b>	<b>0.75</b>
<b>Somme</b>	<b>1</b>		<b>1</b>		<b>1</b>		<b>1</b>		<b>1</b>

**Tableau. 68 Les poids des critères des 5 décisions**

**B.2. Calculer la note de chaque solution vis-à-vis de chaque critère.**

Pour cela une échelle 5 à 9 peut nous servir, le 5 pour un degré d'importance très faible et 9 pour un degré d'importance très fort.

**-décision d'améliorer M1**

<i>Critère A</i>					
	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S4</i>	<i>S5</i>
M1	8	9	9	6	6
M2	9	8	8	8	9
M3	9	7	7	7	9
M4	8	9	8	8	7
M5	7	8	7	6	6

**Tableau. 69** Evaluation du critère A de M1  
**-décision d'améliorer M2**

<i>Critère B</i>					
	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S4</i>	<i>S5</i>
M1	8	6	8	7	9
M2	9	5	6	8	9
M3	7	5	6	8	6
M4	6	7	7	7	7
M5	5	8	8	9	7

**Tableau. 70** Evaluation du critère B de M1

<i>Critère A</i>					
	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S4</i>	<i>S5</i>
M1	8	9	9	7	5
M2	9	7	6	8	9
M3	9	8	6	7	8
M4	5	7	7	7	7
M5	7	8	3	3	6

**Tableau. 71** Evaluation du critère A de M2

<i>Critère B</i>					
	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S4</i>	<i>S5</i>
M1	8	7	8	9	8
M2	9	7	6	8	7
M3	7	5	5	5	6
M4	6	8	5	7	5
M5	5	7	8	8	8

**Tableau. 72** Evaluation du critère B de M2

**- décision d'améliorer M3**

<i>Critère A</i>					
	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S4</i>	<i>S5</i>
M1	7	9	9	6	6
M2	7	6	8	9	9
M3	5	7	7	9	9
M4	8	9	8	8	7
M5	6	8	7	7	6

**Tableau.73** Evaluation du critère A de M3

<i>Critère B</i>					
	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S4</i>	<i>S5</i>
M1	8	6	8	7	8
M2	9	3	6	8	9
M3	7	7	6	8	6
M4	6	8	7	7	7
M5	5	9	7	9	7

**Tableau. 74** Evaluation du critère B de M3

décision d'améliorer M4

Critère A					
	S1	S2	S3	S4	S5
M1	6	8	9	6	6
M2	9	8	8	8	9
M3	9	8	7	9	9
M4	8	9	8	8	7
M5	7	6	7	8	6

Tableau. 75 Evaluation du critère A de M4

Critère B					
	S1	S2	S3	S4	S5
M1	8	6	8	7	9
M2	9	5	9	8	9
M3	8	5	6	8	6
M4	6	7	7	8	7
M5	5	9	7	8	9

Tableau. 76 Evaluation du critère B de M4

- décision d'améliorer M5

Critère A					
	S1	S2	S3	S4	S5
M1	8	9	8	6	7
M2	9	7	8	8	9
M3	8	7	6	7	9
M4	8	9	6	5	7
M5	9	8	7	8	6

Tableau. 77 Evaluation du critère A de M5

Critère B					
	S1	S2	S3	S4	S5
M1	8	6	6	7	9
M2	7	6	8	9	9
M3	6	5	9	8	6
M4	6	7	6	7	7
M5	9	8	7	9	6

Tableau. 78 Evaluation du critère B de M5

Echelle d'évaluation des critères :

9	Très important
8	Important
7	Moyen
6	Faible
5	Très faible

Tableau. 79 Echelle d'évaluation des critères

**B.3. Trouver la meilleure solution**

Dans cette stratégie nous allons calculer les utilités  $U_{ij}$  et à partir du modèle mathématique B nous trouverons la solution qui maximise l'utilité totale.

La figure. 136 montre les modalités de calcul des valeurs  $U_{ijd}$  qui correspondent à la décision d'amélioration de processus coupe. En effet on multiplie la note de chaque solution vis-à-vis de chaque M par les poids des critères concernés et puis on additionne les valeurs obtenues.

Dans le dernier tableau de cette figure les valeurs de  $U_{ijd}$  sont présentées.

Pour la décision d'améliorer M1 :

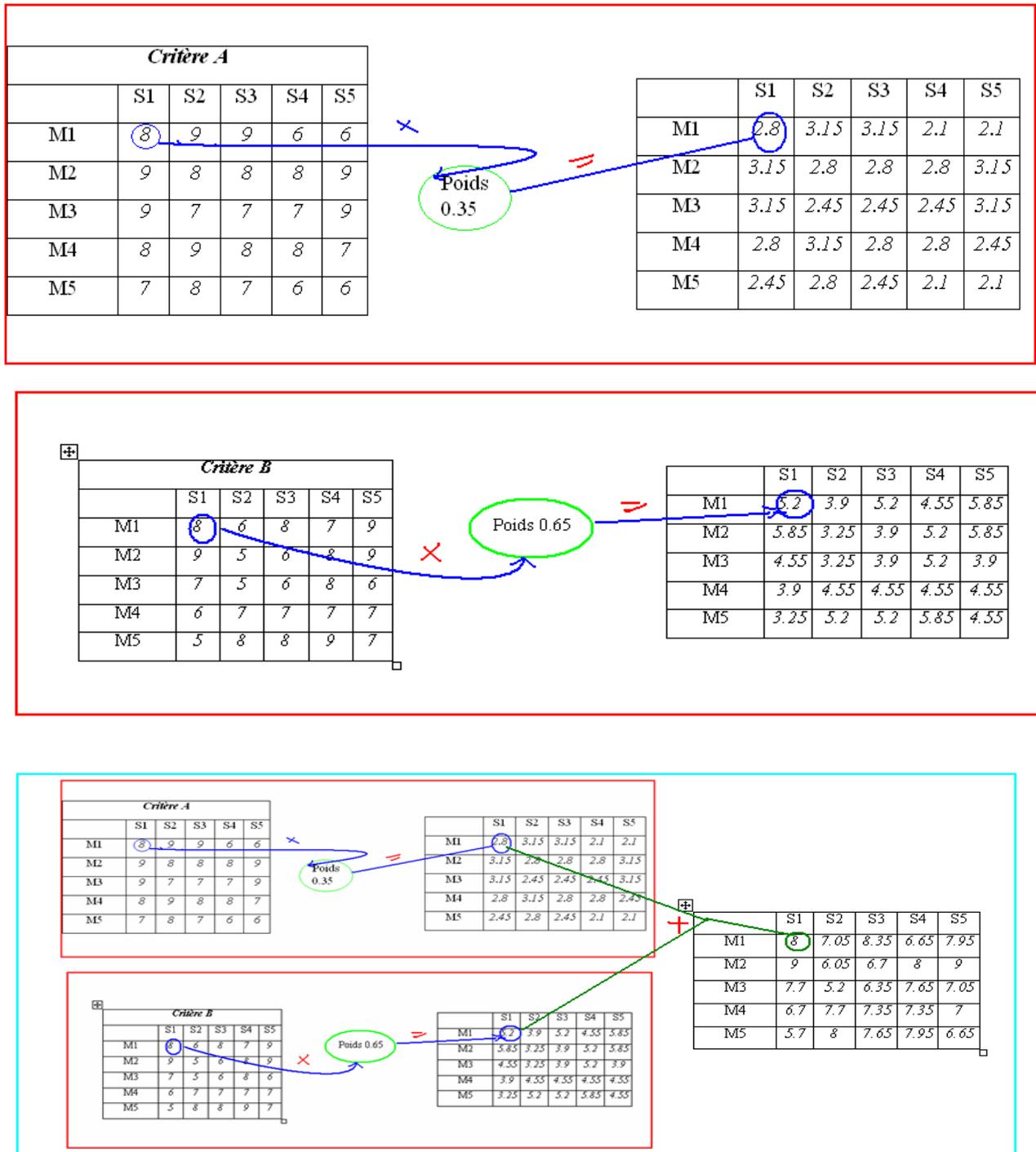


Figure. 136 les modalités de calcul des valeurs  $U_{ijd}$  qui correspondent à la décision d'améliorer M1

De la même façon on peut calculer les valeurs  $U_{ij}$  pour M2, M3, M4 et M5 (ANNEXE 5)

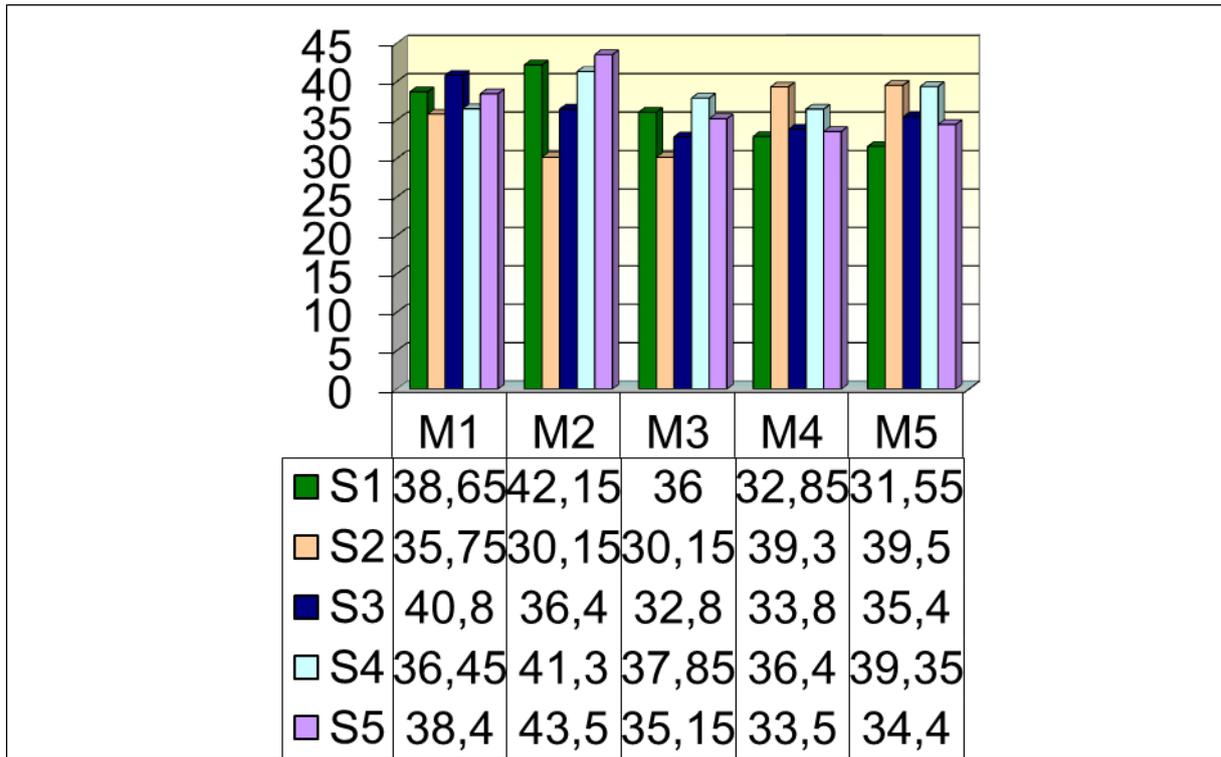


Figure. 137 Représentation graphique des résultats optimaux

Le résultat de cette étape calculer par le Programme d'exécution de démarche intégrée Lotfi AZZABI » (ANNEXE 5) est donné par le tableau 79.

Dans ce graphique de cinq M, chaque M correspond à une valeur  $U_{ij}$  par rapport à une solution des cinq solutions. Dans ce tableau l'utilité totale est la somme des utilités de chaque M. Le choix de la décision à prendre pour améliorer les M est basé sur les valeurs des utilités. On choisie le M qui a les valeurs d'utilités les plus grandes.

Pour M2 elle a trois valeurs d'utilités plus grandes qui sont respectivement (S1 : 42.15, S4 :41.30 et S5 :43.50) donc la meilleure décision pour la démarche intégré est la décision de commencer par améliorer M2.

Enfin, on peut voir que l'utilité de la stratégie intégrée est nettement meilleure que la stratégie séparée.

### 3.6 Etape 5: Contrôler

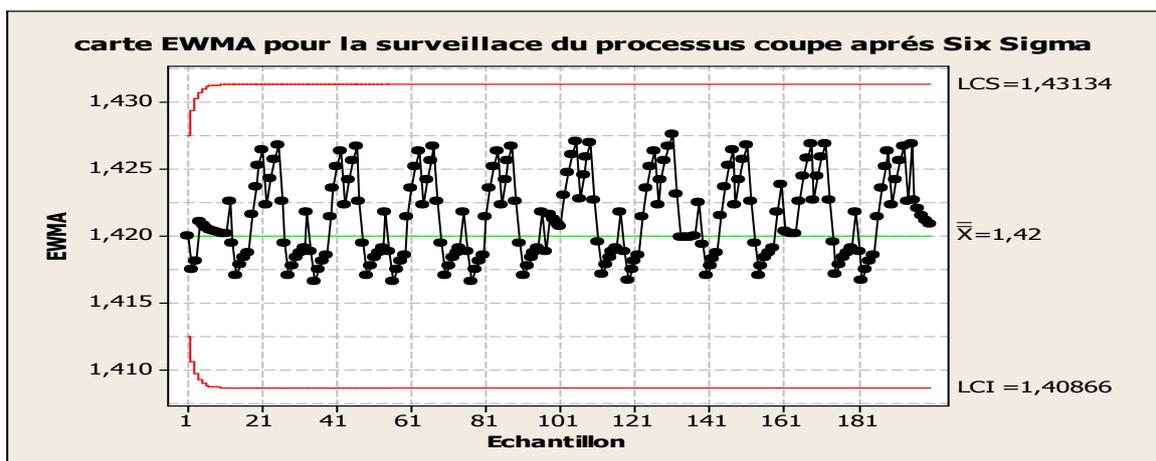
Le fait d'avoir identifié les variables influentes et mis en œuvre les solutions ne suffit pas toujours pour préserver les gains et exploiter les solutions sur des processus identiques.

