

SIX SIGMA

Outil de la performance industrielle

THESE
Présentée et soutenue publiquement le

.....

PAR
Mr. RAYADI Youssef
Né le 17/04/1986 à El Youssefia

Pour l'Obtention du Doctorat en Pharmacie

MOTS CLES : Six Sigma (DMAICS), Processus, Analyse Statistique.

MEMBRES DE JURY

Mr. R. ABOUQAL
Mr. Y.BENSOUDA
Mme. M.CAOUI
Mr. B.LMIMOUNI

Professeur de Réanimation médicale
Professeur de Pharmacie galénique
Professeur de Biophysique
Professeur de Parasitologie

PRESIDENT
RAPPORTEUR

} **JUGES**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



UNIVERSITE MOHAMMED V- SOUISSI
FACULTE DE MEDECINE ET DE PHARMACIE - RABAT

DOYENS HONORAIRES :

1962 – 1969 : Docteur Abdelmalek FARAJ
1969 – 1974 : Professeur Abdellatif BERBICH
1974 – 1981 : Professeur Bachir LAZRAK
1981 – 1989 : Professeur Taieb CHKILI
1989 – 1997 : Professeur Mohamed Tahar ALAOUI
1997 – 2003 : Professeur Abdelmajid BELMAHI

ADMINISTRATION :

Doyen : Professeur Najia HAJJAJ
Vice Doyen chargé des Affaires Académiques et étudiantes
Professeur Mohammed JIDDANE
Vice Doyen chargé de la Recherche et de la Coopération
Professeur Ali BENOMAR
Vice Doyen chargé des Affaires Spécifiques à la Pharmacie
Professeur Yahia CHERRAH
Secrétaire Général : Mr. El Hassane AHALLAT
Conservateur : Ahmed ZAHIDI

PROFESSEURS :

Février, Septembre, Décembre 1973

1. Pr. CHKILI Taieb Neuropsychiatrie

Janvier et Décembre 1976

2. Pr. HASSAR Mohamed Pharmacologie Clinique

Mars, Avril et Septembre 1980

3. Pr. EL KHAMLI Abdeslam Neurochirurgie
4. Pr. MESBAHI Redouane Cardiologie

Mai et Octobre 1981

5. Pr. BOUZOUBAA Abdelmajid Cardiologie
6. Pr. EL MANOUAR Mohamed Traumatologie-Orthopédie
7. Pr. HAMANI Ahmed* Cardiologie
8. Pr. MAAZOUZI Ahmed Wajih Chirurgie Cardio-Vasculaire
9. Pr. SBIHI Ahmed Anesthésie – Réanimation
10. Pr. TAOBANE Hamid* Chirurgie Thoracique

Mai et Novembre 1982

- 11. Pr. ABROUQ Ali*
- 12. Pr. BENOMAR M'hammed
- 13. Pr. BENSOUDA Mohamed
- 14. Pr. BENOSMAN Abdellatif
- 15. Pr. LAHBABI ép. AMRANI Naïma

Oto-Rhino-Laryngologie
Chirurgie-Cardio-Vasculaire
Anatomie
Chirurgie Thoracique
Physiologie

Novembre 1983

- 16. Pr. ALAOUI TAHIRI Kébir*
- 17. Pr. BALAFREJ Amina
- 18. Pr. BELLAKHDAR Fouad
- 19. Pr. HAJJAJ ép. HASSOUNI Najia
- 20. Pr. SRAIRI Jamal-Eddine

Pneumo-phtisiologie
Pédiatrie
Neurochirurgie
Rhumatologie
Cardiologie

Décembre 1984

- 21. Pr. BOUCETTA Mohamed*
- 22. Pr. EL GUEDDARI Brahim El Khalil
- 23. Pr. MAAOUNI Abdelaziz
- 24. Pr. MAAZOUZI Ahmed Wajdi
- 25. Pr. NAJI M'Barek *
- 26. Pr. SETTAF Abdellatif

Neurochirurgie
Radiothérapie
Médecine Interne
Anesthésie -Réanimation
Immuno-Hématologie
Chirurgie

Novembre et Décembre 1985

- 27. Pr. BENJELLOUN Halima
- 28. Pr. BENSALD Younes
- 29. Pr. EL ALAOUI Faris Moulay El Mostafa
- 30. Pr. IHRAI Hssain *
- 31. Pr. IRAQI Ghali
- 32. Pr. KZADRI Mohamed

Cardiologie
Pathologie Chirurgicale
Neurologie
Stomatologie et Chirurgie Maxillo-Faciale
Pneumo-phtisiologie
Oto-Rhino-laryngologie

Janvier, Février et Décembre 1987

- 33. Pr. AJANA Ali
- 34. Pr. AMMAR Fanid
- 35. Pr. CHAHED OUZZANI Houria ép.TAOBANE
- 36. Pr. EL FASSY FIHRI Mohamed Taoufiq
- 37. Pr. EL HAITEM Naïma
- 38. Pr. EL MANSOURI Abdellah*
- 39. Pr. EL YAACOUBI Moradh
- 40. Pr. ESSAID EL FEYDI Abdellah
- 41. Pr. LACHKAR Hassan
- 42. Pr. OHAYON Victor*
- 43. Pr. YAHYAOUI Mohamed

Radiologie
Pathologie Chirurgicale
Gastro-Entérologie
Pneumo-phtisiologie
Cardiologie
Chimie-Toxicologie Expertise
Traumatologie Orthopédie
Gastro-Entérologie
Médecine Interne
Médecine Interne
Neurologie

Décembre 1988

- 44. Pr. BENHAMAMOUCHE Mohamed Najib

Chirurgie Pédiatrique

- 45. Pr. DAFIRI Rachida
- 46. Pr. FAIK Mohamed
- 47. Pr. HERMAS Mohamed
- 48. Pr. TOLOUNE Farida*

Radiologie
Urologie
Traumatologie Orthopédie
Médecine Interne

Décembre 1989 Janvier et Novembre 1990

- 49. Pr. ADNAOUI Mohamed
- 50. Pr. AOUNI Mohamed
- 51. Pr. BENAMEUR Mohamed*
- 52. Pr. BOUKILI MAKHOUKHI Abdelali
- 53. Pr. CHAD Bouziane
- 54. Pr. CHKOFF Rachid
- 55. Pr. KHARBACH Aïcha
- 56. Pr. MANSOURI Fatima
- 57. Pr. OUAZZANI Taïbi Mohamed Réda
- 58. Pr. SEDRATI Omar*
- 59. Pr. TAZI Saoud Anas

Médecine Interne
Médecine Interne
Radiologie
Cardiologie
Pathologie Chirurgicale
Urologie
Gynécologie -Obstétrique
Anatomie-Pathologique
Neurologie
Dermatologie
Anesthésie Réanimation

Février Avril Juillet et Décembre 1991

- 60. Pr. AL HAMANY Zaïtounia
- 61. Pr. ATMANI Mohamed*
- 62. Pr. AZZOUZI Abderrahim
- 63. Pr. BAYAHIA Rabéa ép. HASSAM
- 64. Pr. BELKOUCHI Abdelkader
- 65. Pr. BENABDELLAH Chahrazad
- 66. Pr. BENCHEKROUN BELABBES Abdellatif
- 67. Pr. BENSOUDA Yahia
- 68. Pr. BERRAHO Amina
- 69. Pr. BEZZAD Rachid
- 70. Pr. CHABRAOUI Layachi
- 71. Pr. CHANA El Houssaine*
- 72. Pr. CHERRAH Yahia
- 73. Pr. CHOKAIRI Omar
- 74. Pr. FAJRI Ahmed*
- 75. Pr. JANATI Idrissi Mohamed*
- 76. Pr. KHATTAB Mohamed
- 77. Pr. NEJMI Maati
- 78. Pr. OUAALINE Mohammed*
- 79. Pr. SOULAYMANI Rachida ép. BENCHEIKH
- 80. Pr. TAOUFIK Jamal

Anatomie-Pathologique
Anesthésie Réanimation
Anesthésie Réanimation
Néphrologie
Chirurgie Générale
Hématologie
Chirurgie Générale
Pharmacie galénique
Ophtalmologie
Gynécologie Obstétrique
Biochimie et Chimie
Ophtalmologie
Pharmacologie
Histologie Embryologie
Psychiatrie
Chirurgie Générale
Pédiatrie
Anesthésie-Réanimation
Médecine Préventive, Santé Publique et Hygiène
Pharmacologie
Chimie thérapeutique

Décembre 1992

- 81. Pr. AHALLAT Mohamed
- 82. Pr. BENOUDA Amina
- 83. Pr. BENSOUDA Adil

Chirurgie Générale
Microbiologie
Anesthésie Réanimation

84. Pr. BOUJIDA Mohamed Najib
85. Pr. CHAHED OUAZZANI Laaziza
86. Pr. CHRAIBI Chafiq
87. Pr. DAOUDI Rajae
88. Pr. DEHAYNI Mohamed*
89. Pr. EL HADDOURY Mohamed
90. Pr. EL OUAHABI Abdessamad
91. Pr. FELLAT Rokaya
92. Pr. GHAFIR Driss*
93. Pr. JIDDANE Mohamed
94. Pr. OUAZZANI TAIBI Med Charaf Eddine
95. Pr. TAGHY Ahmed
96. Pr. ZOUHDI Mimoun

Radiologie
Gastro-Entérologie
Gynécologie Obstétrique
Ophtalmologie
Gynécologie Obstétrique
Anesthésie Réanimation
Neurochirurgie
Cardiologie
Médecine Interne
Anatomie
Gynécologie Obstétrique
Chirurgie Générale
Microbiologie

Mars 1994

97. Pr. AGNAOU Lahcen
98. Pr. AL BAROUDI Saad
99. Pr. BENCHERIFA Fatiha
100. Pr. BENJAAFAR Nouredine
101. Pr. BENJELLOUN Samir
102. Pr. BEN RAIS Nozha
103. Pr. CAOUI Malika
104. Pr. CHRAIBI Abdelmjid
105. Pr. EL AMRANI Sabah ép. AHALLAT
106. Pr. EL AOUAD Rajae
107. Pr. EL BARDOUNI Ahmed
108. Pr. EL HASSANI My Rachid
109. Pr. EL IDRISSE LAMGHARI Abdennaceur
110. Pr. EL KIRAT Abdelmajid*
111. Pr. ERROUGANI Abdelkader
112. Pr. ESSAKALI Malika
113. Pr. ETTAYEBI Fouad
114. Pr. HADRI Larbi*
115. Pr. HASSAM Badredine
116. Pr. IFRINE Lahssan
117. Pr. JELTHI Ahmed
118. Pr. MAHFOUD Mustapha
119. Pr. MOUDENE Ahmed*
120. Pr. OULBACHA Said
121. Pr. RHRAB Brahim
122. Pr. SENOUCI Karima ép. BELKHADIR
- 123.** Pr. SLAOUI Anas