Pendant la phase d'Amélioration, les solutions ont été trouvées et la planification de la mise en œuvre précisée. Leur mise en place doit normalement les fixer, mais la phase de Contrôle est à préciser pour être sûre que les problèmes identifiés seront réellement éliminés ou minimisés non seulement à court terme mais également sur le moyen et le long terme.

Les objectifs de la phase de contrôle sont de :

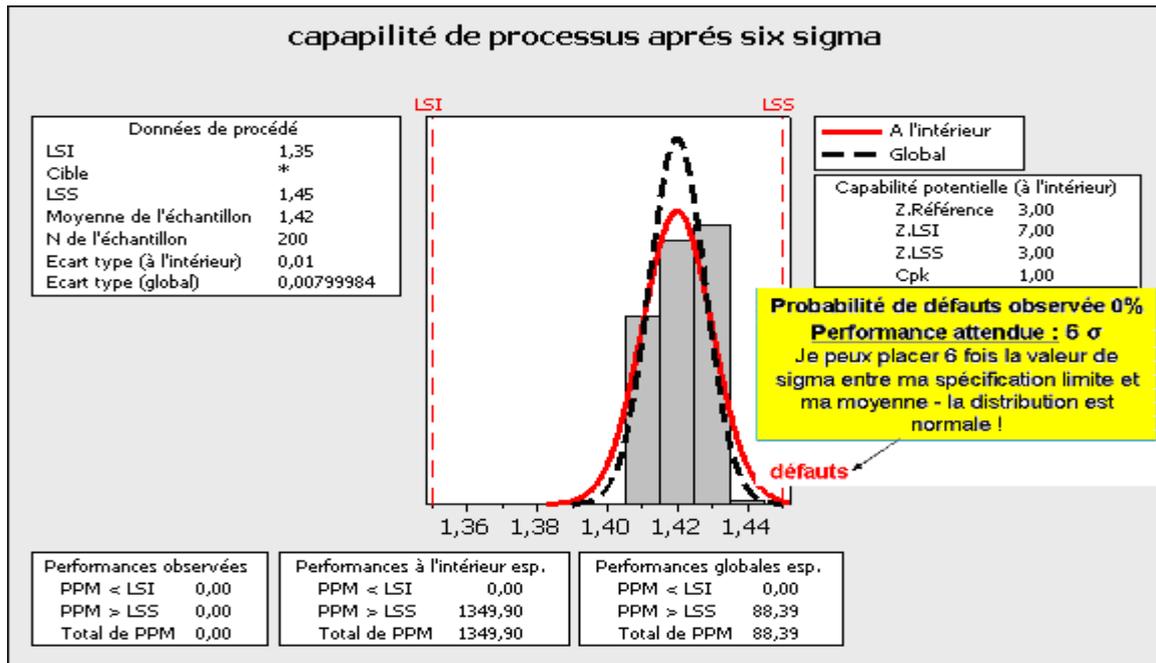
- comprendre les caractéristiques critiques de la phase de contrôle,
- comprendre les différents types de contrôle,
- être capable de mettre en œuvre un contrôle robuste sur n'importe quel type de projet.

Dans notre cas nous avons appliqué la carte EWMA qui va nous aider à surveiller le processus coupe et le choix de ce carte repose sur sa capacité à détecter de petits dérèglages.



**Figure. 138** Carte EWMA pour la surveillance du processus coupe après Six Sigma

Nous constatons que tous les points ne dépassent ni la limite supérieure ni la limite inférieure donc, notre processus est sous contrôle. Nous pouvons ainsi, enregistrer une amélioration parfaite pour ce processus (processus coupe).



**Figure. 139** Capabilité de processus après Six Sigma

Enfin pour conclure nous pouvons dire que notre processus est sous contrôle et la probabilité des défauts observée est de 0% (ANNEXE 6).

## Conclusion

Ce chapitre avait pour but d'appliquer la méthode Six Sigma dans un processus de production avec une nouvelle vue basée sur les outils multicritère d'aide à la décision.

Dans un premier temps nous avons appliqué la méthode MACBETH pour classer les causes de dysfonctionnements dans la phase Analyser. Dans un deuxième temps nous constatons pour l'étape Améliorer qu'il y a des dépendances entre les cinq décisions d'améliorations (Améliorer M1, Améliorer M2, Améliorer M3, Améliorer M4 ou Améliorer M5) et nous avons vu qu'il y a des interactions importantes directes ou indirectes entre ces décisions. La démarche proposée pour l'intégration de ces cinq décisions se base sur deux étapes principales. Dans la première étape on considère les critères ou les contraintes critiques de chacune des décisions. Le résultat de cette étape est une présélection des solutions, cette première étape nous permet de faire le choix pour certaine solution pour chaque M.

La deuxième étape, un modèle hybride qui est constitué à partir d'un modèle d'optimisation mathématique et l'approche multicritères nous aide à traiter les cinq décisions de manière intégrée. Nous avons appliqué deux stratégies : séparée et intégrée pour traiter ces cinq décisions. Nous avons vu que la démarche séparée à donner les mêmes utilités pour les cinq décisions donc on ne peut pas choisir quelle décision nous allons prendre et ce que nous allons décider d'améliorer M1 ou M2 ou M3 ou M4 ou M5. Pour cela nous avons appliqué la stratégie intégrée, et nous avons vu que la démarche intégrée propose une solution nettement meilleure par rapport à une démarche séparée.



## **Conclusion générale et perspectives de recherches**

---

Ce travail de thèse s'intéresse à l'amélioration d'un système de production par l'intégration de la méthode Six Sigma et l'approche multicritère d'aide à la décision.

Plus particulièrement nous sommes intéressés à cinq décisions qui nous paraissent capitales pour chaque processus de production. Ce sont : décision d'améliorer M1 (milieu), décision d'améliorer M2 (matériel), décision d'améliorer M3 (méthode), décision d'améliorer M4 (main d'œuvre) et décision d'améliorer M5 (matière).

**Dans un premier chapitre**, nous avons établi une aide méthodologique pour la résolution des problèmes qualité pour cela nous avons cité tous les outils qualité et nous avons mis l'accent sur la méthode Six Sigma.

**Dans le deuxième chapitre**, nous avons une étude bibliographique sur les méthodes de sélection et d'agrégation multicritère que nous avons classé en 3 catégories : les méthodes élémentaires, les méthodes d'optimisation mathématique et les méthodes d'aide à la décision multicritère.

**Dans le troisième chapitre**, à la construction d'une démarche Six Sigma et d'une approche multicritère d'aide à la décision pour améliorer un processus de production.

Ainsi, notre contribution consiste à intégrer les outils multicritères d'aide à la décision (les méthodes élémentaires, les méthodes d'optimisation mathématique et les méthodes d'aide à la décision multicritère) dans la démarche Six Sigma :

Le premier apport consiste à intégrer la méthode Macbeth dans l'étape analyser afin de hiérarchiser les causes de dysfonctionnement de système de production. Une telle hiérarchisation permet une meilleure évaluation des degrés de gravité de chaque cause.

Le deuxième apport est l'intégration de la méthode A.H.P. pour classer les solutions dans l'étape Améliorer afin de nous aider à sélectionner les solutions.

Le troisième apport est l'intégration des méthodes d'optimisation mathématique et en particulier les deux modèles A et B. afin de nous aider à choisir une décision et déterminer quels M faut-il améliorer. Après avoir appliqué le modèle B nous avons constaté que les 5 M ont les mêmes utilités il était donc difficile de définir quel M fallait-il améliorer eu priorité. Pour cette raison cette raison nous avons intégré les cinq M ceci constitue le quatrième apport par l'intégration d'une démarche intégrée pour améliorer les cinq M.

**Dans le quatrième chapitre**, nous avons vu les entreprises des faisceaux de câbles électriques automobiles se multipliaient dans le contexte socioéconomique actuel. Nous avons ensuite étudié les particularités de ce type d'entreprise et de leurs produits afin de les décliner en contraintes pour la résolution de problèmes qualité :

- Nombre important de problèmes qualité.
- Difficulté d'établir une liste exhaustive de causes possibles.
- Difficulté d'accéder à l'information pertinente.

Ensuite, toujours dans ce chapitre nous avons défini un système de production ainsi que les objectifs associés tels que :

- Objectif en termes de quantités produites
- Objectif en termes de qualité
- Objectif de coût
- Objectif de délai
- Objectif de flexibilité

D'un autre coté nous avons montré les modèles de gestion de production comme les modèles semi formels, les modèles formels et l'approche " produits. Ainsi que la structure de production multi- niveaux

**Dans le cinquième chapitre**, nous avons mis l'accent sur l'aspect pratique et ceci par l'expérimentation de modèle dans une entreprise Tunisienne dans le secteur automobile (SIDILEC international) afin d'améliorer son processus de production et en particulier le processus coupe.

Enfin, nous considérons que notre travail ouvre la voie à plusieurs extensions :

1. Dans ce travail et en particulier dans l'étape Améliorer de la méthode Six Sigma, nous avons opté essentiellement pour une approche déterministe. Autrement dit nous n'avons pas vraiment considéré l'aspect probabiliste des décisions. Les facteurs et les critères considérés pour chacune des décisions peuvent pourtant être l'objet d'un comportement probabiliste. Il est donc intéressant d'introduire cet aspect probabiliste dans les démarches proposées. Vu la complexité et le nombre des facteurs et des critères intervenants, nous estimons que la simulation est une méthode qui devrait être introduire dans une démarche probabiliste.
2. Le poids d'un critère et la note d'une alternative vis-à-vis d'un critère et de façon générale l'utilité, sont des concepts importants dans ce travail de thèse et spécifiquement dans l'étape Améliorer de la méthode Six Sigma. Pour apprécier le poids d'un critère et la note

d'une alternative, il faut faire appel à différentes méthodes dans le domaine de la théorie multicritères. L'objectif de ce travail n'était pas d'analyser et de proposer une méthode d'appréciation parmi différentes méthodes existantes dans la littérature. Tout au long de ce travail dans différents exemples nous avons utilisé pour apprécier les poids de critères la méthode A.H.P. largement utilisée dans les contextes multicritères. Nous estimons intéressant d'étudier différentes méthodes d'appréciation et éventuellement de proposer des méthodes plus pertinentes pour déterminer les valeurs des poids, des notes et utilités.

3. Nous tenons également à rappeler que l'intégration des modèles de production, de transport, d'assemblage, de distribution est un aspect qui est rarement traité dans la littérature scientifique. Cet aspect est la pierre angulaire pour les problèmes d'optimisation globale dans la fonction production. Il importe donc de le considérer. Toutefois, il ne faut pas se limiter à proposer des modèles analytiques sans faire le lien avec la façon de les résoudre. En effet, la représentation de la réalité de façon fidèle (prise en compte de l'aspect dynamique, de l'incertitude, vision globale à travers l'intégration des modèles de production, distribution...) rend les modèles très complexes et très difficiles à résoudre avec les outils de résolution disponibles actuellement. Alors quels compromis choisir : des modèles simples et faciles à résoudre moyennant beaucoup d'hypothèses simplificatrices ou des modèles fidèles à la réalité et très compliqués ? La réponse à cette question demeure relative.
4. De même, pour l'étape contrôler l'utilisation de la carte EWMA, le filtrage des données est peut être supposé réalisé avant l'entrée des données dans le réseau. Il serait envisageable d'étudier la possibilité d'une carte de contrôle MEWMA modélisée par un réseau bayésien dynamique, permettant ainsi le filtrage des données directement dans le réseau.

En effet les réseaux bayésiens sont un outil prometteur dans le domaine de la surveillance des procédés complexes, une nouvelle voie très peu exploitée jusqu'à présent et qui mériterait d'être davantage approfondie dans l'avenir.