Ophtalmologie
Chirurgie Générale
Ophtalmologie
Radiothérapie
Chirurgie Générale
Biophysique
Biophysique
Endocrinologie et Maladies Métaboliques
Gynécologie Obstétrique
Immunologie
Traumato-Orthopédie
Radiologie
Médecine Interne
Chirurgie Cardio- Vasculaire
Chirurgie Générale
Immunologie
Chirurgie Pédiatrique
Médecine Interne
Dermatologie
Chirurgie Générale
Anatomie Pathologique
Traumatologie – Orthopédie
Traumatologie- Orthopédie
Chirurgie Générale
Gynécologie –Obstétrique
Dermatologie
Chirurgie Cardio-Vasculaire

Mars 1994

- 124. Pr. ABBAR Mohamed*
- 125. Pr. ABDELHAK M'barek
- 126. Pr. BELAIDI Halima
- 127. Pr. BRAHMI Rida Slimane
- 128. Pr. BENTAHILA Abdelali
- 129. Pr. BENYAHIA Mohammed Ali
- 130. Pr. BERRADA Mohamed Saleh
- 131. Pr. CHAMI Ilham
- 132. Pr. CHERKAOUI Lalla Ouafae
- 133. Pr. EL ABBADI Najia
- 134. Pr. HANINE Ahmed*
- 135. Pr. JALIL Abdelouahed
- 136. Pr. LAKHDAR Amina
- 137. Pr. MOUANE Nezha

Urologie
Chirurgie – Pédiatrique
Neurologie
Gynécologie Obstétrique
Pédiatrie
Gynécologie – Obstétrique
Traumatologie – Orthopédie
Radiologie
Ophtalmologie
Neurochirurgie
Radiologie
Chirurgie Générale
Gynécologie Obstétrique
Pédiatrie

Mars 1995

- 138. Pr. ABOUQUAL Redouane
- 139. Pr. AMRAOUI Mohamed
- 140. Pr. BAIDADA Abdelaziz
- 141. Pr. BARGACH Samir
- 142. Pr. BEDDOUCHE Amokrane*
- 143. Pr. BENAZZOUZ Mustapha
- 144. Pr. CHAARI Jilali*
- 145. Pr. DIMOU M'barek*
- 146. Pr. DRISSI KAMILI Mohammed Nordine*
- 147. Pr. EL MESNAOUI Abbes
- 148. Pr. ESSAKALI HOUSSEINI Leila
- 149. Pr. FERHATI Driss
- 150. Pr. HASSOUNI Fadil
- 151. Pr. HDA Abdelhamid*
- 152. Pr. IBEN ATTYA ANDALOUSSI Ahmed
- 153. Pr. IBRAHIMY Wafaa
- 154. Pr. MANSOURI Aziz
- 155. Pr. OUZZANI CHAHDI Bahia
- 156. Pr. RZIN Abdelkader*
- 157. Pr. SEFIANI Abdelaziz
- 158. Pr. ZEGGWAGH Amine Ali

Réanimation Médicale
Chirurgie Générale
Gynécologie Obstétrique
Gynécologie Obstétrique
Urologie
Gastro-Entérologie
Médecine Interne
Anesthésie Réanimation
Anesthésie Réanimation
Chirurgie Générale
Oto-Rhino-Laryngologie
Gynécologie Obstétrique
Médecine Préventive et Santé Publique
Cardiologie
Urologie
Ophtalmologie
Radiothérapie
Ophtalmologie
Stomatologie et Chirurgie Maxillo-faciale
Génétique
Réanimation Médicale

Décembre 1996

- 159. Pr. AMIL Touriya*
- 160. Pr. BELKACEM Rachid

Radiologie
Chirurgie Pédiatrie

161. Pr. BELMAHI Amin
162. Pr. BOULANOUAR Abdelkrim
163. Pr. EL ALAMI EL FARICHA EL Hassan
164. Pr. EL MELLOUKI Ouafae*
165. Pr. GAOUZI Ahmed
166. Pr. MAHFOUDI M'barek*
167. Pr. MOHAMMADINE EL Hamid
168. Pr. MOHAMMADI Mohamed
169. Pr. MOULINE Soumaya
170. Pr. OUADGHIRI Mohamed
171. Pr. OUZEDDOUN Naima
172. Pr. ZBIR EL Mehdi*

Chirurgie réparatrice et plastique
Ophtalmologie
Chirurgie Générale
Parasitologie
Pédiatrie
Radiologie
Chirurgie Générale
Médecine Interne
Pneumo-phtisiologie
Traumatologie-Orthopédie
Néphrologie
Cardiologie

Novembre 1997

173. Pr. ALAMI Mohamed Hassan
174. Pr. BEN AMAR Abdesselem
175. Pr. BEN SLIMANE Lounis
176. Pr. BIROUK Nazha
177. Pr. BOULAICH Mohamed
178. Pr. CHAOUIR Souad*
179. Pr. DERRAZ Said
180. Pr. ERREIMI Naima
181. Pr. FELLAT Nadia
182. Pr. GUEDDARI Fatima Zohra
183. Pr. HAIMEUR Charki*
184. Pr. KANOUNI NAWAL
185. Pr. KOUTANI Abdellatif
186. Pr. LAHLOU Mohamed Khalid
187. Pr. MAHRAOUI CHAFIQ
188. Pr. NAZI M'barek*
189. Pr. OUAHABI Hamid*
190. Pr. SAFI Lahcen*
191. Pr. TAOUFIQ Jallal
192. Pr. YOUSFI MALKI Mounia

Gynécologie-Obstétrique
Chirurgie Générale
Urologie
Neurologie
O.RL.
Radiologie
Neurochirurgie
Pédiatrie
Cardiologie
Radiologie
Anesthésie Réanimation
Physiologie
Urologie
Chirurgie Générale
Pédiatrie
Cardiologie
Neurologie
Anesthésie Réanimation
Psychiatrie
Gynécologie Obstétrique

Novembre 1998

193. Pr. AFIFI RAJAA
194. Pr. AIT BENASSER MOULAY Ali*
195. Pr. ALOUANE Mohammed*
196. Pr. BENOMAR ALI
197. Pr. BOUGTAB Abdesslam
198. Pr. ER RIHANI Hassan
199. Pr. EZZAITOUNI Fatima
200. Pr. KABBAJ Najat
201. Pr. LAZRAK Khalid (M)

Gastro-Entérologie
Pneumo-phtisiologie
Oto-Rhino-Laryngologie
Neurologie
Chirurgie Générale
Oncologie Médicale
Néphrologie
Radiologie
Traumatologie Orthopédie

Novembre 1998

202. Pr. BENKIRANE Majid*

203. Pr. KHATOURI ALI*

204. Pr. LABRAIMI Ahmed*

Hématologie

Cardiologie

Anatomie Pathologique

Janvier 2000

205. Pr. ABID Ahmed*

206. Pr. AIT OUMAR Hassan

207. Pr. BENCHERIF My Zahid

208. Pr. BENJELLOUN DAKHAMA Badr.Sououd

209. Pr. BOURKADI Jamal-Eddine

210. Pr. CHAOUI Zineb

211. Pr. CHARIF CHEFCHAOUNI Al Montacer

212. Pr. ECHARRAB El Mahjoub

213. Pr. EL FTOUH Mustapha

214. Pr. EL MOSTARCHID Brahim*

215. Pr. EL OTMANY Azzedine

216. Pr. GHANNAM Rachid

217. Pr. HAMMANI Lahcen

218. Pr. ISMAILI Mohamed Hatim

219. Pr. ISMAILI Hassane*

220. Pr. KRAMI Hayat Ennoufouss

221. Pr. MAHMOUDI Abdelkrim*

222. Pr. TACHINANTE Rajae

223. Pr. TAZI MEZALEK Zoubida

Pneumophtisiologie

Pédiatrie

Ophtalmologie

Pédiatrie

Pneumo-phtisiologie

Ophtalmologie

Chirurgie Générale

Chirurgie Générale

Pneumo-phtisiologie

Neurochirurgie

Chirurgie Générale

Cardiologie

Radiologie

Anesthésie-Réanimation

Traumatologie Orthopédie

Gastro-Entérologie

Anesthésie-Réanimation

Anesthésie-Réanimation

Médecine Interne

Novembre 2000

224. Pr. AIDI Saadia

225. Pr. AIT OURHROUI Mohamed

226. Pr. AJANA Fatima Zohra

227. Pr. BENAMR Said

228. Pr. BENCHEKROUN Nabih

229. Pr. CHERTI Mohammed

230. Pr. ECH-CHERIF EL KETTANI Selma

231. Pr. EL HASSANI Amine

232. Pr. EL IDGHIRI Hassan

233. Pr. EL KHADER Khalid

234. Pr. EL MAGHRAOUI Abdellah*

235. Pr. GHARBI Mohamed El Hassan

236. Pr. HSSAIDA Rachid*

237. Pr. LACHKAR Azzouz

238. Pr. LAHLOU Abdou

239. Pr. MAFTAH Mohamed*

Neurologie

Dermatologie

Gastro-Entérologie

Chirurgie Générale

Ophtalmologie

Cardiologie

Anesthésie-Réanimation

Pédiatrie

Oto-Rhino-Laryngologie

Urologie

Rhumatologie

Endocrinologie et Maladies Métaboliques

Anesthésie-Réanimation

Urologie

Traumatologie Orthopédie

Neurochirurgie

240. Pr. MAHASSINI Najat
 241. Pr. MDAGHRI ALAOUI Asmae
 242. Pr. NASSIH Mohamed*
 243. Pr. ROUIMI Abdelhadi

Anatomie Pathologique
 Pédiatrie
 Stomatologie Et Chirurgie Maxillo-Faciale
 Neurologie

Décembre 2001

244. Pr. ABABOU Adil
 245. Pr. AOUAD Aicha
 246. Pr. BALKHI Hicham*
 247. Pr. BELMEKKI Mohammed
 248. Pr. BENABDELJLIL Maria
 249. Pr. BENAMAR Loubna
 250. Pr. BENAMOR Jouda
 251. Pr. BENELBARHDADI Imane
 252. Pr. BENNANI Rajae
 253. Pr. BENOUACHANE Thami
 254. Pr. BENYOUSSEF Khalil
 255. Pr. BERRADA Rachid
 256. Pr. BEZZA Ahmed*
 257. Pr. BOUCHIKHI IDRISSE Med Larbi
 258. Pr. BOUHOUCHE Rachida
 259. Pr. BOUMDIN El Hassane*
 260. Pr. CHAT Latifa
 261. Pr. CHELLAOUI Mounia
 262. Pr. DAALI Mustapha*
 263. Pr. DRISSI Sidi Mourad*
 264. Pr. EL HAJOUI Ghziel Samira
 265. Pr. EL HIJRI Ahmed
 266. Pr. EL MAAQILI Moulay Rachid
 267. Pr. EL MADHI Tarik
 268. Pr. EL MOUSSAIF Hamid
 269. Pr. EL OUNANI Mohamed
 270. Pr. EL QUESSAR Abdeljlil
 271. Pr. ETTAIR Said
 272. Pr. GAZZAZ Miloudi*
 273. Pr. GOURINDA Hassan
 274. Pr. HRORA Abdelmalek
 275. Pr. KABBAJ Saad
 276. Pr. KABIRI EL Hassane*
 277. Pr. LAMRANI Moulay Omar
 278. Pr. LEKEHAL Brahim
 279. Pr. MAHASSIN Fattouma*
 280. Pr. MEDARHRI Jalil
 281. Pr. MIKDAME Mohammed*
 282. Pr. MOHSINE Raouf

Anesthésie-Réanimation
 Cardiologie
 Anesthésie-Réanimation
 Ophtalmologie
 Neurologie
 Néphrologie
 Pneumo-phtisiologie
 Gastro-Entérologie
 Cardiologie
 Pédiatrie
 Dermatologie
 Gynécologie Obstétrique
 Rhumatologie
 Anatomie
 Cardiologie
 Radiologie
 Radiologie
 Radiologie
 Chirurgie Générale
 Radiologie
 Gynécologie Obstétrique
 Anesthésie-Réanimation
 Neuro-Chirurgie
 Chirurgie-Pédiatrique
 Ophtalmologie
 Chirurgie Générale
 Radiologie
 Pédiatrie
 Neuro-Chirurgie
 Chirurgie-Pédiatrique
 Chirurgie Générale
 Anesthésie-Réanimation
 Chirurgie Thoracique
 Traumatologie Orthopédie
 Chirurgie Vasculaire Périphérique
 Médecine Interne
 Chirurgie Générale
 Hématologie Clinique
 Chirurgie Générale

283. Pr. NABIL Samira
 284. Pr. NOUINI Yassine
 285. Pr. OUALIM Zouhir*
 286. Pr. SABBAH Farid
 287. Pr. SEFIANI Yasser
 288. Pr. TAOUFIQ BENCHEKROUN Soumia
 289. Pr. TAZI MOUKHA Karim

Gynécologie Obstétrique
 Urologie
 Néphrologie
 Chirurgie Générale
 Chirurgie Vasculaire Périphérique
 Pédiatrie
 Urologie

Décembre 2002

290. Pr. AL BOUZIDI Abderrahmane*
 291. Pr. AMEUR Ahmed *
 292. Pr. AMRI Rachida
 293. Pr. AOURARH Aziz*
 294. Pr. BAMOU Youssef *
 295. Pr. BELMEJDOUB Ghizlene*
 296. Pr. BENBOUAZZA Karima
 297. Pr. BENZEKRI Laila
 298. Pr. BENZZOUBEIR Nadia*
 299. Pr. BERNOUSSI Zakiya
 300. Pr. BICHRA Mohamed Zakariya
 301. Pr. CHOHO Abdelkrim *
 302. Pr. CHKIRATE Bouchra
 303. Pr. EL ALAMI EL FELLOUS Sidi Zouhair
 304. Pr. EL ALJ Haj Ahmed
 305. Pr. EL BARNOUSSI Leila
 306. Pr. EL HAOURI Mohamed *
 307. Pr. EL MANSARI Omar*
 308. Pr. ES-SADEL Abdelhamid
 309. Pr. FILALI ADIB Abdelhai
 310. Pr. HADDOUR Leila
 311. Pr. HAJJI Zakia
 312. Pr. IKEN Ali
 313. Pr. ISMAEL Farid
 314. Pr. JAAFAR Abdeloihab*
 315. Pr. KRIOULE Yamina
 316. Pr. LAGHMARI Mina
 317. Pr. MABROUK Hfid*
 318. Pr. MOUSSAOUI RAHALI Driss*
 319. Pr. MOUSTAGHFIR Abdelhamid*
 320. Pr. MOUSTAINE My Rachid
 321. Pr. NAITLHO Abdelhamid*
 322. Pr. OUJILAL Abdelilah
 323. Pr. RACHID Khalid *
 324. Pr. RAISS Mohamed
 325. Pr. RGUIBI IDRISSE Sidi Mustapha*

Anatomie Pathologique
 Urologie
 Cardiologie
 Gastro-Entérologie
 Biochimie-Chimie
 Endocrinologie et Maladies Métaboliques
 Rhumatologie
 Dermatologie
 Gastro-Entérologie
 Anatomie Pathologique
 Psychiatrie
 Chirurgie Générale
 Pédiatrie
 Chirurgie Pédiatrique
 Urologie
 Gynécologie Obstétrique
 Dermatologie
 Chirurgie Générale
 Chirurgie Générale
 Gynécologie Obstétrique
 Cardiologie
 Ophtalmologie
 Urologie
 Traumatologie Orthopédie
 Traumatologie Orthopédie
 Pédiatrie
 Ophtalmologie
 Traumatologie Orthopédie
 Gynécologie Obstétrique
 Cardiologie
 Traumatologie Orthopédie
 Médecine Interne
 Oto-Rhino-Laryngologie
 Traumatologie Orthopédie
 Chirurgie Générale
 Pneumophtisiologie

- 326. Pr. RHOUE Hakima
- 327. Pr. SIAH Samir *
- 328. Pr. THIMOU Amal
- 329. Pr. ZENTAR Aziz*
- 330. Pr. ZRARA Ibtisam*

Néphrologie
Anesthésie Réanimation
Pédiatrie
Chirurgie Générale
Anatomie Pathologique

PROFESSEURS AGREGES :

Janvier 2004

- 331. Pr. ABDELLAH El Hassan
- 332. Pr. AMRANI Mariam
- 333. Pr. BENBOUZID Mohammed Anas
- 334. Pr. BENKIRANE Ahmed*
- 335. Pr. BENRAMDANE Larbi*
- 336. Pr. BOUGHALEM Mohamed*
- 337. Pr. BOULAADAS Malik
- 338. Pr. BOURAZZA Ahmed*
- 339. Pr. CHAGAR Belkacem*
- 340. Pr. CHERRADI Nadia
- 341. Pr. EL FENNI Jamal*
- 342. Pr. EL HANCHI ZAKI
- 343. Pr. EL KHORASSANI Mohamed
- 344. Pr. EL YOUNASSI Badreddine*
- 345. Pr. HACHI Hafid
- 346. Pr. JABOUIRIK Fatima
- 347. Pr. KARMANE Abdelouahed
- 348. Pr. KHABOUZE Samira
- 349. Pr. KHARMAZ Mohamed
- 350. Pr. LEZREK Mohammed*
- 351. Pr. MOUGHIL Said
- 352. Pr. NAOUMI Asmae*
- 353. Pr. SAADI Nozha
- 354. Pr. SASSENOU ISMAIL*
- 355. Pr. TARIB Abdelilah*
- 356. Pr. TIJAMI Fouad
- 357. Pr. ZARZUR Jamila

Ophtalmologie
Anatomie Pathologique
Oto-Rhino-Laryngologie
Gastro-Entérologie
Chimie Analytique
Anesthésie Réanimation
Stomatologie et Chirurgie Maxillo-faciale
Neurologie
Traumatologie Orthopédie
Anatomie Pathologique
Radiologie
Gynécologie Obstétrique
Pédiatrie
Cardiologie
Chirurgie Générale
Pédiatrie
Ophtalmologie
Gynécologie Obstétrique
Traumatologie Orthopédie
Urologie
Chirurgie Cardio-Vasculaire
Ophtalmologie
Gynécologie Obstétrique
Gastro-Entérologie
Pharmacie Clinique
Chirurgie Générale
Cardiologie

Janvier 2005

- 358. Pr. ABBASSI Abdellah
- 359. Pr. AL KANDRY Sif Eddine*
- 360. Pr. ALAOUI Ahmed Essaid
- 361. Pr. ALLALI Fadoua
- 362. Pr. AMAR Yamama
- 363. Pr. AMAZOUZI Abdellah
- 364. Pr. AZIZ Nouredine*

Chirurgie Réparatrice et Plastique
Chirurgie Générale
Microbiologie
Rhumatologie
Néphrologie
Ophtalmologie
Radiologie

365. Pr. BAHIRI Rachid
 366. Pr. BARKAT Amina
 367. Pr. BENHALIMA Hanane
 368. Pr. BENHARBIT Mohamed
 369. Pr. BENYASS Aatif
 370. Pr. BERNOUSSI Abdelghani
 371. Pr. BOUKLATA Salwa
 372. Pr. CHARIF CHEFCHAOUNI Mohamed
 373. Pr. DOUDOUH Abderrahim*
 374. Pr. EL HAMZAoui Sakina
 375. Pr. HAJJI Leila
 376. Pr. HESSISSEN Leila
 377. Pr. JIDAL Mohamed*
 378. Pr. KARIM Abdelouahed
 379. Pr. KENDOSSI Mohamed*
 380. Pr. LAAROUSSI Mohamed
 381. Pr. LYAGOUBI Mohammed
 382. Pr. NIAMANE Radouane*
 383. Pr. RAGALA Abdelhak
 384. Pr. SBIHI Souad
 385. Pr. TNACHERI OUAZZANI Btissam
 386. Pr. ZERAIDI Najia

Rhumatologie
 Pédiatrie
 Stomatologie et Chirurgie Maxillo Faciale
 Ophtalmologie
 Cardiologie
 Ophtalmologie
 Radiologie
 Ophtalmologie
 Biophysique
 Microbiologie
 Cardiologie
 Pédiatrie
 Radiologie
 Ophtalmologie
 Cardiologie
 Chirurgie Cardio-vasculaire
 Parasitologie
 Rhumatologie
 Gynécologie Obstétrique
 Histo-Embryologie Cytogénétique
 Ophtalmologie
 Gynécologie Obstétrique

AVRIL 2006

423. Pr. ACHEMLAL Lahsen*
 424. Pr. AFIFI Yasser
 425. Pr. AKJOUJ Said*
 426. Pr. BELGNAoui Fatima Zahra
 427. Pr. BELMEKKI Abdelkader*
 428. Pr. BENCHEIKH Razika
 429. Pr. BIYI Abdelhamid*
 430. Pr. BOUHAFS Mohamed El Amine
 431. Pr. BOULAHYA Abdellatif*
 432. Pr. CHEIKHAoui Younes
 433. Pr. CHENGUETI ANSARI Anas
 434. Pr. DOGHMI Nawal
 435. Pr. ESSAMRI Wafaa
 436. Pr. FELLAT Ibtissam
 437. Pr. FAROUDY Mamoun
 438. Pr. GHADOUANE Mohammed*
 439. Pr. HARMOUCHE Hicham
 440. Pr. HANAFI Sidi Mohamed*
 441. Pr. IDRIS LAHLOU Amine
 442. Pr. JROUNDI Laila
 443. Pr. KARMOUNI Tariq

Rhumatologie
 Dermatologie
 Radiologie
 Dermatologie
 Hématologie
 O.R.L
 Biophysique
 Chirurgie - Pédiatrique
 Chirurgie Cardio – Vasculaire
 Chirurgie Cardio – Vasculaire
 Gynécologie Obstétrique
 Cardiologie
 Gastro-entérologie
 Cardiologie
 Anesthésie Réanimation
 Urologie
 Médecine Interne
 Anesthésie Réanimation
 Microbiologie
 Radiologie
 Urologie