---

## Bibliographie

---

- [AFNOR 1988] AFNOR. : « Concepts fondamentaux de la gestion de production ». Technical Report X50{310, Agence française de normalisation, 1988.
- [AKROUT M. et al 2009] AKROUT M. MASMOUDI F. : « FONCTION ORDONNANCEMENT AU SEIN D'UN SYSTEME DE GESTION DE PRODUCTION ETUDE D'UN CAS », Lebanese Science Journal, Vol. 10, No. 1, 2009.
- [ANAES 2000] ANAES : « Agence Nationale d'Accréditation et d'Évaluation en Santé »
- [ANANDA J. et al 2005] ANANDA J. HERATH G. : « Analysis Evaluating public risk preferences in forest land-use choices using multi-attribute utility theory », Ecological Economics 55- 408– 419, 2005.
- [ANDRE. F.J et al 2007] ANDRE F J. CARDENETE MA. ROMERO C.: « Using compromise programming for macroeconomic policymaking in a general equilibrium framework: theory and application to the Spanish economy », Journal of the Operational Research Society 2007.
- [ANSARI M. 1999] ANSARI M. : « Les Mesures de Perception de la Qualité Totale dans les PMI : Résultats de Recherche », Revue internationale PME, vol, 12 n°4.
- [APICS 1992] APICS DICTIONARY. 7 th Edition. 1992.
- [AVRILLON L. et al 2002] AVRILLON L. PILLET M. : « Six sigma. Comparaison avec d'autres approches : Shainin », Journées Six Sigma de RUFEREQ (Réseau Universitaire Français pour l'Enseignement et la Recherche en Qualité), Cachan, France, 23 mai 2002.
- [AYADI D. et al 2008 c] AYADI D. AZZABI L. KOBI A. ROBLEDO C. CHABCHOUB H. BOUJELBENE Y. : « Pilotage des processus du système management de la qualité: une approche multicritère pour la prise de décision » conférence internationale Maîtrise et Management des Risques Industriels, M2RI 2008.
- [AYADI. D et al 2008 a] AYADI D. AZZABI L. KOBI A. ROBLEDO C. CHABCHOUB H. BOUJELBENE Y. : « Application des cartes de contrôle spécifiques pour la maîtrise statistique des procédés », International Metrology Conference CAFMET,(2008).
- [AYADI. D et al 2009] AYADI D. AZZABI L. KOBI A. ROBLEDO C. CHABCHOUB H.: « Hiérarchisation des risques des matières dangereuses : application de la méthode Macbeth » 8ème Congrès Qualité et Sécurité de Fonctionnement, QUALITA'2009.

- [AYADI. D et al 2010] **AYADI D. AZZABI L. KOBI A. ROBLEDO C. CHABCHOUB H.:** « Application de la méthode multicritère d'aide à la décision PROMETHEE pour le système HACCP », International Metrology Conference CAFMET, 2010.
- [AZZABI L. et al 2008 a] **AZZABI L. AYADI D. KOBI A. ROBLEDO C. BOUJELBENE Y. :** «Amélioration d'un système de production complexe: intégration de la méthode Six Sigma», International Metrology Conference CAFMET, 2008.
- [AZZABI L. et al 2008 b] **AZZABI L. AYADI D. KOBI A. ROBLEDO C. BOUJELBENE Y. :** « Une approche multicritère pour la localisation des défauts de production», conférence internationale Maîtrise et Management des Risques Industriels, M2RI, 2008.
- [AZZABI L. et al 2008 c] **AZZABI L. AYADI D. KOBI A. ROBLEDO C. BOUJELBENE Y.:** « Application of Six Sigma and Promethee Multicriteria method To Select the Product System», the international conference a quality and dependability, CCF 2008.
- [AZZABI L. et al 2009 a] **AZZABI L. AYADI D. KOBI A. ROBLEDO C. CHABCHOUB H. BOUJELBENE Y.** «Six Sigma based multicriteria approach to improve decision setting », Int. J. Quality Engineering and Technology, Vol. 1, No. 1, 2009.
- [AZZABI L. et al 2009 b] **AZZABI L. AYADI D. KOBI A. ROBLEDO C. BOUJELBENE Y.** «Application of Six Sigma and Promethee Multicriteria method To Select the Product System» Quality assurance , N° 58, Avril -juin 2009.
- [AZZABI L. et al 2010] **AZZABI L. AYADI D. KOBI A. ROBLEDO C. BOUJELBENE Y.** «Outils multicritère d'aide à la décision pour le diagnostic des procédés industriels », International Metrology Conference CAFMET, 2010.
- [AZZABI. L et al 2007 a] **AZZABI L. AYADI D. KOBI A. ROBLEDO C. CHABCHOUB H. BOUJELBENE Y.** « Improvement of human safety in the complex system integration of Six Sigma methods » 5th International Conference on Quality and Reliability, ICQR 2007.
- [AZZABI. L et al 2007 b] **AZZABI L. KOBI A. ROBLEDO C. MASMOUDI F. BOUJELBENE Y.** « Contribution a la performance d'un système intégration de la méthode six sigma et l'approche multicritère d'aide a la décision». 7ème Congrès International Pluridisciplinaire Qualité ET Sûreté de Fonctionnement, QUALITA'2007.
- [AZZABI. L et al 2008 d] **AZZABI L. AYADI D.KOBI A. ROBLEDO C. BOUJELBENE Y.:** « The method analytic hierarchies process for the search and selection

supplier», Ninth International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference, PSAM , 2008.

[**BACCOU BONNEVILLE C. 2007**] **BACCOU BONNEVILLE C. 2007**: « Le diagramme de cause et effets d'Ishikawa », Make IT strategic –blog notes en français, <http://makeitstrategic.com/index.php?blog=5>.

[**BANA E COSTA C. et al 2003**] **BANA E COSTA A. VANSNICK C.**: « MACBETH, London School of Economics», Dpt of Operational Research, Working paper 03-56, 2003.

[**BANA E COSTA. C.A et al 1999**] **BANA E COSTA. A et VANSNICK. J.C**: «The MACBETH approach: Basic ideas, software and an application, in Advances in Decision Analysis», Kluwer Academic Publishers, 1999.

[**BASSETT S. 2005**] **BASSETT S.** : « Contribution a la qualification et amélioration des moyens de production : application a une usine de recherche et production de semi conducteurs », Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers le 28 Juin 2005.

[**BAUER-KURZ I. 2000**] **BAUER-KURZ I.**: « A comparison of the Global-8D-Process and TRIZ», [www.trizjournal.com/archives/2000/07/c/](http://www.trizjournal.com/archives/2000/07/c/)

[**BAVENT P. 2001**] **BAVENT P.**: « SPC : bien identifier le besoin avant de choisir », progiciels de contrôle statistique, **MESURES 734** - AVRIL 2001.

[**BEN MENA S. 2005**] **BEN MENA S.** : « Introduction aux méthodes multicritères d'aide a la decision», biotechnol. agron. soc. environ., 2000 4 (2), pp. 83-93. <http://www.bib.fsagx.ac.be/library/base/text/v4n2/83.pdf> (consulte le 13/08/2005).

[**BERTALANFFY L. 1993**] **BERTALANFFY L.** : « Théorie générale des systèmes », 1993, Dunod.

[**BEUTHE M. et al 2000**] **BEUTHE M. EECKHOUDT L. SCANNELLA G.** : « A practical multicriteria methodology for assessing risky public investments», Socio-Economic Planning Sciences 34, 2000.

[**BIEBERP. et al 2001**] **BIEBER P. DEMOLOMBE R. EIZENBERG G. ZANON G.** : « Argumentation de sûreté de fonctionnement : analyse des documents existants, modèle d'argumentation et application à l'analyse d'un système ». Rapport technique final n°2/056666.01/DTIM, 2001.

[**BORDA J. 1784**] **BORDA J.** : «Mémoire sur les élections au scrutin». Dans «Mémoires de l'Académie Royale des Sciences», pp. 657–665. Imprimerie Royale, Paris, 1784. Présenté à l'Académie en 1770.

**[NURMI H.1987] NURMI H.:** «Comparing voting systems». D. Reidel, Dordrecht, Holland, 1987. ISBN 90-277-2600-0.

**[BOUYSSOU D. 1993]: BOUYSSOU D.:** «Décision Multicritère ou aide multicritère? », Newsletter of the European Working Group “Multicriteria Aid for Decisions”, Series 2, 2, Spring, 1-2. 1993.

**[BRANS JP. et al 1986] BRANS JP. VINCKE PH. MARESCHAL B.:** «How to select and how to rank projects: the PROMETHEE methods», European journal of operational research, 1986.

**[CAILLET R.2003] CAILLET R. :** «Analyse multicritère : études et comparaison des méthodes existantes en vue d’une application en analyse d’un cycle de vie », Série scientifique, Montréal.

**[CHARNES A. et al 1961] CHARNES A. COOPER W.:** «Management Models and Industrial Applications of Linear Programming». Wiley, New York, 1961.

**[CHELBI A. et al 2006] CHELBI A. BENNOUR M. ZERHOUNI N. :** «Contribution a la modélisation des approches de coopération en e-maintenance » , 6e Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation - MOSIM’06 - du 3 au 5 avril 2006 – Rabat- Maroc « Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes : Défis et Opportunités ».

**[CHIAVENATO I. 1983]CHIAVENATO I.:** « Introdução a teoria geral da administração», McGraw-hill do Brasil, Sao Paulo, 1983.

**[CHOVE J. 1992] CHOVE J. :** « La dernière avancé de l’école française de la qualité. Dans gérer et assurer la qualité ». tome1. 1992.

**[CHOW WS. et al 2001] CHOW W. S et LUI K. H:** «Discriminating Factors of Information Systems Function Performance in Hong Kong Firms Practicing TQM», International journal of operation and production management, Vol 21?N°5/6.

**[CLIVILLE V. et al 2006] : CLIVILLE V. BERRAH L. :** « Une approche multicritère pour l’aide a la sélection de portefeuilles de projets » 6e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation - MOSIM’06 - du 3 au 5 avril, 2006.

**[COHEN G. et al 1983] COHEN G. DUBOIS D. :** « Analyse du comportement périodique de systèmes de production par la théorie des dioïdes », Rapport de recherche INRIA, No. 191, 1983

**[COLSON G. et al 1989] COLSON G. DE BRUYN C.:** « Models and Methods in Multiple Objectives Decision Making».Models and Methods in Multiple Criteria Decision Making. Pergamon Press, Oxford, 1989.

- [CONDORCET 1785] **CONDORCET** : « Essai sur l'application de l'analyse à la probabilité des décisions rendues à la pluralité des voix ». Imprimerie Royale, Paris, 1785.
- [CONSULTING I. 2005] **CONSULTING I.** : [.http://www.idiagram.com](http://www.idiagram.com). (2005).
- [DEEB S. 2008] **DEEB S.** : « Contribution méthodologique à la maîtrise conjointe de la qualité d'un produit et de ses processus de production par une modélisation des concepts qualité », thèse Présentée pour l'obtention du titre de Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy I.
- [DEMING W. 1994] **DEMING W.** : « The New Economics for Industry, Education, Government ». 2nd ed. MIT Press, Cambridge, MA; 1994.
- [DEMING W. 1982] **DEMING W.** : « Out of the Crisis: Quality, Productivity and Competitive Position », Cambridge University Press, New York.
- [DEMRI A. et al 2007] **DEMRI A. CHARKI A. GUERIN F. KAHN P. CHRISTOFOL H.** : « Analyse Qualitative et Quantitative d'un Système Mécatronique », CPI'2007.
- [DUCLOS E. et al 1997] **DUCLOS E. PILLET M. COURTOIS A.** : « An Optimal Control Chart for non-Normal Processes IFAC Manufacturing Systems: Modeling, Management and Control », Fevrier Viennes – Autriche, 1997.
- [DURAND D. 1998] **DURAND D.** : « La systémique. Que sais-je?, 2nd édition », PUF. 1998.
- [ECKES G. 2005] **ECKES G.** : « Objectif 6  $\sigma$  », version 2005 – 1ère édition.
- [ECKES G. 2001] **ECKES G.** : « Objectif Six Sigma », Ed. Village Mondial, Paris, 2001.
- [EDWARDS W. 1971] **EDWARDS W.** : « Social utilities ». Engineering Economist, Summer Symposium Series 6, pp.119-129, 1971.
- [FEY R. et al 1981] **FEY R. GOGUE J.** : « La maîtrise de la Qualité », Ed. D'organisation, Paris, 1981.
- [FLAVELL R. 1976] **FLAVELL R.** : « A New Goal Programming Formulation ». Omega, N°4, 1976.
- [FLEURQUIN R. 1996] **FLEURQUIN R.** : « Proposition d'une démarche qualité logicielle pour les PME. Un modèle d'évaluation de la qualité et des critères et conseils permettant sa mise en œuvre à travers les outils et les méthodes ». Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France, 1996.
- [FOURNIER P. et al 1999] **FOURNIER P. MENARD J.** : « Gestion des approvisionnements et des stocks (Broché), Gaëtan Morin (13 septembre 1999).