444. Pr. KILI Amina

445. Pr. KISRA Hassan

446. Pr. KISRA Mounir

447. Pr. KHARCHAFI Aziz*

448. Pr. LAATIRIS Abdelkader*

449. Pr. LMIMOUNI Badreddine*

450. Pr. MANSOURI Hamid*

451. Pr. NAZIH Naoual

452. Pr. OUANASS Abderrazzak

453. Pr. SAFI Soumaya*

454. Pr. SEKKAT Fatima Zahra

455. Pr. SEFIANI Sana

456. Pr. SOUALHI Mouna

457. Pr. TELLAL Saida*

458. Pr. ZAHRAOUI Rachida

Octobre 2007

458. Pr. LARAQUI HOUSSEINI Leila

459. Pr. EL MOUSSAOUI Rachid

460. Pr. MOUSSAOUI Abdelmajid

461. Pr. LALAOUI SALIM Jaafar *

462. Pr. BAITE Abdelouahed *

463. Pr. TOUATI Zakia

464. Pr. OUZZIF Ez zohra *

465. Pr. BALOUCH Lhousaine *

466. Pr. SELKANE Chakir *

467. Pr. EL BEKKALI Youssef *

468. Pr. AIT HOUSSA Mahdi *

469. Pr. EL ABSI Mohamed

470. Pr. EHIRCHIOU Abdelkader *

471. Pr. ACHOUR Abdessamad *

472. Pr. TAJDINE Mohammed Tariq*

473. Pr. GHARIB Noureddine

474. Pr. TABERKANET Mustafa *

475. Pr. ISMAILI Nadia

476. Pr. MASRAR Azlarab

477. Pr. RABHI Monsef *

478. Pr. MRABET Mustapha *

479. Pr. SEKHSOKH Yessine *

480. Pr. SEFFAR Myriame

481. Pr. LOUZI Lhoussain *

482. Pr. MRANI Saad *

483. Pr. GANA Rachid

484. Pr. ICHOU Mohamed *

Pédiatrie

Psychiatrie

Chirurgie – Pédiatrique

Médecine Interne

Pharmacie Galénique

Parasitologie

Radiothérapie

O.R.L

Psychiatrie

Endocrinologie

Psychiatrie

Anatomie Pathologique

Pneumo – Phtisiologie

Biochimie

Pneumo – Phtisiologie

Anatomie pathologique

Anesthésie réanimation

Anesthésier réanimation

Anesthésie réanimation

Anesthésie réanimation

Cardiologie

Biochimie

Biochimie

Chirurgie cardio vasculaire

Chirurgie cardio vasculaire

Chirurgie cardio vasculaire

Chirurgie générale

Chirurgie générale

Chirurgie générale

Chirurgie générale

Chirurgie plastique

Chirurgie vasculaire périphérique

Dermatologie

Hématologie biologique

Médecine interne

Médecine préventive santé publique et hygiène

Microbiologie

Microbiologie

Microbiologie

Virologie

Neuro chirurgie

Oncologie médicale

485. Pr. TACHFOUTI Samira
 486. Pr. BOUTIMZINE Nourdine
 487. Pr. MELLAL Zakaria
 488. Pr. AMMAR Haddou *
 489. Pr. AOUIFI Sarra
 490. Pr. TLIGUI Houssain
 491. Pr. MOUTAJ Redouane *
 492. Pr. ACHACHI Leila
 493. Pr. MARC Karima
 494. Pr. BENZIANE Hamid *
 495. Pr. CHERKAOUI Naoual *
 496. Pr. EL OMARI Fatima
 497. Pr. MAHI Mohamed *
 498. Pr. RADOUANE Bouchaib*
 499. Pr. KEBDANI Tayeb
 500. Pr. SIFAT Hassan *
 501. Pr. HADADI Khalid *
 502. Pr. ABIDI Khalid
 503. Pr. MADANI Naoufel
 504. Pr. TANANE Mansour *
 505. Pr. AMHAJJI Larbi *

Ophtalmologie
 Ophtalmologie
 Ophtalmologie
 ORL
 Parasitologie
 Parasitologie
 Parasitologie
 Pneumo phtisiologie
 Pneumo phtisiologie
 Pharmacie clinique
 Pharmacie galénique
 Psychiatrie
 Radiologie
 Radiologie
 Radiothérapie
 Radiothérapie
 Radiothérapie
 Réanimation médicale
 Réanimation médicale
 Traumatologie orthopédie
 Traumatologie orthopédie

Mars 2009

Pr. BJIJOU Younes
 Pr. AZENDOUR Hicham *
 Pr. BELYAMANI Lahcen*
 Pr. BOUHSAIN Sanae *
 Pr. OUKERRAJ Latifa
 Pr. LAMSAOURI Jamal *
 Pr. MARMADE Lahcen
 Pr. AMAHZOUNE Brahim*
 Pr. AIT ALI Abdelmounaim *
 Pr. BOUNAIM Ahmed *
 Pr. EL MALKI Hadj Omar
 Pr. MSSROURI Rahal
 Pr. CHTATA Hassan Toufik *
 Pr. BOUI Mohammed *
 Pr. KABBAJ Nawal
 Pr. FATHI Khalid
 Pr. MESSAOUDI Nezha *
 Pr. CHAKOUR Mohammed *
 Pr. DOGHMI Kamal *
 Pr. ABOUZAHIR Ali*
 Pr. ENNIBI Khalid *
 Pr. EL OUENNASS Mostapha

Anatomie
 Anesthésie Réanimation
 Anesthésie Réanimation
 Biochimie
 Cardiologie
 Chimie Thérapeutique
 Chirurgie Cardio-vasculaire
 Chirurgie Cardio-vasculaire
 Chirurgie Générale
 Chirurgie Générale
 Chirurgie Générale
 Chirurgie Générale
 Chirurgie Vasculaire Périphérique
 Dermatologie
 Gastro-entérologie
 Gynécologie obstétrique
 Hématologie biologique
 Hématologie biologique
 Hématologie clinique
 Médecine interne
 Médecine interne
 Microbiologie

Pr. ZOUHAIR Said*
 Pr. L'kassimi Hachemi*
 Pr. AKHADDAR Ali *
 Pr. AIT BENHADDOU El hachmia
 Pr. AGADR Aomar *
 Pr. KARBOUBI Lamya
 Pr. MESKINI Toufik
 Pr. KABIRI Meryem
 Pr. RHORFI Ismail Abderrahmani *
 Pr. BASSOU Driss *
 Pr. ALLALI Nazik
 Pr. NASSAR Ittimade
 Pr. HASSIKOU Hasna *
 Pr. AMINE Bouchra
 Pr. BOUSSOUGA Mostapha *
 Pr. KADI Said *

Microbiologie
 Microbiologie
 Neuro-chirurgie
 Neurologie
 Pédiatrie
 Pédiatrie
 Pédiatrie
 Pédiatrie
 Pneumo-phtisiologie
 Radiologie
 Radiologie
 Radiologie
 Rhumatologie
 Rhumatologie
 Traumatologie orthopédique
 Traumatologie orthopédique

Octobre 2010

Pr. AMEZIANE Taoufiq*
 Pr. ERRABIH Ikram
 Pr. CHERRADI Ghizlan
 Pr. MOSADIK Ahlam
 Pr. ALILOU Mustapha
 Pr. KANOUNI Lamya
 Pr. EL KHARRAS Abdennasser*
 Pr. DARBI Abdellatif*
 Pr. EL HAFIDI Naima
 Pr. MALIH Mohamed*
 Pr. BOUSSIF Mohamed*
 Pr. EL MAZOUZ Samir
 Pr. DENDANE Mohammed Anouar
 Pr. EL SAYEGH Hachem
 Pr. MOUJAHID Mountassir*
 Pr. RAISSOUNI Zakaria*
 Pr. BOUAITY Brahim*
 Pr. LEZREK Mounir
 Pr. NAZIH Mouna*
 Pr. LAMALMI Najat
 Pr. ZOUAIDIA Fouad
 Pr. BELAGUID Abdelaziz
 Pr. DAMI Abdellah*
 Pr. CHADLI Mariama*

Médecine interne
 Gastro entérologie
 Cardiologie
 Anesthésie Réanimation
 Anesthésie réanimation
 Radiothérapie
 Radiologie
 Radiologie
 Pédiatrie
 Pédiatrie
 Médecine aérologique
 Chirurgie plastique et réparatrice
 Chirurgie pédiatrique
 Urologie
 Chirurgie générale
 Traumatologie orthopédie
 ORL
 Ophtalmologie
 Hématologie
 Anatomie pathologique
 Anatomie pathologique
 Physiologie
 Biochimie chimie
 Microbiologie

ENSEIGNANTS SCIENTIFIQUES
PROFESSEURS

1. Pr. ABOUDRAR Saadia
2. Pr. ALAMI OUHABI Naima
3. Pr. ALAOUI KATIM
4. Pr. ALAOUI SLIMANI Lalla Naïma
5. Pr. ANSAR M'hammed
6. Pr. BOUKLOUZE Abdelaziz
7. Pr. BOUHOUCHE Ahmed
8. Pr. BOURJOUANE Mohamed
9. Pr. CHAHED OUZZANI Lalla Chadia
10. Pr. DAKKA Taoufiq
11. Pr. DRAOUI Mustapha
12. Pr. EL GUESSABI Lahcen
13. Pr. ETTAIB Abdelkader
14. Pr. FAOUZI Moulay El Abbas
15. Pr. HMAMOUCHE Mohamed
16. Pr. IBRAHIMI Azeddine
17. Pr. KABBAJ Ouafae
18. Pr. KHANFRI Jamal Eddine
19. Pr. REDHA Ahlam
20. Pr. OULAD BOUYAHYA IDRIS Med
21. Pr. TOUATI Driss
22. Pr. ZAHIDI Ahmed
23. Pr. ZELLOU Amina

Physiologie
Biochimie
Pharmacologie
Histologie-Embryologie
Chimie Organique et Pharmacie Chimique
Applications Pharmaceutiques
Génétique Humaine
Microbiologie
Biochimie
Physiologie
Chimie Analytique
Pharmacognosie
Zootechnie
Pharmacologie
Chimie Organique
Biotechnologie
Biochimie
Biologie
Biochimie
Chimie Organique
Pharmacognosie
Pharmacologie
Chimie Organique

**** Enseignants Militaires***

DEDICACE

Je dédie cette thèse

A mes précieux parents qui m'ont toujours soutenu
et qui ont toujours cru à ma réussite.

Veuillez accepter très cher Père et très chère Mère
Ce travail, qui est l'un de vos fruits.

A mon frère Zakaria,

A mes deux sœurs Ibtissam et Salma.

A mes meilleurs amis Issa et Mehdi.

Sans oublier, mes amis Pharmaciens de la promotion 2007/2008
de la faculté de Médecine et de Pharmacie de Rabat.

REMERCIEMENTS

A notre Maître Président de thèse
Mr. Redouane ABOUQAL
Professeur de Réanimation médicale

Vous nous avez accordé un immense honneur en acceptant la présidence de notre jury de thèse.

Veillez, cher Maître d'accepter notre profonde reconnaissance et notre sincère respect.

A notre Maître Rapporteur de thèse
Mr. Yahya BENSOUDA
Professeur de Pharmacie galénique

Nous vous remercions pour la gentillesse et la spontanéité avec les quelles vous avez bien voulu diriger ce travail.

Vous nous avez reçus en toute circonstance avec bien vaillance, et cela malgré vos engagements et vos responsabilités.

Veillez accepter cher maître nos vifs remerciements pour la compréhension que vous nous avez apporté durant l'élaboration de cette thèse.

A notre Maître Membre de Jury

Mme. Malika CAOUI

Professeur de Biophysique

C'est pour nous un grand honneur que vous acceptiez de siéger parmi notre honorable jury.

Votre qualité d'enseignant nous a énormément imprégnée, votre sympathie et votre gentillesse resteront pour le meilleur exemple.

Permettez-nous cher Maître de vous exprimer nos remerciements les plus sincères.

A notre Maître Membre de Jury

Mr. Badreddine LMIMOUNI

Professeur de Parasitologie

Votre assistance parmi les membres de notre jury de thèse nous honore.

Votre sérieux et votre compétence professionnelle seront pour nous un exemple dans l'exercice de notre profession.

Croyez cher Maître en notre sincère gratitude et pour l'estime qu'on vous porte.

Je remercie chaleureusement
Mr. Omar ELMRABET
Directeur de qualité chez Pfizer

Pour tous l'aide et le temps qu'il ma offert durant les petites réunions qu'on faisait ensemble, et à travers les quelles j'ai pu découvrir les Six Sigma entant qu'une démarche de résolution de problème permettant aux industriels de réaliser des percées.

Permettez-moi de vous exprimez encore une fois mes remerciements les plus sincères.

SOMMAIRE

Introduction	1
Chapitre 1	
Six Sigma, un outil de la performance	3
1. Six Sigma ?	4
1.1 Histoire	4
1.2 Origine de l'appellation	5
1.3 L'objectif de Six Sigma	6
1.4 Six Sigma entre l'amélioration continue et l'amélioration par percée...8	
2. Six Sigma dans un environnement qualité	10
2.1 Six Sigma dans un contexte ISO 9000.....	10
2.2 Six Sigma et la variabilité.....	11
3. Six Sigma dans un environnement Lean Management	12
Chapitre 2	
Six Sigma, une méthode de maîtrise de la variabilité	16
1. La satisfaction des clients	17
2. Réduire la variabilité	18
3. Mesurer le niveau de qualité de l'entreprise	20
3.1 La notion d'opportunité de défaut	20
3.2 L'origine des 3,4 ppm (produit par million).....	21
4. Six Sigma : une méthode de maîtrise de la variabilité DMAICS	23
4.1 La démarche DMAICS	23
Chapitre 3	
L'équipe Six Sigma	26
1. Les différents niveaux de pilotage.....	27
2. Les différents rôles	28
3. Le groupe Six Sigma	32
3.1 Définition du groupe Six Sigma	32

3.2 La place du Black Belt dans le groupe.....	33
3.3 Conditions de bon fonctionnement du groupe de travail	34

Chapitre 4

Les concepts Six Sigma	37
-------------------------------------	-----------

➤ **Etape 1 - Définir**

1. Identifier les CTQ (Critical To Quality).....	38
1.1 Ecouter la voix du client	38
1.2 Le diagramme CTQ	40
1.3 Classification de Kano.....	41
1.4 Diagramme « Exigences/Performance »	43
1.5 La matrice QFD (Quality Function Deployment)	45
2. Cartographier le processus	49
2.1 Boîte noir	50
2.2 Diagramme SIPOC	50
2.3 Logigrammes	51
3. Définir les limites du projet	52
3.1 Diagramme des « 5 pourquoi ? »	53
3.2 Diagramme « Est/N'est pas »	56
3.3 Diagramme « Dedans/Dehors »	57

➤ **Etape 2 - Mesurer**

1. Mesurer les CTQ	60
1.1 Définitions	61
1.2 Analyse du système de mesure (MSA)	62
2. Mesurer le processus	72
2.2 Analyse des 5M du processus.....	72
2.2 Figer les éléments non maîtrisés	73
2.3 Etablir la matrice d'impact	75
3. Estimer le z du processus	77
3.1 Représentation graphique des Y	77
3.2 Calcul des paramètres de position et de dispersion.....	78

3.3 Détermination du z à partir d'un échantillon	79
4. Le concept de capabilité	82
4.1 Capabilité et performance du processus	83
4.1.1 Performance du processus : Pp et Ppk	
4.1.2 Capabilité du processus Cp et Cpk	
4.1.3 Des indicateurs liés à la cible : le Cpm et le Ppm	
4.2 La chute de capabilité	92

➤ Etape 3 - Analyser

1. Représentation graphique des données	96
1.1 La boîte à moustache	97
1.2 Le diagramme multi-vari	98
2. Statistique descriptive	102
2.1 Paramètres de position	103
2.2 Paramètres d'échelle	104
3. Statistique inférentielle – Test de comparaison	106
3.1 Les tests de comparaison	106
3.1.1 Test d'hypothèse	106
3.1.2 Les test de comparaison (les différents tests)	110
4. Analyse de la variance	120
4.1 Analyse de la variance sur un facteur	120
4.1.1 Principe	120
4.1.2 Décomposition de la variance	121
4.1.3 Tableau d'analyse de la variance	124
5. L'Etude de corrélations	125
5.1 La régression linéaire	126
5.1.1 Identification des coefficients α_0 et α_1	127
5.1.2 Test de Student sur les coefficients	129
5.1.3 Coefficient de détermination R^2	131

➤ **Etape 4 - Innover/Améliorer**

1. Générer des solutions	132
1.1 Le déballage d'idées (Brainstorming)	132
1.1 Le vote pondéré	133
2. Les Plans d'expériences et les graphes de TAGUCHI	135
2.1 Les Plans d'expériences complets	135
2.1.1 Etude d'un phénomène	135
2.1.2 Le problème des plans complets	142
2.2 Les Plans d'expériences fractionnaires orthogonaux	143
2.2.1 Etude sur l'exemple d'un « Pistolet à peinture »	144
3. Analyse des risques – AMDEC	156
3.1 Le principe de base	156
3.2 Notion de mode de défaillance	157
3.3 Notation d'un mode de défaillance	159
3.4 Le support graphique de l'AMDEC	161

➤ **Etape 5 - Contrôler**

1. Valider les spécifications	163
1.1 Détermination des tolérances par corrélation	164
1.1.1 Méthode graphique	164
1.1.2 Méthode statistique	166
2. Processus « sous-contrôle »	167
2.1 Les causes communes et les causes spéciales	167
2.2 Le principe d'une carte de contrôle	169
3. Cartes de contrôles	171
3.1 Carte aux valeurs individuelles/étendues glissantes	171
3.2 Carte de contrôle moyennes/étendues	173
3.3 Carte de contrôle moyennes et écarts types	177
3.4 Interprétation des cartes de contrôle	179
3.5 Carte EWMA (Exponentially Weighted Moving Average)	181

➤ **Etape 6 - Standardiser**

1. Les principes de base de la pérennisation d'une action	185
1.1 Principe n°1 – L'état organique	185
1.2 Principe n°2 – La contrepartie	187
1.3 Principe n°3 – La facilitation	187
2. Le changement vers la pérennisation	189
3. L'audit de pérennité	190
3.1 Objectif de l'audit	190
3.1 Grille d'audit	191
4. Mettre en place le cliquet anti-retour	193
5. Communiquer	194
5.1 Préparer un bilan du projet	194
5.2 Présenter le bilan	195

Conclusion	196
------------------	-----

ANNEXE

BIBLIOGRAPHIE

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURES :

Chapitre 1 : Six Sigma, un outil de la performance

Figure 1 : Distribution normale	5
Figure 2 : Amélioration du processus après Six Sigma	8
Figure 3 : Complémentarité Lean-Six Sigma	13
Figure 4 : Les sept principales sources de gaspillage (Les 7 Muda)	14
Figure 5 : Réduction des cycles de production avec Lean-Six Sigma	15

Chapitre 2 : Six Sigma, une méthode de la maîtrise de la variabilité

Figure 6 : Réduire la variabilité	19
Figure 7 : Niveau Six Sigma	22
Figure 8 : Décalage de 1,5 sigma	22
Figure 9 : Les six étapes DMAICS de la démarche Six Sigma	23

Chapitre 3 : L'équipe Six Sigma

Figure 10 : Les différents niveaux de pilotage	27
--	----

Chapitre 4 : Les concepts Six Sigma

➤ Etape 1 : Définir

Figure 11 : Modèle de Kano	41
Figure 12 : Diagramme « Exigences/Performances »	44
Figure 13 : La maison de qualité	45
Figure 14 : Exemple de matrice QFD sur un stylo bille	47

Figure 15 : Boîte noire d'une activité	50
Figure 16 : SIPOC d'un processus de production d'un comprimé nus	51
Figure 17 : Cartographie matricielle	52
Figure 18 : Diagramme des « 5 pourquoi »	55
Figure 19 : Diagramme « Est/N'est pas »	56
Figure 20 : Diagramme « Dedans/Dehors »	57

➤ Etape 2 : Mesurer

Figure 21 : Décomposition de la dispersion vue	61
Figure 22 : Termes du MSA	63
Figure 23 : Test de linéarité	64
Figure 24 : Diagramme des 5M (Diagramme d'Ishikawa)	72
Figure 25 : Matrice d'impact	76
Figure 26 : Histogramme	77
Figure 27 : Représentation d'une gaussienne et calcul des estimateurs ...	78
Figure 28 : Loi normale et capacité	79
Figure 29 : Relation entre le z et proportion hors tolérance	80
Figure 30 : Relation entre le z et proportion de non conformes	80
Figure 31 : Courbe d'efficacité des cartes de contrôle	81
Figure 32 : Dispersion court terme et dispersion long terme	83
Figure 33 : L'indicateur Pp	85
Figure 34 : Nécessité d'un indicateur Ppk	86
Figure 35 : Procédé dérégulé du côté supérieur à la moyenne	87
Figure 36 : Fonction perte de Taguchi	89
Figure 37 : Indice Cpm	91

Figure 38 : Chute des capacités	92
Figure 39 : L'origine de la non-qualité	93
Figure 40 : Chute entre Cp et Pp	94

➤ **Etape 3 : Analyser**

Figure 41 : Etape Analyser	95
Figure 42 : Boîte à moustache d'un relevé de données	97
Figure 43 : Type de variations	99
Figure 44 : Multi-vari	101
Figure 45 : Répartition de Gauss	102
Figure 46 : Intervalle de confiance sur les moyennes	103
Figure 47 : Test de Fisher Snedecor	124
Figure 48 : Les types de corrélations	126
Figure 49 : Droite de régression	127