- [GALLOU F. et al 1994] GALLOU F. BOUCHON M. : «Introduction à la Systémique », Hermès 1994.
- [GHOUILA A. 1962] GHOUILA A. : « caractéristique des matrices totalement unimodulaires ». C.R. A.Cad. Sci. Paris, 254, P.1192-1194,1962.
- [GILLES E. 2003] GILLES E.: « Diagramme de relations », Fiche technique, version du 03-04-15, Mise à jour le 03-07-22. <http://www.er.uqam.ca/nobel/k15303/DiagRel.Pdf>.
- [GLASSER W. 1992] GLASSER W.: « The Quality School», Harpercollins 1992.
- [GOGUE F. 1991] GOGUE F. : « La maîtrise de la qualité » ; Ed. Economica Paris, pp 28, 1991.
- [GOURET W. et al 2006] GOURET W. NOUVEL F. EL ZEIN G. : «Adaptation d'un système Courant Porteur en Ligne aux normes CEM automobile », 13e Colloque International sur la Compatibilité Électromagnétique (CEM'2006), St Malo, France, Avril 2006.
- [GOURET W. et al 2006 ] GOURET W. NOUVEL F. EL ZEIN G. : « Additional Network Using Automotive Powerline Communication », The 6e International Conference on ITS Telecommunications, Chengdu, Chine, Juin 2006.
- [GRANT D. et al 2006] GRANT D. HALL R. WAILES N. WRIGHT C.: «The false promise of technological determinism: the case of enterprise resource planning system». *New Technology, Work & Employment* 21 (1), pp. 2–15, 2006.
- [GUITOUNI A. et al 1999] GUITOUNI A. MARTEL J-M. VINCKE PH. : « Un Cadre de Référence pour le Choix d'une Procédure d'Agrégation Multicritère ». Document de travail, FSA-1999-013, Université Laval, Québec, Canada. 1999.
- [GUITOUNI A. 1998] GUITOUNI A. : «L'Ingénierie du Choix d'une Procédure d'Agrégation Multicritère ». Thèse de Doctorat, Université Laval, 1998.
- [GUITOUNI A. 1998] GUITOUNI A. : «L'Ingénierie du Choix d'une Procédure d'Agrégation Multicritère ». Thèse de Doctorat, Université Laval, 1998.
- [GUITOUNI A. 2000] GUITOUNI A. : « Méthodes Multicritère d'Aide à la Décision». Notes de cours MQT-60791, Université Laval, 2000.
- [HAMALIAN E. et al 1996] HAMALIAN E. SEGOT J.: « La démarche qualité 15 entreprises témoignent », AFNOR, Paris, p142, 1996.
- [HAMMAMI A. 2003] HAMMAMI A.: «Modélisation technico-économique d'une chaîne logistique dans une entreprise réseau », Thèse de doctorat spécialité Génie industrielle, L'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.

- [**HARRY M. et al 2000**] **HARRY M. SCHROEDER R.:** «Six Sigma – The Breakthrough Management Strategy», Doubleday, 2000.
- [**HARRY N. et al 2000**] **HARRY N.:** « Schroeder R., Six Sigma. The breakthrough management strategy revolutionizing the world's top corporations», Editions Currency Doubleday, 2000.
- [**HELLER I. et al 1956**] **HELLER I, TOMPKINS C.:** «An extension of a theorem of dantzig's, linear inequalities and related systems, Kuhn and tucker (eds) », Princeton University Press, P. 247-252, 1956.
- [**HENNET J. 2001 a**] **HENNET J.:** «A common cycle approach to lot scheduling in multistage manufacturing systems Production Planning and Control, Vol.12, N°4, pp.362-371, 2001.
- [**HENNET J. 2001 b**] **HENNET J.:** «Prévision et planification Gestion de production, fonctions, techniques et outils », Traité IC2 Information-Commande-Communication, Direction J. Erschler, B. Grabot, Hermes Science, 2001, Chapitre 5, pp.113-155.
- [**HENNET J. 1999**] **HENNET J.:** «From the Aggregate Plan to Lot-Sizing in Multi-Level Production Planning Modeling Manufacturing Systems». From aggregate planning to real-time control, P.Brandimarte, A.Villa Eds, Springer, 1999, pp.5-23, 1999.
- [**HENNET J. et al 1998**] **HENNET J. , GOMES D.:** « Multistage production control: an LMI approach», 5th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IMS'98), Gramado (Brésil), 9-11 Novembre 1998, pp.89-94.
- [**HILLIER F. et al. 2001**] **HILLIER F. LIEBERMAN G.:** «Introduction to Operations Research. McGraw-Hill, 7<sup>th</sup> Edition, New York, NY, 2001.
- [**HWANG C. et al 1981**] **HWANG C. et YOON K.:** «Multiple Attribute Decision Making: Methods and applications, a state of the art survey». Springer-Verlag, Berlin, 1981.
- [**IJIRI Y. 1965**] **IJIRI Y.:** «Management Goals and Accounting for Control». North Holland, Amsterdam , 1965.
- [**ISHIKAWA K. et al 1985**] **ISHIKAWA K . LU D. J.:** « What is Total Quality Control? The Japanese Way», Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1985.
- [**ISO 8402 1995**] **NORME NF EN ISO 8402.** « Management de la Qualité et assurance de la Qualité : Vocabulaire». Edition ISO, 1995.
- [**JAHANSHALOO G. et al 2008**] **JAHANSHALOO G. AFZALINEJAD M. :** «Goal programming in the context of the assignment problem and a computationally effective solution method», Applied Mathematics and Computation 200 -34–40, 2008.

[**JAUPI L. 2002**] **JAUPI L.** : « Contrôle de la qualité MSP Analyse des performances contrôle de réception », dunod, Paris, 2002.

[**JURAN J. 1995**] **JURAN J.** : «A History of Managing for Quality, The Evolution, Trends, and Future Direction of Managing Quality», milwaukee: ASQC Quality Press 1995,

[**KAPLAN R. et al 1992**] **KAPLAN R. NORTON D.** :« L’Evaluation Globale de la Performance : Outil de Motivation », Harvard d’expansion N°65 ,Été.

[**KAPLAN R. et al 2001**] **KAPLAN R. et NORTON D.** : « Comment utiliser le tableau de bord prospectif ». Éditions d’organisation, chapitres 2 et 3, pp 31-113.

[**KEENEY R . et al 1976**] : **KEENEY R. RAIFFA H.** : «Decisions with multiple objectives», John Wiley & Sons, 1976

[**KEPNER C. et al 1980**] **KEPNER C.TREGOE B.** : «Le manager rationnel. Méthodes d’analyse des problèmes et de prise de décision », Editions d’Organisation, Paris, 1980.

[**KETTANI O. et al 2004**] **KETTANI O. AOUNI B. MARTEL J.:** « The double role of the weight factor in the goal programming model», Computers & Operations Research 31-1833–1845, 2004.

[**LA JAUNE ET LA ROUGE 2001**] **LA JAUNE ET LA ROUGE.** : « La théorie des variations et la MSP » publié dans la revue « La Jaune et la Rouge » Revue des anciens élèves de l’École Polytechnique, Mars 2001.

[**LAMBUSSON A. 1988**] **LAMBUSSON A.** : «Vers la recherche de la qualité totale : une approche historique, des théories et une réalité concrète, Thèse de Doctorat en Ingénierie et Gestion, Ecole de Mines de Paris, Paris, 1988.

[**LAMPRECHT J. 2003**] **LAMPRECHT J.** : « Démystifier Six Sigma comment améliorer vos processus » version 2003 – 1ère édition.

[**LANDRY M. 1998**] **LANDRY M.** : « L’aide à la décision comme support à la construction du sens dans l’organisation. Systèmes d’Information et Management, 3(1) :5–39, 1998.

[**LARVET P. 1994**] **LARVET P.** : «Analyse des systèmes : de l’approche fonctionnelle à l’approche objet ». InterEditions. 1994.

[**LOPEZ R. 2006**] **LOPEZ R.** : « D’un système de management de la qualité basé sur l’amélioration à un système de management de la qualité basé sur les connaissances ». Thèse de doctorat de l’Institut National polytechnique de Grenoble, France, 2006.

[**MAIMI L. et al 2007**] **MAIMI L. GILLET GOINARD F.** : « toute la fonction production: savoir, savoir faire, savoir être ». Édition DUNOD 2007.

- [MARTEL J. 1998] MARTEL J .:** « Multicriteria analysis under uncertainty : The approach of outranking synthesis». Working Paper 1998-039, Faculté des Sciences de l'Administration, Université Laval, 1998.
- [MARTEL J. 1999] MARTEL J.:**« L'aide multicritère à la décision: méthodes et applications », cors - scro 1999 annual conference june 7-9, 1999 – windsor, ontario visit the conference home page at <http://www.cors.ca/windsor> please submit abstracts by april 1, 1999.
- [MAST J. 2004] MAST J.:** « A methodological comparison of three strategies for quality improvement», International Journal of Quality and Reliability Management, Vol. 21, No. 2, 2004.
- [MELLA P. 2009] MELLA P.:** « Application d'un plan d'expériences au contrôle de la rugosité », Science de l'ingénieur, [http://www.si.ens\\_cachan.fr/accueil\\_V2.php?page=affiche\\_ressource &id=155](http://www.si.ens_cachan.fr/accueil_V2.php?page=affiche_ressource&id=155).
- [MÉNDEZ M. et al 2006] MÉNDEZ M. GALVÁN B. , SALAZAR D. GREINER D. :** «Multiple-Objective Genetic Algorithm Using The Multiple Criteria Decision Making Method TOPSIS», MOPGP'06: 7th Int. Conf. on Multi-Objective Programming and Goal Programming, (2006).
- [MICHEAUX DL. 2000] MICHEAUX DL.:** « carte de contrôle multidimensionnelles », collège statistique du MFQ.
- [MONTCHAUD S. 2003] : MONTCHAUD S. :** «Les stratégies de développements des grands groupes industriels et l'émergence de start-up technologiques », centre d'économie et de finances internationales, octobre 2003.
- [MONTES. 2003] MONTES F J L.:** «Factors Affecting the Relationship between Total Quality Management and Organizational Performance», International journal of quality and reliability management, vol 20, N°21.
- [NF X 50 1992] NORME NF X 50-120. :** «Qualité, vocabulaire in gérer et assurer la qualité» tome 1. Edition AFNOR-paris, 1992.
- [NIOU E. 2001] NIOU E.:** «Strategic voting under plurality rule: When does it matter and who should vote strategically?» Journal of Theoretical Politics, vol. 13, no 2 : pp. 209–233, 2001.
- [NOUVEL F. et al 2005] NOUVEL F. GOURET W. EL ZEIN G. :**«High Data Rate Network In Automotive Over Battery Power Lines»,The 5e International Conference on ITS Telecommunications, Brest, France, Juin 2005.

- [NURMI H.1999] NURMI H.: « Hannu. Voting paradoxes and how to deal with them». Springer, Berlin, 1999. ISBN 3-540-43352-X. 85.
- [OFFMAN A. et al 1956] OFFMAN A. KRUSKAL.: « Integral boundray points of complex polyhedra, linear inequalities and related systems, Kuhn and tucker (eds) », Princeton University Press, P.233-246,1956.
- [OGRYCZAK W. 2001] OGRYCZAK W.: «On goal programming formulations of the reference point method », Journal of the Operational Research Society, 52, p. 691-698, 2001.
- [PAGES E. 1954] PAGES E. « Continuous Inspection Schemes », Biometrika, Vol. 41, pp. 100-114, 1954.
- [PANDE P. et al 2000] PANDE P. NEUMANN R. CAVANAGH R.: « The six sigma way», Mc Graw-Hill, New York, 2000.
- [Patrick B. 2004] Patrick B. :« Paradoxes de vote et modes de scrutin en France », 2004 [http://www.personal.lse.ac.uk/.../Paradoxes\\_de\\_vote\\_en\\_France\\_v-ecran.pdf](http://www.personal.lse.ac.uk/.../Paradoxes_de_vote_en_France_v-ecran.pdf).
- [PHILLIPS A. et al 1997] PHILLIPS A. JEFFRIES R. SCHNEIDER J. FRANKOSKI S.: «Using Repeatbility and Reproductibility studies to evaluate a destructive test method », Quality Engineering , Vol. 10, N° 2, 1997.
- [PILLET M. 2002] PILLET M. « Appliquer la maîtrise statistique des procédés (MSP/SPC)», Ed. d'Organisation, 2002.
- [PILLET M. 2004] PILLET M. : « Six Sigma : Comment l'appliquer », Editions d'organisation, 2004.
- [PILLET M. 2005] PILLET M. : « Appliquer la maîtrise statistique des processus MSP/SPC Editions d'Organisation », 4e édition, 16/06/2005.
- [PIZDEK T. 2001] PIZDEK T.: « The Six Sigma Handbook», Editions Quality Publishing, 2001.
- [PIZDEK T. 2001] PIZDEK T.: « The Six Sigma Handbook», Editions Quality Publishing, 2001.
- [POINT G. 2000] POINT G. : « Contribution à l'unification des méthodes formelles et de la sûreté de fonctionnement », Thèse de l'Université de Bordeaux I, 2000
- [POMEROL J. et al 1993] POMEROL J. et SERGIO B.: « Choix multicritère dans l'entreprise », Editions Hermès, Paris, 1993.
- [POOLE D. 1992] POOLE D.: « Decision-theoretic defaults». In Proceedings of the Ninth Biennial Conference of the Canadian Society for Computational Studies of Intelligence, pages 190–197. Morgan Kaufmann, San Francisco, 1992.