➤ **Etape 4 : Innover/Améliorer**

Figure 50 : Méthode traditionnelle	136
Figure 51 : Notion d'interaction	137
Figure 52 : Les deux stratégies	138
Figure 53 : Graphe des effets et des interactions	141
Figure 54 : Propriété d'orthogonalités	144
Figure 55 : Schématisation du système étudié	145
Figure 56 : Triangle des interactions entre tous les colonnes	149
Figure 57 : Graphes linéaires de la table L_8	149
Figure 58 : Graphe des effets	152

Figure 59 : Graphe des interactions	152
Figure 60 : Graphe des effets et des interactions du système étudié	153
Figure 61 : Présentation tridimensionnelle	154
Figure 62 : L'importance de la prévention	156
Figure 63 : Mode de défaillance	158
Figure 64 : Evaluation des défaillances et calcul du NPR	160

➤ **Etape 5 : Contrôler**

Figure 65 : Relation de corrélation entre X et Y	164
Figure 66 : Enveloppe de la corrélation	165
Figure 67 : Parallélogramme des tolérances	165
Figure 68 : Procédé avec dérive	167
Figure 69 : Causes communes et causes spéciales	168
Figure 70 : Limites naturelles du processus	170
Figure 71 : Cartes aux valeurs individuelles/étendues glissantes	172
Figure 72 : Courbe d'efficacité des cartes de contrôle	174
Figure 73 : Cartes Moyennes/étendues	176
Figure 74 : Cartes Moyennes/écarts types	178
Figure 75 : Carte de contrôle EWMA	181

➤ **Etape 6 : Standardiser**

Figure 76 : Les trois principes de pérennisation	188
Figure 77 : L'évolution vers l'état organique	189
Figure 78 : Suivi des capacités	193

TABLEAUX :

Chapitre 2 : Six Sigma, une méthode de la maîtrise de la variabilité

Tableau 1 : Tableau du nombre de non-conformités en fonction du sigma21

Tableau 2 : DMAICS24

Chapitre 4 : Les concepts Six Sigma

➤ Etape 1 : Définir

Tableau 3 : Diagramme CTQ40

Tableau 4 : Questionnaire de Kano43

➤ Etape 2 : Mesurer

Tableau 5 : Données d'une étude de linéarité64

Tableau 6 : Equation de régression65

Tableau 7 : Biais par position65

Tableau 8 : Réduction des sources de variation74

Tableau 9 : Défauts par million en fonction du niveau de qualité z82

➤ Etape 3 : Analyser

Tableau 10 : Données du diagramme multi-vari99

Tableau 11 : Coefficient d_2 pour l'estimation de σ à partir de $\bar{R}$ 105

Tableau 12 : Coefficient C_4 pour l'estimation de σ à partir de $\bar{S}$ 105

Tableau 13 : Risque alpha (α) et risque bêta (β)108

Tableau 14 : Les différents tests110

Tableau 15 : Tableau d'ANAVAR124

Tableau 16 : Calcul des résidus « e_i »130

Tableau 17 : Test de Student	130
------------------------------------	-----

➤ **Etape 4 : Innover/Améliorer**

Tableau 18 : Résultat d'un vote pondéré	134
---	-----

Tableau 19 : Recensement des facteurs	146
---	-----

Tableau 20 : Table $L_8 (2^7)$	148
--------------------------------------	-----

Tableau 21 : Réalisation du Plan d'expériences	151
--	-----

Tableau 22 : Feuille d'analyse pour une AMDEC processus	161
---	-----

➤ **Etape 5 : Contrôler**

Tableau 23 : Calcul de l'étendue glissante	169
--	-----

Tableau 24 : Tableau des coefficients : cartes Valeurs/Etendues	175
---	-----

Tableau 25 : Tableau des coefficients : cartes Moyennes/Etendues	173
--	-----

Tableau 26 : Tableau des coefficients : cartes des écarts types	178
---	-----

Tableau 27 : Les règles de pilotage des cartes de contrôle	180
--	-----

➤ **Etape 6 : Standardiser**

Tableau 28 : Grille d'audit	192
-----------------------------------	-----

ABBREVIATION

- MSP : Maîtrise Statistique des processus
- TRS : Taux de Rendement Synthétique.
- ISO : International Organisation for Standardisation.
- DMAICS: Définir, Mesurer, Analyser, Innover, Contrôler, Standardiser.
- CTQ : Critical To Quality.
- DPMO : Défaut par million d'opportunité.
- Ppm : Produit par million.
- C : Champion
- BB : Black Belt
- GB : Green Belt
- WB : White Belt
- MBB : Master Black Belt
- QFD : Quality Function Deployment
- SIPOC : Supplier, Input, Process, Output, Customer
- QQQQCP: Qui, Quoi, Où, Quand, Comment, Pourquoi.
- SAV : Service Après Vente.
- MSA : Measurement System Analysis
- EV : Equipement Variation
- AV : Appraiser Variation
- GRR : Gage Repeatability & Reproducibility
- NCD : Nombre de Catégorie Distinctes
- P/T : Processus/Tolérance

- CS : Coefficient de Satisfaction
- D_{LT} : Dispersion long terme
- D_{CT} : Dispersion court terme
- Cp : Capabilité du Processus
- Pp : Performance du Processus
- LSS : Limite de spécification Supérieure
- LSI : Limite de spécification Inférieure
- Rs : Rendement de Stabilité
- Rr : Rendement de Réglage
- ANAVAR : Analyse de Variance
- PE : Plan d'Expériences
- AMDEC : Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité
- NPR : Niveau de Priorité de Risque
- EWMA : Exponentially Weighted Moving Average
- IEMSE : Inexistence, Existence, Méthodes, Systématique, Exemplarité

Introduction

Six Sigma est une approche globale de la performance industrielle et des services rendus aux clients. Cette approche globale de la qualité permet d'apporter un accroissement de la rentabilité à l'entreprise. Six Sigma se décline de plusieurs façons, c'est :

- Une certaine philosophie de la qualité tournée vers la satisfaction totale du client ;
- Un indicateur de performance (le z du procédé qui doit atteindre le niveau 6) permettant de savoir où se situe l'entreprise en matière de qualité ;
- Une méthode de résolution de problèmes permettant de réduire la variabilité sur les produits ;
- 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.

L'approche de résolution de problème utilisée dans Six Sigma est structurée en six étapes :

1. **Définir** : L'amélioration par percée demande un investissement important ; on doit être capable de justifier la rentabilité d'une telle étude.
2. **Mesurer** : On ne sait rien faire si on ne sait pas mesurer. On cherchera donc à caractériser le problème par une mesure et par des relevés de données.
3. **Analyser** : Rechercher la cause racine, faire apparaître les relations entre les entrées et le sorties.
4. **Améliorer** : Mettre en œuvre les actions d'amélioration et prouver que ces actions ont été efficaces.
5. **Contrôler** : Formaliser le processus, et mettre sous contrôle la solution retenue.
6. **Standardiser** : Pérenniser la solution, déployer les bonnes pratiques et clôture du projet.

Centrée autour des hommes auxquels on aura donné cette compétence, organisée en gestion de projet, outillée d'une démarche de résolution de problème, l'approche Six Sigma est d'une redoutable efficacité pour réaliser des percées.

Chapitre 1

1 Six Sigma, un outil de la performance

Six Sigma est une stratégie qui s'adapte naturellement aux secteurs dont le fonctionnement est basé sur le mode « Processus », notamment le secteur industriel, et plus particulièrement l'industrie pharmaceutique.

La méthode Six Sigma permet, par la mesure et l'analyse des causes de dérive du process, de fiabiliser l'organisation d'une entreprise et de mieux répondre aux besoins du client final.

1. Six Sigma ?

1.1 Histoire

Initié aux Etats-Unis dans les années 1980 chez **Motorola**. Les bases de la démarche Six Sigma ont été posées par l'extension de l'usage des concepts de la Maîtrise Statistique de Processus (MSP/SPC) et s'est ensuite élargie en intégrant tous les aspects de la maîtrise de la variabilité.

La méthode Six Sigma devient célèbre dans les années 1990 lorsque **General Electric** décide de l'appliquer et de l'améliorer.

Dans les années 1996-98, Six Sigma s'est diffusée par la suite dans les autres entreprises : **Nokia, Sony, Toshiba, Ford Motor, Whirlpool**, etc.

Aujourd'hui, Six Sigma est reconnue sur l'ensemble de l'Europe.

Au Maroc, Six Sigma est appliquée dans l'industrie pharmaceutique chez **Pfizer** et **GSK**. Et commence à trouver sa place dans les autres entreprises notamment chez la Royal Air Maroc (La **RAM**).

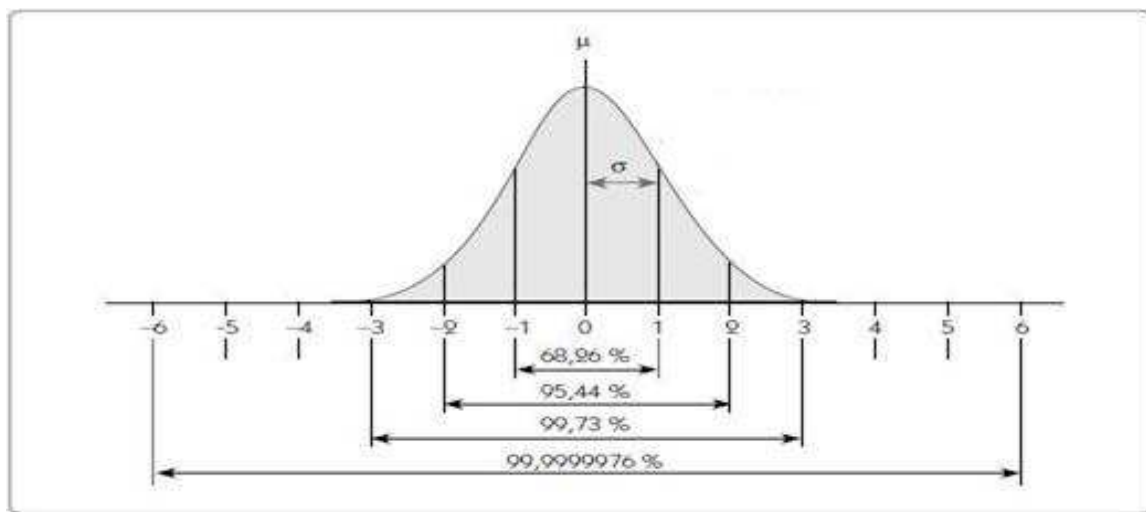
1.2 Origine de l'appellation

En statistique, la lettre sigma σ désigne l'écart type, dont la formule est la suivante :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Six Sigma (6σ) signifie donc six fois l'écart type. Prenons l'exemple d'une distribution normale.

Figure 1.1 – Distribution normale :



Le principe de la méthode consiste à faire en sorte que tous les éléments issus du processus étudié, soient compris dans un intervalle s'éloignant au maximum de **6 σ** par rapport à la moyenne générale des éléments issus de ce processus.

En réduisant la variabilité des produits du processus, on réduit le risque de voir de produit rejeté par son destinataire car en dehors de ses attentes ou spécifications.

1.3 L'objectif de Six Sigma

Six Sigma est certainement l'approche qui a le plus modifié le comportement qualité des entreprises ces dernières années.

C'est aujourd'hui une approche globale de l'amélioration de la satisfaction des clients, ce qui n'est pas tout à fait la même chose que l'amélioration de la qualité.

Partant de cette meilleure satisfaction du client, la méthodologie Six Sigma apporte un accroissement de la rentabilité à l'entreprise avec les effets cumulés suivants :

- Une diminution des rebuts, retouches et plus généralement des coûts de non-qualité ;
- Une amélioration de la disponibilité des machines et du taux de rendement synthétique¹(TRS) ;
- De meilleures parts de marché consécutif à l'amélioration de la qualité des produits.

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.

1. Le **TRS** est un indicateur de performance utilisé pour évaluer à quel point est utilisée la capacité d'un processus de fabrication.

C'est une combinaison de 3 taux principaux :

TRS= taux de Disponibilité x taux de Performance x taux de Qualité

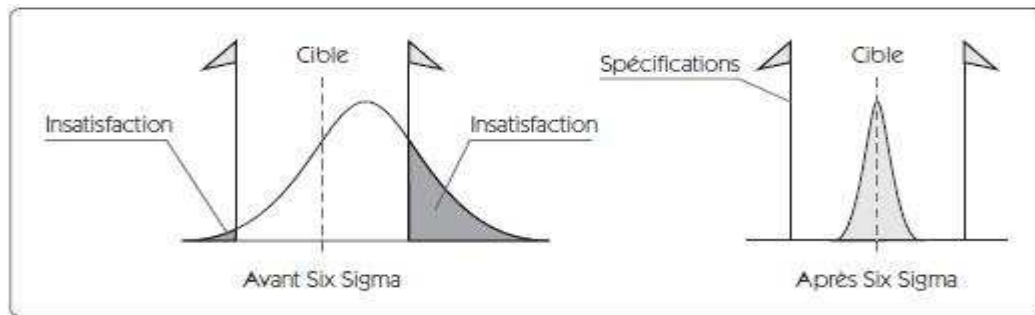
La variabilité est l'ennemi de la qualité. Les trois sources primaires de la variabilité sont :

- Conception pas assez robuste ;
- Matières premières et pièces élémentaires instables ;
- Capabilités des processus insuffisantes.

C'est contre ces trois sources de variabilité que nous devons lutter pour atteindre le niveau de qualité Six Sigma. Pour satisfaire ses clients, une entreprise doit réduire cette variabilité par tous les moyens. Cependant, il n'est pas facile d'agir sur la variabilité d'un processus.

Cela nécessite d'avoir recours à de nombreux outils statistiques tels que les tests de comparaisons, les analyses de la variance, les plans d'expériences, couplé à une démarche de résolution de problème. Si quelques experts sont capables de suivre une telle démarche de manière intuitive, il n'est pas de même de la grande majorité des ingénieurs et techniciens qui ont besoin d'un guide méthodologique pour se retrouver au travers de l'ensemble des outils qualité mis à leur disposition. C'est le premier rôle de Six Sigma: Vulgariser les méthodes et outils de la qualité en fournissant un guide d'utilisation pour permettre au plus grand nombre de réduire la variabilité des processus avec moins de défauts.

Figure 1.2 –Amélioration du processus après Six Sigma



Le fait de mieux formaliser les démarches de résolution de problème ne suffit pas à créer une stratégie d'entreprise. Il faut être capable de démultiplier pour atteindre l'aspect stratégique.

L'impact de Six Sigma dépasse la simple amélioration de la qualité des produits de l'entreprise. Six Sigma a pour objectif d'améliorer la performance globale de l'entreprise au travers de quatre actions :

- L'augmentation de la satisfaction des clients et une plus grande fidélisation par l'amélioration de la qualité ;
- La réduction des dépenses en réduisant fortement le nombre de rebus, retouches et gaspillage ;
- L'optimisation dans 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.

1.4 Six Sigma entre l'amélioration continue et l'amélioration par percée

Si l'on veut réellement progresser, il faut être ambitieux. On n'entreprend pas une démarche Six Sigma pour gagner quelques euros, mais des dizaines de

milliers d'euros. C'est la raison pour laquelle il faut se poser la question avant d'entreprendre une action : est ce que ça vaut le coup (coût) d'y aller ?

Six Sigma n'a pas pour vocation d'être un outil d'amélioration continue.

D'autres approches telles Kaizen² le font déjà très bien. Six Sigma doit permettre d'opérer une véritable *percée*. L'introduction de Six Sigma traduit en partie cette évolution avec la volonté de changer de rythme dans l'amélioration de l'entreprise.

L'amélioration continue est nécessaire, mais les logiques de l'amélioration continue ne permettent pas d'effectuer une percée ; pour cela, il faut procéder à une remise en cause plus fondamentale, il faut remettre à plat le processus, le produit ou les mentalités.

La remarque précédente n'est pas une condamnation de l'amélioration continue, mais on doit parvenir à un équilibre entre les actions de l'amélioration continue et l'amélioration par percée. L'addition de petites améliorations, mais en nombre très importants, contribue à diminuer les facteurs de variabilité du processus et agit finalement de façon considérable sur les coûts et sur les délais.

De plus, ces petites améliorations sont souvent apportées sans qu'il en coûte quoi que ce soit, voir contribuent à la diminution des coûts de gaspillages.

Le plus à même d'améliorer son poste de travail est souvent l'opérateur lui-même.

2. **Kaizen** : C'est la fusion des deux mots japonais *Kai* et *Zen* qui signifient respectivement « changement » et « bon ». La traduction courante est « amélioration continue ».

C'est le principe du Kaizen : mettre en œuvre un processus d'amélioration permanente en utilisant les réflexions et les énergies de tous les personnels. « Lorsqu'on emploie un collaborateur, on emploie une force musculaire mais aussi une force intellectuelle. Si vous vous contentez d'exploiter la force musculaire, quel gâchis ! » Cette réflexion faite par un responsable de l'entreprise Suzuki au Japon, est révélatrice d'une grande différence dans la façon dont une entreprise performante et une entreprise traditionnelle conçoivent le rôle du personnel opérationnel.

2. Six Sigma dans un environnement qualité

2.1 Six Sigma dans un contexte ISO 9000

Durant la dernière moitié du XXe siècle, les hommes ont cherché à mieux formaliser cette notion de « qualité » en s'intéressant à ses deux aspects :

- L'amélioration du résultat, autrement dit en veillant à la qualité du produit ;
- L'amélioration du processus qui conduit au résultat.

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 fortement tournée vers la satisfaction du client au travers d'une organisation en processus.

La mise en place de l'ISO donne une réponse un peu statique à ces questions en décrivant l'organisation des processus en place. Mais elle pose déjà la

question plus dynamique qui concerne les démarches qu'entreprend l'industriel pour améliorer la satisfaction des clients.

En revanche l'ISO ne propose pas et n'impose pas une démarche concrète qui permettrait de créer cette dynamique de progrès.

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 : Caractéristiques critiques pour la qualité) que des entrées.

Ces deux approches semblent au contraire parfaitement complémentaires. La réduction de la variabilité passe par la description des processus et par le fait d'apporter la preuve que les écarts entre la description des processus et les faits sont faibles. C'est le rôle de l'ISO, c'est aussi le rôle de Six Sigma par une démarche volontaire et dynamique de progrès.

2.2 Six Sigma et la variabilité

La notion de qualité est étroitement liée à celle de variabilité. Or la lutte contre la variabilité est un des concepts de base de Six Sigma. Toute variabilité importante qui affecte la conformité d'un produit ou d'un composant doit alimenter les deux moteurs du progrès de l'entreprise : l'amélioration continue et l'amélioration par percée. Chaque non-conformité qui apparaît dans le processus est révélatrice d'une faiblesse de ce dernier. Lorsqu'une non-conformité est mise au jour, deux principes doivent s'appliquer :

- **Principe de l'iceberg :** l'information contenue dans la non-conformité est révélatrice d'un problème sans doute beaucoup plus grave. La non-conformité visible n'est que la partie visible d'un iceberg.

En quoi mon système de production a-t-il failli ? Comment faire pour que ce problème n'arrive plus ? Pour répondre à ces questions on doit s'assurer de remonter à la source du problème.

Ohno, le grand maître japonais de la qualité et de gestion de production, préconise de se poser cinq fois la question « Pourquoi ? » afin de bien remonter à la racine du problème. Un défaut doit être paradoxalement le bienvenu car c'est une source de progrès.

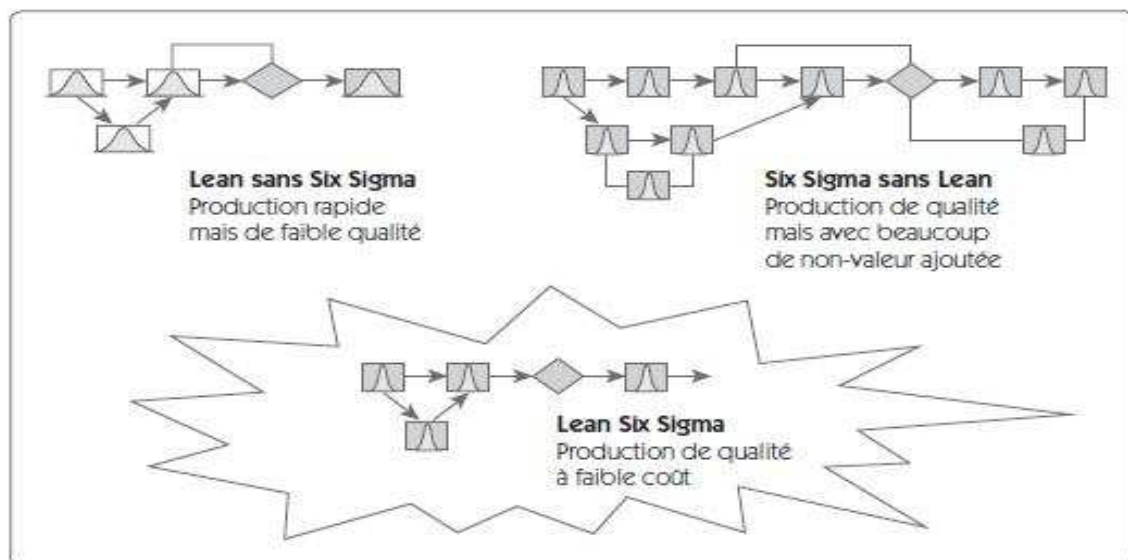
- **Principe de la bougie magique :** une non-conformité est comme une bougie magique, on a beau l'éteindre, elle se rallume toujours ! Pour réellement pouvoir l'éteindre, il faut aller plus loin que les actions traditionnelles, il ne suffit pas de souffler dessus. 80% des défauts traités par les services qualité sont des problèmes récurrents. Il faut une analyse fine de chaque non-conformité. Est-ce du domaine de l'amélioration continue ? de la percée ? En quoi les modifications apportées au processus ou au produit me donnent la garantie que j'ai éteint de manière définitive la bougie ?