- [PROTH J. et al 1987] PROTH J. CAVAILLE B. : « Pratique de la simulation de production discontinue », Éditions Siprodis, 1987.
- [QUALITE ONLINE 2007] QUALITE ONLINE : « Dossier thématique : Le 6 Sigma » - Page 3 sur [www.qualiteonline.com](http://www.qualiteonline.com).
- [REEVES C. et al 1994] REEVES C. et BEDNAR D.: «Defining quality. Alternatives and implications». Academy of Management Review, Vol 19(3), pp. 419-445, 1994.
- [ROBERTS S. 1959] ROBERTS S.: «Control chart tests based on geometric moving averages», Technometrics, Vol.1, pp. 239-250, 1959.
- [ROGER G . et al 2008] ROGER G . KEVIN L. CHARLES L. ADRIAN S.: « Six Sigma: Definition and underlying theory», Journal of Operations Management 26 (2008) 536–554.
- [ROY B. 1970] ROY B. : « Algèbre moderne et théorie des graphes », volume 2. Ed. Dunod, 1970.
- [ROY B. 1985] ROY B. : «Méthodologie multicritère d'aide à la décision ». Economica, Paris, 1985.
- [ROY B. et al 1996] ROY B. Et MOUSSEAU V. : «A theoretical framework for analysing the notion of relative importance of criteria », Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 5, p. 145-159, 1996.
- [ROY B. 1974] ROY B. : « Critères Multiples et modélisation des préférences (l'apport des relations de surclassement) ». Revue d'Economie Politique, tome 84, N°1, p. 1-44, janvier 1974.
- [ROY B. 1988] ROY B. : «Des critères multiples en recherche opérationnelle : Pourquoi ? In Rand », editor Operational Research '87, pages 829–842. North-Holland, Amsterdam, 1988.
- [ROY B. 1992] ROY B. : «Science de la décision ou science de l'aide à la décision ». Revue Internationale de Systémique, 6(5) :497–529, 1992.
- [SAATY T. 2007] SAATY T. « Time dependent decision-making; dynamic priorities in the AHP/ANP: Generalizing from points to functions and from real to complex variables», Mathematical and Computer Modelling 46 -860–891, 2007.
- [SAATY T. 2003] SAATY T.: «Decision-making with the AHP: Why is the principal Eigenvector necessary», European Journal of Operational Research 145 -85–91, 2003.
- [SAHOOA A. et al 2008] SAHOOA A. TIWARIB M. et MILEHAMC A. : « Six Sigma based approach to optimize radial forging operation variables», journal of materials processing technology 202 (2008) 125–136.

- [**SANDERS D. et al 2000**] **SANDERS D., HILD C.**: «A discussion of strategies for Six Sigma Implementation», *Quality Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 303-309, 2000.
- [**SEVERIN P. 2009**] **SEVERIN P.**: « L'analyse fonctionnelle, de la méthode aux outils », *Biotechnologies Santé Environnement*, 2009.
- [**SHAININ P. 1993b**] **SHAININ P.**: « Managing Quality Improvement», 47th Annual Quality Congress, May1993, Boston MA, Vol. 0, No. O, pp 554-560, May1993.
- [**SHAININ R. 1993a**] **SHAININ R.**: «Strategies for Technical Problem Solving», *Quality Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp 433-448, January 1993.
- [**SIMON H. 1991**] **SIMON H.**: «Sciences des systèmes, science de l'artificiel». Dunod 1991.
- [**STEWART S. and al 1991**] **STEWART.S et WHITE.C**: « Multiobjective A\*», *Journal of the ACM*, 38(4):775–814, October 1991.
- [**STOUBOS Z. 2002**] **STOUBOS Z.**: « Process capability indices: overview and extensions », *Nonlinear Analysis:Real world applications*, Vol. 3, 2002.
- [**TAYEB L. et al 2008**] **TAYEB L. FRANCIS-LUC P.** : «Créativité et innovation - L'intelligence collective au service du management de projet », Editeur ppur, 2008.
- [**TIMMERMAN E. 1986**] **TIMMERMAN E.**: «An approach to Vendor Performance Evaluation». *Journal of Purchasing and Materials Management*, winter 1986.
- [**TIPLICA T. 2002**] **TIPLICA T.** : « Contributions a la maîtrise statistique des processus industriels multi varies », Institut des Sciences et Techniques de l'Ingenieurs d'Angers, 2002.
- [**TIPLICA T. et al. 2001**] **TIPLICA T. KOBI A. BARREAU. A. BACIVAROV I.** : «Synthèse et comparaison des méthodes pour la maîtrise statistique des processus multivariés », *QUALITA 2001*, 22-23 Mars, Annecy France.
- [**TODOROV B. 1994**] **TODOROV B.** : « ISO 9000- Un passeport mondial pour le management de la qualité », Gaétan Morin éditeur, Paris 2ème édition, 1994.
- [**VERRON S. 2007**] **VERRON S.** : « Diagnostic et surveillance des processus complexes par réseaux bayésiens », thèse de doctorat spécialité : sciences de l'ingénieur école doctorale d'Angers présentée et soutenue publiquement le 13 décembre 2007.
- [**VILLEMUS P. 2001**] **VILLEMUS P.** : «L'entreprise audacieuse à la conquête des marchés de demain », Edition d'organisation 2001.
- [**VINCKE P. 1994**] **VINCKE P.** : « A short note on a methodology for choosing a decision-aid method». *Rapport Technique 94/07*, Université Libre de Bruxelles, Faculté des Sciences Appliquées, May, 1994.

[VINCKE. P 1989] VINCKE P. : « L'aide multicritère à la décision ». Édition Ellipses, 1989.

[VOOGD H. 1983] VOOGD H. : «Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning», Pion Ltd, London, 1983.

[WIKIPEDIA 2009 a] : « Histogramme », WIKIPEDIA, l'encyclopédie libre, 2009 Dernière modification le 8 décembre 2009, <http://fr.wikipedia.org/wiki/Histogramme>.

[WIKIPEDIA 2009 b] : « Analyse des modes de défaillances leurs effets leurs criticités », WIKIPEDIA, l'encyclopédie libre, (2009) Dernière modification de cette page le 22 décembre

2009 [http://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse\\_des\\_modes\\_de\\_d%C3%A9faillance,\\_de\\_leurs\\_effets\\_et\\_de\\_leur\\_criticit%C3%A9](http://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse_des_modes_de_d%C3%A9faillance,_de_leurs_effets_et_de_leur_criticit%C3%A9).

[YANG J. et al 1996] YANG J. SEN. P: « Preference modelling by estimating local utility functions for multi-objective optimization », European Journal of Operational Research, 95, p. 115-138, 1996.

[ZELENY M. 1973] ZELENY M.: «Compromise programming», In: Cochrane JL and Zeleny M (eds). Multiple Criteria Decision Making. University of South Carolina Press: Columbia, pp 262–301.

[ZELENY M. 1982] ZELENY M.: « Multiple criteria decision making », Mc Graw-Hill, New-York, 1982. <http://www.has-sante.fr/portail/upload/docs/application/pdf/2009-10/methodes.pdf>.

#### **LES LOGICIELS ET PROGICIELS:**

-Statistica software version 8 (<http://www.statsoft.fr/V8list.htm> version d'évaluation)

- Optimum software version 2004 ([http://www.tdc.fr/en/products/tdc\\_fmea.php](http://www.tdc.fr/en/products/tdc_fmea.php))

- Expert Choice version 11.5 (<http://www.expertchoice.com/download/Default.htm> version d'évaluation)

-Progiciel LINGO version 10 (<http://www.ritme.com/fr/demos/accueil.html>)

-Microsoft Visual C++ version 6.0

-MACBETH software (<http://www.umh.ac.be/~smq/> version d'évaluation)

-MINITAB version 15

[http://www.minitab.com/fr-FR/default.aspx?WT.srch=1&WT.mc\\_id=SEFR000](http://www.minitab.com/fr-FR/default.aspx?WT.srch=1&WT.mc_id=SEFR000)



## Annexe 1

Tableau : prélèvement de l'étude de stabilité

Test de normalité de Shapiro-Wilk (pour $3 \leq N \leq 500$ )				
Index (i)	Data	Sorted	mi	ai
1	1,36	1,33	-2,0403	-0,4167
2	1,45	1,33	-1,6098	-0,3003
3	1,43	1,335	-1,3609	-0,2506
4	1,33	1,35	-1,1758	-0,2165
5	1,38	1,36	-1,0241	-0,1886
6	1,38	1,36	-0,8929	-0,1644
7	1,44	1,36	-0,7755	-0,1428
8	1,46	1,37	-0,6680	-0,1230
9	1,35	1,38	-0,5677	-0,1045
10	1,39	1,38	-0,4728	-0,0871
11	1,37	1,39	-0,3820	-0,0703
12	1,43	1,4	-0,2942	-0,0542
13	1,4	1,4	-0,2087	-0,0384
14	1,43	1,41	-0,1246	-0,0229
15	1,33	1,41	-0,0414	-0,0076
16	1,36	1,41	0,0414	0,0076
17	1,45	1,41	0,1246	0,0229
18	1,43	1,42	0,2087	0,0384
19	1,335	1,42	0,2942	0,0542
20	1,36	1,42	0,3820	0,0703
21	1,45	1,43	0,4728	0,0871
22	1,42	1,43	0,5677	0,1045
23	1,41	1,43	0,6680	0,1230
24	1,4	1,43	0,7755	0,1428
25	1,41	1,44	0,8929	0,1644
26	1,42	1,45	1,0241	0,1886
27	1,42	1,45	1,1758	0,2165
28	1,41	1,45	1,3609	0,2506
29	1,45	1,45	1,6098	0,3003
30	1,41	1,46	2,0403	0,4167

---

**Annexe 2**

---

**Tableau : prélèvement de carte de contrôle individuel**

1,42	1,42	1,42	1,42	1,41
1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
1,42	1,42	1,42	1,41	1,42
1,42	1,42	1,42	1,41	1,42
1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
1,37	1,37	1,42	1,42	1,42
1,41	1,41	1,37	1,41	1,37
1,42	1,42	1,41	1,42	1,41
1,41	1,41	1,42	1,41	1,42
1,42	1,42	1,41	1,35	1,41
1,42	1,42	1,42	1,41	1,42
1,41	1,41	1,42	1,42	1,42
1,42	1,42	1,41	1,41	1,41
1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
1,41	1,41	1,42	1,42	1,42
1,42	1,42	1,41	1,41	1,41
1,30	1,30	1,42	1,42	1,42
1,41	1,41	1,30	1,41	1,30
1,42	1,42	1,41	1,35	1,41
1,45	1,45	1,42	1,41	1,42

---

## Annexe 3

---

**Tableau des prélèvements avant l'application de Six Sigma (date :05/01 /2009)**

<b>1,41</b>	<b>1,41</b>	<b>1,43</b>	<b>1,41</b>	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
1,41	1,46	1,41	1,41	1,43	1,32	1,42	1,43	1,43	1,32
1,42	1,42	1,41	1,42	1,43	1,43	1,42	1,43	1,43	1,43
1,42	1,42	1,42	1,42	1,41	1,43	1,43	1,41	1,41	1,43
1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,43	1,42	1,42	1,42	1,43
1,43	1,32	1,42	1,43	1,42	1,41	1,42	1,42	1,42	1,41
1,43	1,41	1,43	1,43	1,41	1,46	1,41	1,41	1,41	1,46
1,43	1,41	1,43	1,43	1,42	1,42	1,41	1,42	1,42	1,42
1,43	1,42	1,41	1,43	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
1,41	1,42	1,41	1,41	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
1,43	1,42	1,42	1,43	1,43	1,32	1,42	1,43	1,43	1,32
1,43	1,43	1,42	1,43	1,43	1,41	1,43	1,43	1,43	1,41
1,43	1,43	1,42	1,43	1,41	1,46	1,41	1,41	1,41	1,46
1,41	1,43	1,43	1,41	1,42	1,43	1,42	1,42	1,42	1,43
1,41	1,43	1,43	1,41	1,42	1,41	1,42	1,42	1,42	1,41
1,41	1,41	1,41	1,41	1,43	1,42	1,42	1,43	1,42	1,42
1,42	1,43	1,41	1,42	1,43	1,43	1,42	1,43	1,43	1,42
1,42	1,43	1,42	1,47	1,43	1,43	1,42	1,43	1,43	1,42
1,42	1,43	1,42	1,42	1,41	1,43	1,43	1,41	1,43	1,43
1,42	1,41	1,42	1,42	1,41	1,43	1,43	1,41	1,43	1,43

---

## Annexe 4

---

### Liste des abréviations

X11	X1
X12	X2
X13	X3
X14	X4
X15	X5
X21	Y1
X22	Y2
X23	Y3
X24	Y4
X25	Y5
X31	Z1
X32	Z2
X33	Z3
X34	Z4
X35	Z5
X41	W1
X42	W2
X43	W3
X44	W4
X45	W5
X51	T1
X52	T2
X53	T3
X54	T4
X55	T5

```

!*****
! Objective function: M1:Middle
!*****
**;
```

MAX

$$=1*X1+0.30*X2+0.20*X3+0.20*X4+0.60*X5+0.20*Y1+1*Y2+0.40*Y3+0.40*Y4+0.70*Y5+0.20*Z1+0.20*Z2+1*Z3+0.30*Z4+0.70*Z5+0.20*W1+0.50*W2+0.40*W3+1*W4+0.60*W5+0.30*T1+0.40*T2+0.60*T3+0.40*T4+1*T5;$$

```

!*****
! Anteriority constraints
!*****
**;
```

$$X1+X2+X3+X4+X5+Y1+Y2+Y3+Y4+Y5+Z1+Z2+Z3+Z4+Z5+W1+W2+W3+W4+W5+T1+T2+T3+T4+T5=5;$$

$$X1+X2+X3+X4+X5+Y1+Y2+Y3+Y3+Y4+Y5+Z1+Z2+Z3+Z4+Z5+W1+W2+W3+W4+W5+T1+T2+T3+T4+T5 \leq 5;$$

```

!*****
! Data constraints (General variables)
!*****

```

```

@BIN (X1);
@BIN (X2);
@BIN (X3);
@BIN (X4);
@BIN (X5);
@BIN (Y1);
@BIN (Y2);
@BIN (Y3);
@BIN (Y4);
@BIN (Y5);
@BIN (Z1);
@BIN (Z2);
@BIN (Z3);
@BIN (Z4);
@BIN (Z5);
@BIN (W1);
@BIN (W2);
@BIN (W3);
@BIN (W4);
@BIN (W5);
@BIN (T1);
@BIN (T2);
@BIN (T3);
@BIN (T4);
@BIN (T5);
end

```

Le rapport de résolution généré par LINGO10.0 est le suivant :

Global optimal solution found.

Objective value:	5.000000
Extended solver steps:	0
Total solver iterations:	0

Variable	Value	Reduced Cost
X1	1.000000	-1.000000
X2	0.000000	-0.3000000
X3	0.000000	-0.2000000
X4	0.000000	-0.2000000
X5	0.000000	-0.6000000
Y1	0.000000	-0.2000000
Y2	1.000000	-1.000000
Y3	0.000000	-0.4000000
Y4	0.000000	-0.4000000
Y5	0.000000	-0.7000000
Z1	0.000000	-0.2000000
Z2	0.000000	-0.2000000
Z3	1.000000	-1.000000
Z4	0.000000	-0.3000000
Z5	0.000000	-0.7000000
W1	0.000000	-0.2000000
W2	0.000000	-0.5000000
W3	0.000000	-0.4000000
W4	1.000000	-1.000000
W5	0.000000	-0.6000000
T1	0.000000	-0.3000000
T2	0.000000	-0.4000000
T3	0.000000	-0.6000000
T4	0.000000	-0.4000000
T5	1.000000	-1.000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	5.000000	1.000000
2	0.000000	0.000000
3	0.000000	0.000000

```
!*****
**
```

**! Objective function: M2 : Equipment**

```
!*****
**;
```

MAX

=1\*X1+0.50\*X2+0.60\*X3+0.70\*X4+0.80\*X5+0.80\*Y1+1\*Y2+0.50\*Y3+0.30\*Y4+0.20\*Y5+  
0.40\*Z1+0.50\*Z2+1\*Z3+0.50\*Z4+0.70\*Z5+0.40\*W1+0.50\*W2+0.30\*W3+1\*W4+0.80\*W5+0  
.50\*T1+0.40\*T2+0.60\*T3+0.30\*T4+1\*T5;

```
!*****
**
```

**! Anteriority constraints**

```
!*****
**;
```

X1+X2+X3+X4+X5+Y1+Y2+Y3+Y4+Y5+Z1+Z2+Z3+Z4+Z5+W1+W2+W3+W4+W5+T1+T2+T3+T4+T5=  
5;

X1+X2+X3+X4+X5+Y1+Y2+Y3+Y3+Y4+Y5+Z1+Z2+Z3+Z4+Z5+W1+W2+W3+W4+W5+T1+T2+T3+T4+  
T5<=5;

```
!*****
**
```

**! Data constraints (General variables)**

```
!*****
```

```
**; @BIN (X1);
```

```
@BIN (X2);
```

```
@BIN (X3);
```

```
@BIN (X4);
```

```
@BIN (X5);
```

```
@BIN (Y1);
```

```
@BIN (Y2);
```

```
@BIN (Y3);
```

```
@BIN (Y4);
```

```
@BIN (Y5);
```

```
@BIN (Z1);
```

```
@BIN (Z2);
```

```
@BIN (Z3);
```

```
@BIN (Z4);
```

```
@BIN (Z5);
```

```
@BIN (W1);
```

```
@BIN (W2);
```

```
@BIN (W3);
```

```
@BIN (W4);
```

```
@BIN (W5);
```

```
@BIN (T1);
```

```
@BIN (T2);
```

```
@BIN (T3);
```

```
@BIN (T4);
```

```
@BIN (T5);
```

```
end
```

Le rapport de résolution généré par LINGO10.0 est le suivant :

Global optimal solution found.

Objective value:	5.000000
Extended solver steps:	0
Total solver iterations:	0

Variable	Value	Reduced Cost
X1	1.000000	-1.000000
X2	0.000000	-0.500000
X3	0.000000	-0.600000
X4	0.000000	-0.700000
X5	0.000000	-0.800000
Y1	0.000000	-0.800000
Y2	1.000000	-1.000000
Y3	0.000000	-0.500000
Y4	0.000000	-0.300000
Y5	0.000000	-0.200000
Z1	0.000000	-0.400000
Z2	0.000000	-0.500000
Z3	1.000000	-1.000000
Z4	0.000000	-0.500000
Z5	0.000000	-0.700000
W1	0.000000	-0.400000
W2	0.000000	-0.500000
W3	0.000000	-0.300000
W4	1.000000	-1.000000
W5	0.000000	-0.800000
T1	0.000000	-0.500000
T2	0.000000	-0.400000

T3	0.000000	-0.600000	
		T4	0.000000
		T5	1.000000
		Row	Slack or Surplus
		1	5.000000
		2	0.000000
		3	0.000000
			Dual Price
			1.000000
			0.000000
			0.000000

!\*\*\*\*\*  
\*\*

### ! Objective function: M3 :Methods

!\*\*\*\*\*

\*\*;

MAX

=1\*X1+0.60\*X2+0.30\*X3+0.80\*X4+0.40\*X5+0.2\*Y1+1\*Y2+0.70\*Y3+0.50\*Y4+0.60\*Y5+0.50\*Z1+0.80\*Z2+1\*Z3+0.60\*Z4+0.40\*Z5+0.20\*W1+0.50\*W2+0.80\*W3+1\*W4+0.40\*W5+0.25\*T1+0.50\*T2+0.70\*T3+0.60\*T4+1\*T5;

!\*\*\*\*\*  
\*\*

### ! Anteriority constraints

!\*\*\*\*\*

\*\*;

X1+X2+X3+X4+X5+Y1+Y2+Y3+Y4+Y5+Z1+Z2+Z3+Z4+Z5+W1+W2+W3+W4+W5+T1+T2+T3+T4+T5=5;

---

$X1+X2+X3+X4+X5+Y1+Y2+Y3+Y3+Y4+Y5+Z1+Z2+Z3+Z4+Z5+W1+W2+W3+W4+W5+T1+T2+T3+T4+T5 \leq 5;$

```
!*****  
**
```

**! Data constraints (General variables)**

```
!*****  
**; @BIN (X1);  
@BIN (X2);  
@BIN (X3);  
@BIN (X4);  
@BIN (X5);  
@BIN (Y1);  
@BIN (Y2);  
@BIN (Y3);  
@BIN (Y4);  
@BIN (Y5);  
@BIN (Z1);  
@BIN (Z2);  
@BIN (Z3);  
@BIN (Z4);  
@BIN (Z5);  
@BIN (W1);  
@BIN (W2);  
@BIN (W3);  
@BIN (W4);  
@BIN (W5);  
@BIN (T1);  
@BIN (T2);  
@BIN (T3);  
@BIN (T4);  
@BIN (T5);  
end
```

Le rapport de résolution généré par LINGO10.0 est le suivant :

Global optimal solution found.			
Objective value:			5.000000
Extended solver steps:			0
Total solver iterations:			0
	Variable	Value	Reduced Cost
	X1	1.000000	-1.000000
	X2	0.000000	-0.600000
	X3	0.000000	-0.300000
	X4	0.000000	-0.800000
	X5	0.000000	-0.400000
	Y1	0.000000	-0.200000
	Y2	1.000000	-1.000000
	Y3	0.000000	-0.700000
	Y4	0.000000	-0.500000
	Y5	0.000000	-0.600000
	Z1	0.000000	-0.500000
	Z2	0.000000	-0.800000
	Z3	1.000000	-1.000000
	Z4	0.000000	-0.600000
	Z5	0.000000	-0.400000
	W1	0.000000	-0.200000
	W2	0.000000	-0.500000
	W3	0.000000	-0.800000
	W4	1.000000	-1.000000
	W5	0.000000	-0.400000
	T1	0.000000	-0.250000
	T2	0.000000	-0.500000
	T3	0.000000	-0.700000
	T4	0.000000	-0.600000
	T5	1.000000	-1.000000
	Row	Slack or Surplus	Dual Price
	1	5.000000	1.000000
	2	0.000000	0.000000
	3	0.000000	0.000000

\*\*\*\*\*  
\*\*

**! Objective function: M4 :Labor**

\*\*\*\*\*  
\*\*;

**MAX**

=1\*X1+0.40\*X2+0.36\*X3+0.45\*X4+0.80\*X5+0.45\*Y1+1\*Y2+0.75\*Y3+0.65\*Y4+0.25\*Y5+  
0.45\*Z1+0.65\*Z2+1\*Z3+0.70\*Z4+0.80\*Z5+0.20\*W1+0.50\*W2+0.70\*W3+1\*W4+0.45\*W5+0.  
.25\*T1+0.75\*T2+0.80\*T3+0.45\*T4+1\*T5;

\*\*\*\*\*  
\*\*

**! Anteriority constraints**

\*\*\*\*\*  
\*\*;

X1+X2+X3+X4+X5+Y1+Y2+Y3+Y4+Y5+Z1+Z2+Z3+Z4+Z5+W1+W2+W3+W4+W5+T1+T2+T3+T4+T5=  
5;

X1+X2+X3+X4+X5+Y1+Y2+Y3+Y3+Y4+Y5+Z1+Z2+Z3+Z4+Z5+W1+W2+W3+W4+W5+T1+T2+T3+T4+T5<=5;

!\*\*\*\*\*  
\*\*

! Data constraints (General variables)

!\*\*\*\*\*  
\*\*;

```
@BIN (X1) ;  
@BIN (X2) ;  
@BIN (X3) ;  
@BIN (X4) ;  
@BIN (X5) ;  
@BIN (Y1) ;  
@BIN (Y2) ;  
@BIN (Y3) ;  
@BIN (Y4) ;  
@BIN (Y5) ;  
@BIN (Z1) ;  
@BIN (Z2) ;  
@BIN (Z3) ;  
@BIN (Z4) ;  
@BIN (Z5) ;  
@BIN (W1) ;  
@BIN (W2) ;  
@BIN (W3) ;  
@BIN (W4) ;  
@BIN (W5) ;  
@BIN (T1) ;  
@BIN (T2) ;  
@BIN (T3) ;  
@BIN (T4) ;  
@BIN (T5) ;  
end
```

Le rapport de résolution généré par LINGO10.0 est le suivant :

Global optimal solution found.		
Objective value:		5.000000
Extended solver steps:		0
Total solver iterations:		0
Variable	Value	Reduced Cost
X1	1.000000	-1.000000
X2	0.000000	-0.4000000
X3	0.000000	-0.3600000
X4	0.000000	-0.4500000
X5	0.000000	-0.8000000
Y1	0.000000	-0.4500000
Y2	1.000000	-1.000000
Y3	0.000000	-0.7500000
Y4	0.000000	-0.6500000
Y5	0.000000	-0.2500000
Z1	0.000000	-0.4500000
Z2	0.000000	-0.6500000
Z3	1.000000	-1.000000
Z4	0.000000	-0.7000000
Z5	0.000000	-0.8000000
W1	0.000000	-0.2000000
W2	0.000000	-0.5000000
W3	0.000000	-0.7000000
W4	1.000000	-1.000000
W5	0.000000	-0.4500000
T1	0.000000	-0.2500000
T2	0.000000	-0.7500000
T3	0.000000	-0.8000000
T4	0.000000	-0.4500000
T5	1.000000	-1.000000
Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	5.000000	1.000000
2	0.000000	0.000000
3	0.000000	0.000000

!\*\*\*\*\*  
\*\*

! Objective function: M5 :Material

!\*\*\*\*\*  
\*\*;

MAX

=1\*X1+0.45\*X2+0.45\*X3+0.55\*X4+0.70\*X5+0.55\*Y1+1\*Y2+0.45\*Y3+0.45\*Y4+0.55\*Y5+  
0.45\*Z1+0.65\*Z2+1\*Z3+0.70\*Z4+0.80\*Z5+0.80\*W1+0.50\*W2+0.60\*W3+1\*W4+0.50\*W5+0  
.25\*T1+0.75\*T2+0.87\*T3+0.55\*T4+1\*T5;

!\*\*\*\*\*  
\*\*

! Anteriority constraints

!\*\*\*\*\*  
\*\*;

X1+X2+X3+X4+X5+Y1+Y2+Y3+Y4+Y5+Z1+Z2+Z3+Z4+Z5+W1+W2+W3+W4+W5+T1+T2+T3+T4+T5=  
5;

X1+X2+X3+X4+X5+Y1+Y2+Y3+Y3+Y4+Y5+Z1+Z2+Z3+Z4+Z5+W1+W2+W3+W4+W5+T1+T2+T3+T4+  
T5<=5;

```
@BIN (X1) ;  
@BIN (X2) ;  
@BIN (X3) ;  
@BIN (X4) ;  
@BIN (X5) ;  
@BIN (Y1) ;  
@BIN (Y2) ;  
@BIN (Y3) ;  
@BIN (Y4) ;  
@BIN (Y5) ;  
@BIN (Z1) ;  
@BIN (Z2) ;  
@BIN (Z3) ;  
@BIN (Z4) ;  
@BIN (Z5) ;  
@BIN (W1) ;  
@BIN (W2) ;  
@BIN (W3) ;  
@BIN (W4) ;  
@BIN (W5) ;  
@BIN (T1) ;  
@BIN (T2) ;  
@BIN (T3) ;  
@BIN (T4) ;  
@BIN (T5) ;  
end
```

Le rapport de résolution généré par LINGO10.0 est le suivant :

Global optimal solution found.

Objective value:	5.000000
Extended solver steps:	0
Total solver iterations:	0

Variable	Value	Reduced Cost
X1	1.000000	-1.000000
X2	0.000000	-0.4500000
X3	0.000000	-0.4500000
X4	0.000000	-0.5500000
X5	0.000000	-0.7000000
Y1	0.000000	-0.5500000
Y2	1.000000	-1.000000
Y3	0.000000	-0.4500000
Y4	0.000000	-0.4500000
Y5	0.000000	-0.5500000
Z1	0.000000	-0.4500000
Z2	0.000000	-0.6500000
Z3	1.000000	-1.000000
Z4	0.000000	-0.7000000
Z5	0.000000	-0.8000000
W1	0.000000	-0.8000000
W2	0.000000	-0.5000000
W3	0.000000	-0.6000000
W4	1.000000	-1.000000
W5	0.000000	-0.5000000
T1	0.000000	-0.2500000
T2	0.000000	-0.7500000
T3	0.000000	-0.8700000
T4	0.000000	-0.5500000
T5	1.000000	-1.000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	5.000000	1.000000
2	0.000000	0.000000
3	0.000000	0.000000



```

Microsoft Visual C++ - [demarche_Integre.cpp]
File Edit View Insert Project Build Tools Window Help
}
void main()
{
    int i,j;
    int A[5][5], B[5][5];
    float M1[5][5], M2[5][5], M3[5][5], M4[5][5], M5[5][5], MatTot[5][5];
    int n,m;

    puts("\n");
    puts("\t/*****^n");
    puts("\t/*                                     *^n");
    puts("\t/*           Programme d'execution de demarche integree           *^n");
    puts("\t/*                               Lotfi AZZABI                               *^n");
    puts("\t/*                                     *^n");
    puts("\t/*****^n");

    n=5;
    m=5;

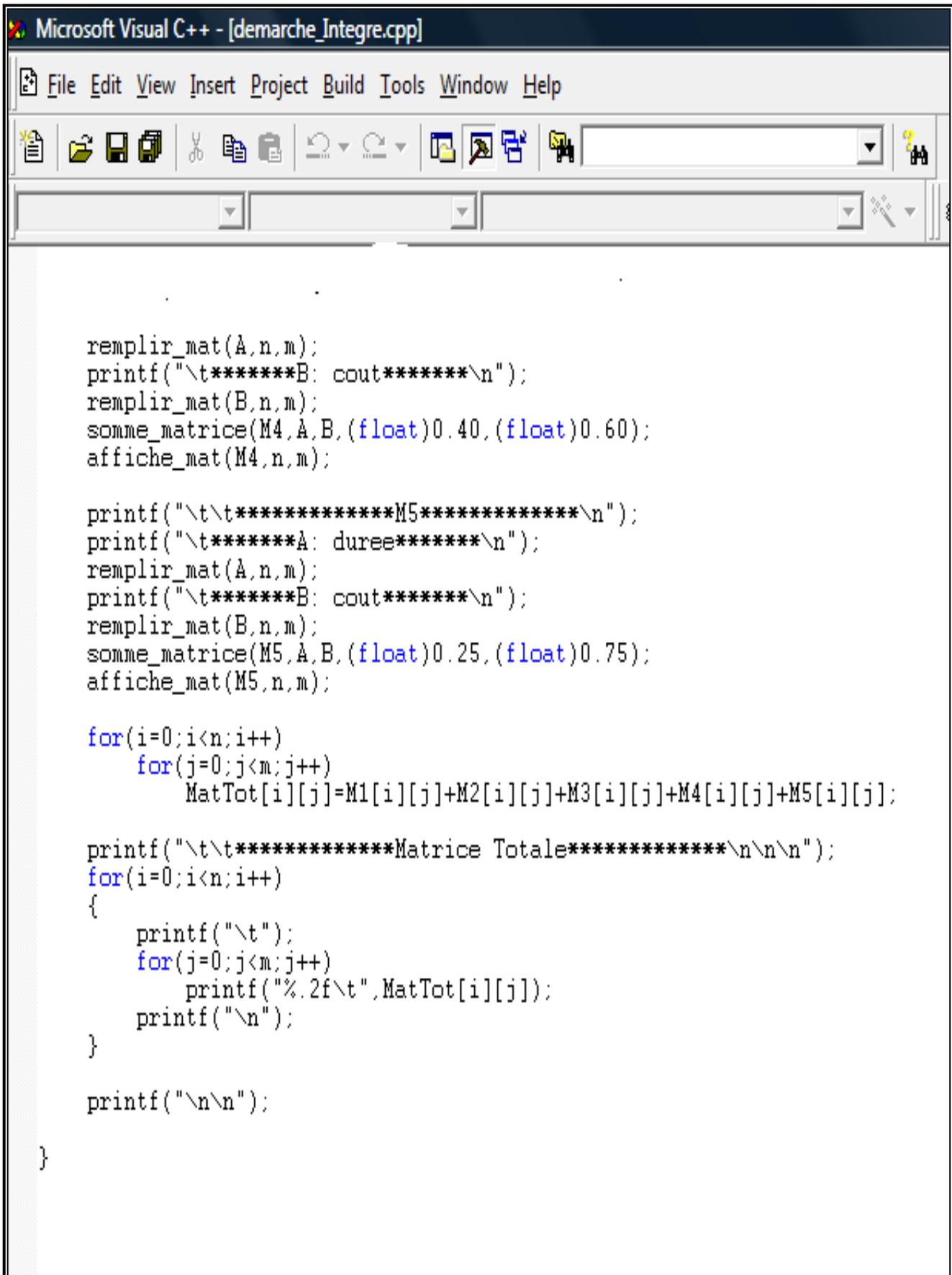
    printf("\t\t*****M1*****\n");
    printf("\t*****A: duree*****\n");
    remplir_mat(A,n,m);
    printf("\t*****B: cout*****\n");
    remplir_mat(B,n,m);
    somme_matrice(M1,A,B,(float)0.35,(float)0.65);
    affiche_mat(M1,n,m);

    printf("\t\t*****M2*****\n");
    printf("\t*****A: duree*****\n");
    remplir_mat(A,n,m);
    printf("\t*****B: cout*****\n");
    remplir_mat(B,n,m);
    somme_matrice(M2,A,B,(float)0.25,(float)0.75);
    affiche_mat(M2,n,m);

    printf("\t\t*****M3*****\n");
    printf("\t*****A: duree*****\n");
    remplir_mat(A,n,m);
    printf("\t*****B: cout*****\n");
    remplir_mat(B,n,m);
    somme_matrice(M3,A,B,(float)0.55,(float)0.45);
    affiche_mat(M3,n,m);

    printf("\t\t*****M4*****\n");
    printf("\t*****A: duree *****\n");

```



The image shows a screenshot of the Microsoft Visual C++ IDE. The title bar reads "Microsoft Visual C++ - [demarche\_Integre.cpp]". The menu bar includes "File", "Edit", "View", "Insert", "Project", "Build", "Tools", "Window", and "Help". The toolbar contains various icons for file operations (New, Open, Save, Print, Copy, Paste, Undo, Redo), editing (Cut, Paste), and development (Compile, Run, Stop, Help). The main editor window displays the following C++ code:

```
remplir_mat(A,n,m);
printf("\t*****B: cout*****\n");
remplir_mat(B,n,m);
somme_matrice(M4,A,B,(float)0.40,(float)0.60);
affiche_mat(M4,n,m);

printf("\t\t*****M5*****\n");
printf("\t*****A: duree*****\n");
remplir_mat(A,n,m);
printf("\t*****B: cout*****\n");
remplir_mat(B,n,m);
somme_matrice(M5,A,B,(float)0.25,(float)0.75);
affiche_mat(M5,n,m);

for(i=0;i<n;i++)
    for(j=0;j<m;j++)
        MatTot[i][j]=M1[i][j]+M2[i][j]+M3[i][j]+M4[i][j]+M5[i][j];

printf("\t\t*****Matrice Totale*****\n\n\n");
for(i=0;i<n;i++)
{
    printf("\t");
    for(j=0;j<m;j++)
        printf("%.2f\t",MatTot[i][j]);
    printf("\n");
}

printf("\n\n");
}
```

## Annexe 5-1

```

C:\ "C:\Documents and Settings\Lotfi\Bureau\les document de thPse\Umarche intPgrUe\Debug\demarche_Integre.exe"
/*
*/
/*****
*****/
*****M****
*****: duree*****
M[1][1]= 8
M[1][2]= 9
M[1][3]= 9
M[1][4]= 6
M[1][5]= 6
M[2][1]= 9
M[2][2]= 8
M[2][3]= 8
M[2][4]= 8
M[2][5]= 9
M[3][1]= 7
M[3][2]= 7
M[3][3]= 7
M[3][4]= 7
M[3][5]= 9
M[4][1]= 8
M[4][2]= 9
M[4][3]= 8
M[4][4]= 8
M[4][5]= 7
M[5][1]= 7
M[5][2]= 8
M[5][3]= 7
M[5][4]= 6
M[5][5]= 6

```

## Annexe 5-2

```

C:\ "C:\Documents and Settings\Lotfi\Bureau\les document de thPse\Umarche intPgrUe\Debug\demarche_Integre.exe"
*****: cou{*****
M[1][1]= 8
M[1][2]= 6
M[1][3]= 8
M[1][4]= 7
M[1][5]= 9
M[2][1]= 9
M[2][2]= 5
M[2][3]= 6
M[2][4]= 8
M[2][5]= 9
M[3][1]= 7
M[3][2]= 5
M[3][3]= 6
M[3][4]= 8
M[3][5]= 6
M[4][1]= 6
M[4][2]= 7
M[4][3]= 7
M[4][4]= 7
M[4][5]= 7
M[5][1]= 5
M[5][2]= 8
M[5][3]= 8
M[5][4]= 9
M[5][5]= 7

```

8.00	7.05	8.35	6.65	7.95
9.00	6.05	6.70	8.00	9.00
7.70	5.70	6.35	7.65	7.05
6.70	7.70	7.35	7.35	7.00
5.70	8.00	7.65	7.95	6.65

## Annexe 5-3

```

C:\ "C:\Documents and Settings\Lotfi\Bureau\les document de thPse\Umarche intPgrUe\Debug\demarche_Integre.exe"

*****M2*****
*****# : duree*****
M[1][1]= 8
M[1][2]= 9
M[1][3]= 9
M[1][4]= 7
M[1][5]= 5
M[2][1]= 9
M[2][2]= 7
M[2][3]= 6
M[2][4]= 8
M[2][5]= 9
M[3][1]= 9
M[3][2]= 8
M[3][3]= 6
M[3][4]= 7
M[3][5]= 8
M[4][1]= 5
M[4][2]= 7
M[4][3]= 7
M[4][4]= 7
M[4][5]= 7
M[5][1]= 7
M[5][2]= 8
M[5][3]= 3
M[5][4]= 3
M[5][5]= 6

```

## Annexe 5-4

```

C:\ "C:\Documents and Settings\Lotfi\Bureau\les document de thPse\Umarche intPgrUe\Debug\demarche_Integre.exe"

M[5][4]= 3
M[5][5]= 6
*****B : cout*****
M[1][1]= 8
M[1][2]= 7
M[1][3]= 8
M[1][4]= 9
M[1][5]= 8
M[2][1]= 9
M[2][2]= 7
M[2][3]= 6
M[2][4]= 8
M[2][5]= 7
M[3][1]= 7
M[3][2]= 5
M[3][3]= 5
M[3][4]= 5
M[3][5]= 6
M[4][1]= 6
M[4][2]= 8
M[4][3]= 5
M[4][4]= 7
M[4][5]= 5
M[5][1]= 5
M[5][2]= 7
M[5][3]= 8
M[5][4]= 8
M[5][5]= 8

```

8.00	7.50	8.25	8.50	7.25
9.00	7.00	6.00	8.00	7.50
7.50	5.75	5.25	5.50	6.50
5.75	7.75	5.50	7.00	5.50
5.50	7.25	6.75	6.75	7.50

## Annexe 5-5

```

C:\ "C:\Documents and Settings\Lotfi\Bureau\les document de thPse\DUmarche intPgrUe\Debug\demarche_Integre.exe"

*****M3*****
*****θ: duree*****
M[1][1]= 7
M[1][2]= 9
M[1][3]= 9
M[1][4]= 6
M[1][5]= 6
M[2][1]= 7
M[2][2]= 6
M[2][3]= 8
M[2][4]= 9
M[2][5]= 9
M[3][1]= 5
M[3][2]= 7
M[3][3]= 7
M[3][4]= 9
M[3][5]= 9
M[4][1]= 8
M[4][2]= 9
M[4][3]= 8
M[4][4]= 8
M[4][5]= 7
M[5][1]= 6
M[5][2]= 8
M[5][3]= 7
M[5][4]= 7
M[5][5]= 6

```

## Annexe 5-6

```

C:\ "C:\Documents and Settings\Lotfi\Bureau\les document de thPse\DUmarche intPgrUe\Debug\demarche_Integre.exe"

M[5][5]= 6
*****θ: cout*****
M[1][1]= 8
M[1][2]= 6
M[1][3]= 8
M[1][4]= 7
M[1][5]= 8
M[2][1]= 9
M[2][2]= 3
M[2][3]= 6
M[2][4]= 8
M[2][5]= 9
M[3][1]= 7
M[3][2]= 7
M[3][3]= 6
M[3][4]= 8
M[3][5]= 6
M[4][1]= 6
M[4][2]= 8
M[4][3]= 7
M[4][4]= 7
M[4][5]= 7
M[5][1]= 5
M[5][2]= 9
M[5][3]= 7
M[5][4]= 9
M[5][5]= 7

```

7.45	7.65	8.55	6.45	6.90
7.90	4.65	7.10	8.55	9.00
5.90	7.00	6.55	8.55	7.65
7.10	8.55	7.55	7.55	7.00
5.55	8.45	7.00	7.90	6.45

## Annexe 5-7

```

C:\> "C:\Documents and Settings\Lotfi\Bureau\les document de thPse\DUmarche intPgrUe\Debug\demarche_Integre.exe"
*****M*****
*****: duree *****
M[1][1]= 6
M[1][2]= 8
M[1][3]= 9
M[1][4]= 6
M[1][5]= 6
M[2][1]= 9
M[2][2]= 8
M[2][3]= 8
M[2][4]= 8
M[2][5]= 9
M[3][1]= 9
M[3][2]= 8
M[3][3]= 7
M[3][4]= 9
M[3][5]= 9
M[4][1]= 8
M[4][2]= 9
M[4][3]= 8
M[4][4]= 8
M[4][5]= 7
M[5][1]= 7
M[5][2]= 6
M[5][3]= 7
M[5][4]= 8
M[5][5]= 6

```

## Annexe 5-8

```

C:\> "C:\Documents and Settings\Lotfi\Bureau\les document de thPse\DUmarche intPgrUe\Debug\demarche_Integre.exe"
M[5][3]= 7
M[5][4]= 8
M[5][5]= 6
*****B: cout*****
M[1][1]= 8
M[1][2]= 6
M[1][3]= 8
M[1][4]= 7
M[1][5]= 9
M[2][1]= 9
M[2][2]= 5
M[2][3]= 9
M[2][4]= 8
M[2][5]= 9
M[3][1]= 8
M[3][2]= 5
M[3][3]= 6
M[3][4]= 8
M[3][5]= 6
M[4][1]= 6
M[4][2]= 7
M[4][3]= 7
M[4][4]= 8
M[4][5]= 7
M[5][1]= 5
M[5][2]= 9
M[5][3]= 7
M[5][4]= 8
M[5][5]= 9

```

7.20	6.80	8.40	6.60	7.80
9.00	6.20	8.60	8.00	9.00
8.40	6.20	6.40	8.40	7.20
6.80	7.80	7.40	8.00	7.00
5.80	7.80	7.00	8.00	7.80

## Annexe 5-9

```

*****M5*****
*****: duree*****
M[1][1]= 8
M[1][2]= 9
M[1][3]= 8
M[1][4]= 6
M[1][5]= 7
M[2][1]= 8
M[2][2]= 7
M[2][3]= 8
M[2][4]= 8
M[2][5]= 9
M[3][1]= 8
M[3][2]= 7
M[3][3]= 6
M[3][4]= 7
M[3][5]= 9
M[4][1]= 8
M[4][2]= 9
M[4][3]= 6
M[4][4]= 5
M[4][5]= 7
M[5][1]= 9
M[5][2]= 8
M[5][3]= 7
M[5][4]= 8
M[5][5]= 6
    
```

## Annexe 5-10

```

*****: cout*****
M[1][1]= 8
M[1][2]= 6
M[1][3]= 7
M[1][4]= 9
M[1][5]= 9
M[2][1]= 7
M[2][2]= 6
M[2][3]= 8
M[2][4]= 9
M[2][5]= 9
M[3][1]= 6
M[3][2]= 5
M[3][3]= 9
M[3][4]= 8
M[3][5]= 6
M[4][1]= 6
M[4][2]= 7
M[4][3]= 6
M[4][4]= 7
M[4][5]= 7
M[5][1]= 9
M[5][2]= 8
M[5][3]= 7
M[5][4]= 9
M[5][5]= 6
    
```

8.00	6.75	7.25	8.25	8.50
7.25	6.25	8.00	8.75	9.00
6.50	5.50	8.25	7.75	6.75
6.50	7.50	6.00	6.50	7.00
9.00	8.00	7.00	8.75	6.00

---

## Annexe 5-11

---

\*\*\*\*\*Matrice Totale\*\*\*\*\*

38.65	35.75	40.80	36.45	38.40
42.15	30.15	36.40	41.30	43.50
36.00	30.15	32.80	37.85	35.15
32.85	39.30	33.80	36.40	33.50
31.55	39.50	35.40	39.35	34.40

## Annexe 6

Tableau des prélèvements après l'application de Six Sigma (date : 25/04/2009)

1,41	1,41	1,43	1,41
1,41	1,41	1,42	1,43
1,42	1,42	1,42	1,43
1,42	1,42	1,42	1,43
1,42	1,42	1,43	1,41
1,43	1,42	1,43	1,41
1,43	1,43	1,43	1,41
1,43	1,41	1,43	1,42
1,43	1,41	1,41	1,42
1,41	1,42	1,43	1,42
1,43	1,42	1,43	1,42
1,43	1,42	1,43	1,43
1,43	1,43	1,41	1,43
1,41	1,43	1,41	1,41
1,41	1,43	1,41	1,42
1,41	1,43	1,42	1,42
1,42	1,41	1,42	1,42
1,42	1,43	1,42	1,43
1,42	1,43	1,42	1,43
1,42	1,43	1,43	1,43
1,43	1,41	1,41	1,43
1,41	1,41	1,41	1,41
1,41	1,41	1,42	1,43
1,42	1,42	1,42	1,43
1,42	1,42	1,42	1,43
1,42	1,42	1,43	1,41
1,43	1,42	1,43	1,41
1,43	1,43	1,43	1,41
1,43	1,41	1,43	1,42
1,43	1,41	1,41	1,42
1,41	1,42	1,43	1,42
1,43	1,42	1,43	1,42
1,43	1,43	1,43	1,43
1,43	1,43	1,43	1,41
1,47	1,43	1,41	1,41
1,41	1,43	1,41	1,42
1,41	1,43	1,42	1,42
1,42	1,41	1,42	1,42
1,42	1,43	1,42	1,43
1,42	1,43	1,42	1,43
1,42	1,43	1,43	1,43
1,43	1,41	1,41	1,43
1,41	1,41	1,41	1,41
1,41	1,41	1,42	1,43

---

1,42	1,42	1,42	1,43
1,42	1,42	1,42	1,43
1,42	1,42	1,43	1,41

# Résumée

Depuis plusieurs années, le contexte de mondialisation et l'accroissement de la concurrence ont défini un nouvel ordre économique et industriel pour les entreprises de production de biens. En effet, ces entreprises sont quotidiennement confrontées à la maîtrise et à l'amélioration des performances de l'ensemble de leurs processus afin de garantir leur pérennité et leur compétitivité. En raison de l'ouverture des marchés et de la concurrence accrue, plusieurs phénomènes concourants ont lieu.

Tout d'abord, le phénomène le plus notable concerne l'attente des clients de plus en plus forte, non seulement en ce qui concerne le prix et la qualité, mais également sur l'innovation des produits ainsi que sur leur disponibilité. Dans de telles situations nous proposons de suivre la variabilité du processus par l'intégration de la méthode Six Sigma, afin de détecter toute preuve de changement significatif de la variabilité.

L'objectif principal de Six Sigma est d'augmenter la rentabilité de l'entreprise en réduisant le gaspillage, tout en ayant l'intérêt du client à cœur. Elle est aussi une mesure statistique de la performance des processus qui permet de déterminer avec une grande précision la qualité des produits ou services. Six Sigma est le système de management qui se développe le plus vite aujourd'hui dans l'industrie. Centré sur une puissante méthodologie de résolution de problème et d'optimisation des processus.

La puissance de Six Sigma vient de l'application d'outils statistiques dans le contexte d'une méthodologie structurée et facile à mettre en œuvre. Ces outils, utilisés le plus souvent dans un environnement opérationnel de production, s'appliquent également à tous les processus, y compris administratifs. L'objectif de notre travail de recherche, est de fournir une vision opérationnelle, structurée à travers l'intégration de la méthodologie Six Sigma basée sur les outils multicritères d'aide à la décision afin d'améliorer un système de production, cela se traduit par comprendre et savoir comment optimiser les processus de production dans le but de réduire le nombre de défauts et la variabilité des processus. La méthodologie proposée est appliquée au sein de la société SIDILEC international spécialisée dans la fabrication des faisceaux de câbles électriques pour les constructeurs des voitures avec et sans permis.

Le secteur automobile évolue à une vitesse de plus en plus importante. En effet, l'évolution rapide des techniques et des technologies accompagnée d'une explosion de l'informatique, a mis les entreprises face à une concurrence acharnée. Face à cette situation, l'entreprise doit tourner son souci vers la recherche d'une meilleure démarche lui permettant d'atteindre le niveau de compétitivité recherché et de satisfaire les clients. Les travaux se déroulent dans une usine de production spécialisée dans l'étude et la réalisation de faisceaux de câbles électriques pour les secteurs industriels automobiles et ferroviaires.

Au terme de ce travail, nous considérons que nos objectifs identifiés dans le support théorique sont bien réalisés et justifiés dans le cadre de ce chapitre pratique. L'intégration de la méthode Six Sigma basée sur les outils multicritères d'aide à la décision pour améliorer un processus de production est parfaitement accomplie et cela se traduit par comprendre et savoir comment améliorer un processus de production dans le but de réduire le nombre de défauts et la variabilité des processus.

**Mots clés :** Six Sigma ; Système de production complexe ; aide à la décision multicritère ; Analytical hierarchy process, la méthode MACBETH.

## Abstract :

For several years, the context of globalization and increased competition have defined a new economic and industrial companies for production of goods. Indeed, these companies are confronted daily with the control and performance enhancement of all their processes to ensure their sustainability and competitiveness. Due to the opening of markets and increased competition, several concurrent phenomena occur. Firstly, the phenomenon most notable clients' expectations more and more strong, not only regarding the price and quality, but also on innovation of products and their availability. In such situations we propose to follow the variability of the process through the integration of Six Sigma, to detect evidence of significant change in variability. The main objective of Six Sigma is to increase profitability by reducing waste, while having the client's interest at heart. It is a statistical measure of process performance that can determine with precision the quality of products or services. Six Sigma is a management system that grows the fastest in the industry today. Centered on a powerful problem solving methodology and process optimization.

The Power of Six Sigma is the application of statistical tools in the context of a structured and easy to implement. These tools, used most often in an operational environment of production, also apply to all processes, including administrative. The aim of our research is to provide an operational vision, structured through the integration of Six Sigma tools based multicriteria decision support to improve a production system, this translates to understand and know how to optimize production processes in order to reduce the number of defects and process variability.

The proposed methodology is applied to society SIDILEC International specializes in the manufacture of electrical wiring harnesses for the manufacturers of cars with and without a license. The automotive industry is changing at a speed of more and more important. Indeed, the rapidly changing techniques and technologies along with an explosion of information technology, has put companies face fierce competition. Faced with this situation, the company must strive to turn the search for a better approach to enable it to achieve the desired level of competitiveness and customer satisfaction. The work takes place in a production facility that specializes in the design and manufacture of electric wiring harnesses for automotive and railway industries. Upon completion of this work, we consider that our objectives identified in the theoretical support are well made and justified under this chapter practice.

The integration of Six Sigma tools based on multicriteria decision support to improve a production process is completely accomplished and that means understanding and knowing how to improve a production process in order to reduce the number of defects and process variability.

**Key word :** Six Sigma; Production System complex decision aid multicriteria Analytical hierarchy process, method MACBETH.