3. Six Sigma dans un environnement Lean Management

Le *lean Management* a pour objectif d'améliorer la performance industrielle tout en dépensant moins. Le problème est un peu le même que pour un sportif qui cherche à obtenir une performance maximale en réduisant le plus possible l'énergie consommée. Pour illustrer cette comparaison, prenons le cas d'un

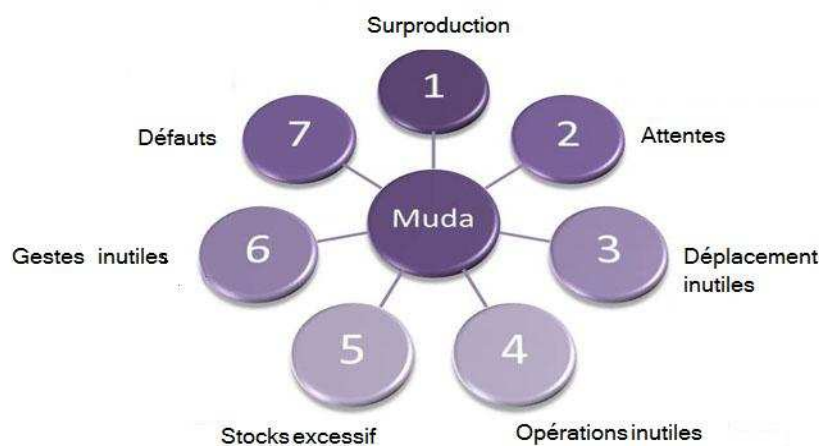
débutant en ski de fond qui exécute un « pas de skating ». Maîtrisant mal son équilibre, il va dépenser une énergie considérable qui ne se traduit pas en vitesse d'avancement, et il sera épuisé après quelques kilomètres. Au fur et à mesure de ses progrès dans la justesse de ses gestes, dans son équilibre, dans la lecture de la piste, il va pouvoir concentrer son énergie sur la seule performance utile : sa vitesse d'avancement. Au total, pour la même dépense énergétique, on peut facilement multiplier sa vitesse par un facteur 3 simplement en éliminant les gaspillages énergétiques. Le même problème se pose aux entreprises industrielles : Comment améliorer notre performance sans consommer plus d'énergie ?

Figure 1.3 – Complémentarité Lean et Six Sigma



Sur un poste de production, les sept principales sources de gaspillage sont identifiées : on les appelle les 7 *Muda* (gaspillage en japonais).

Figure 1.4– Les sept principales sources de gaspillages (Les 7 Muda)



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 les défauts visuels. Il en résulte une augmentation des temps de production, du nombre de retouches, des rebuts, et donc des coûts. D'où l'intérêt de parfaitement définir le niveau attendu pour chaque spécification et de se donner les moyens de mesurer correctement ces spécifications.

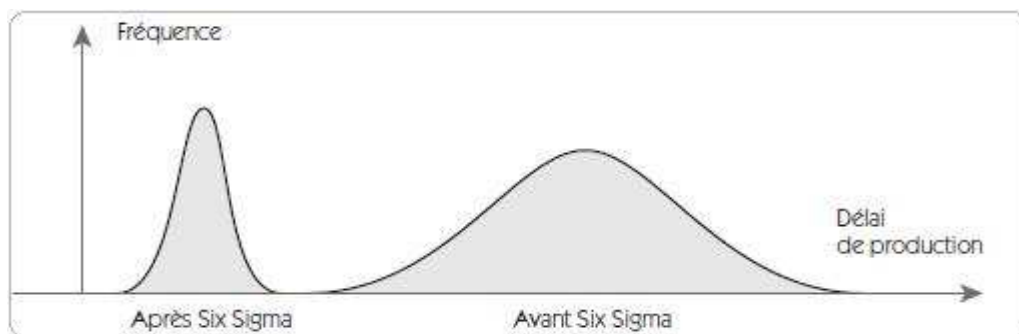
5. Stocks excessifs : outre les aspects coûts, les stocks excessifs conduisent à des gaspillages de temps pour retrouver la référence.

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.

La réduction de tous ces gaspillages doit se traduire par une réduction considérable des cycles de production.

Figure 1.5 – Réduction des cycles de production avec Lean 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.

Chapitre 2

2 Six Sigma, une méthode de maîtrise de la variabilité

Comprendre Six Sigma, c'est assimiler les multiples facettes d'une approche d'amélioration de la performance de l'entreprise résolument tournée vers la satisfaction des clients dans un but affiché de meilleure rentabilité économique de l'entreprise. Nous profiterons des chapitres suivants pour approfondir les différentes notions et voir dans le détail la conduite d'un chantier.

Six Sigma, c'est :

- Une certaine philosophie de la qualité tournée vers la satisfaction totale du client ;
- Une approche visant à réduire la variabilité dans les processus ;
- Un indicateur de performance permettant de mesurer comment se situe l'entreprise en matière de qualité.
- Une méthode de résolution de problèmes DMAICS (Définir, Mesurer, Analyser, Innover/Améliorer, Contrôler, Standardiser) permettant de réduire la variabilité sur les produits ;
- 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.

1. La satisfaction des clients

Six Sigma a pour objectif de concilier deux choses :

- Une plus grande rentabilité de l'entreprise,
- Une plus grande satisfaction du client.

On comprend bien qu'une plus grande satisfaction des clients permettra tout à la fois de conserver nos clients et d'en conquérir de nouveaux. Cette augmentation de part de marché se concrétisera par une amélioration de la rentabilité.

D'un point de vue pratique, ce n'est pourtant pas aussi évident. Il ne faut pas que les améliorations de qualité sur lesquelles on porte effort soient plus coûteuses qu'elles ne rapportent. Il faut aussi que l'on ne se trompe pas d'objectif en matière de satisfaction du client.

Une démarche Six Sigma doit donc nécessairement débiter par la recherche des caractéristiques critiques pour la qualité (les CTQ : Critical To Quality) qui seront les éléments essentiels réclamés par le client. Que veut réellement le client ? Quelles sont ses attentes ? Quel est son niveau d'exigence ?

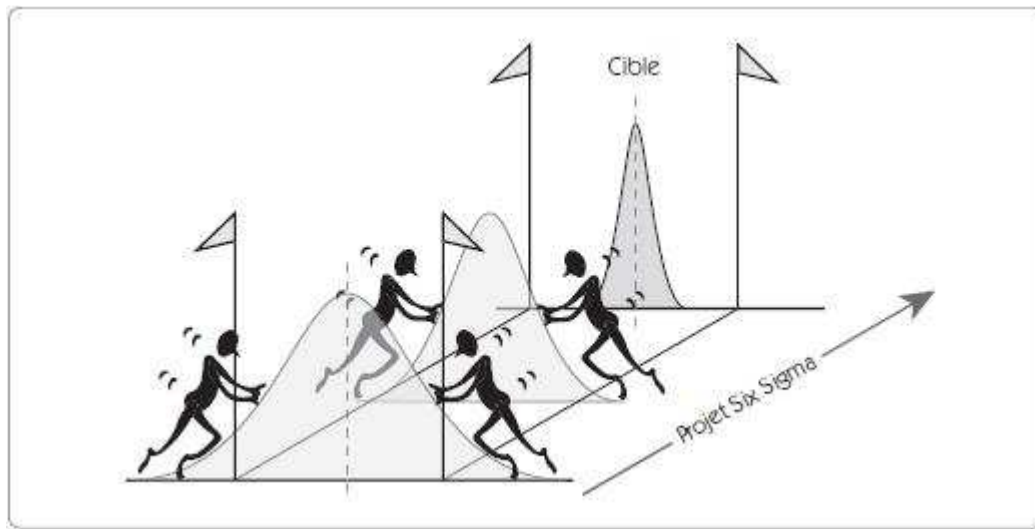
Le moteur de Six Sigma est la démarche DMAICS (Définir, Mesurer, Analyser, Innover/Améliorer, Contrôler, Standardiser). On verra que la première étape de sa mise en œuvre est essentiellement consacrée à bien définir ce qu'attend le client, à déterminer quelles sont ses exigences.

2. Réduire la variabilité

La variabilité est l'ennemi de la qualité. Lorsqu'un site pharmaceutique vient de fabriquer un médicament qui donne entière satisfaction, son rêve serait de pouvoir le cloner à l'identique afin que chaque produit conserve les mêmes qualités. Mais ce n'est malheureusement pas possible, il y aura toujours une petite différence entre des produits réputés identiques, et ce sont ces petites différences qui conduisent à la non-qualité.

Dans les processus industriels ou de service, nous sommes confrontés à une grande variabilité des éléments qui contribuent à nous faire manquer le but. Mais lorsqu'il s'agit de la satisfaction de nos clients, nous n'avons pas le droit de manquer ce but. Nous devons donc tout faire pour réduire cette variabilité (figure 2.1).

Figure 2.1– Réduire la variabilité



Les trois sources primaires de la variabilité sont :

- Une conception pas assez robuste, très sensible aux perturbations extérieures ;
- Des matières premières et des pièces élémentaires instables ;
- Une capacité des processus insuffisante.

Pour atteindre le niveau de qualité Six Sigma, nous devons lutter contre ces trois principales sources de variabilité.

La démarche DMAICS, qui constitue le moteur de Six Sigma, fournit le guide méthodologique permettant de trouver le chemin de la réduction de variabilité. Mais cette démarche ne peut fournir de résultat que si elle est utilisée par des personnes compétentes. C'est la raison pour laquelle on devra associer la mise en place de la démarche DMAICS avec une solide formation des hommes et une gestion efficace des compétences.

3. Mesurer le niveau de qualité de l'entreprise

Pour pouvoir progresser, il faut mesurer le niveau de qualité actuel afin de se donner un objectif variable. Six Sigma signifie donc un niveau de qualité que l'on souhaite atteindre. Une qualité sera d'autant plus significative que le nombre de sigma sera élevé. Ainsi une qualité « 3 sigma » donnera 66 810 de non-conformités, une qualité « 6 sigma » donnera 3,4 DPMO (défauts par million d'opportunités). La méthode Six Sigma vise donc au moins le niveau 6 sigma, autrement dit moins de 3,4 DPMO comme taux de non-conformités. La question qui se pose est comment on mesure le nombre de sigma (le z du processus)?

3.1 La notion d'opportunité de défaut

Lorsque l'on parle d'un produit qui peut être bon ou mauvais, la notion d'opportunité de défaut est très simple : chaque fois qu'on a un produit, on a une (ou plusieurs) opportunité de défaut. Par exemple, si un produit a deux défauts potentiels, la production d'un lot de 1000 produits génère $2 \times 1000 = 2000$ opportunités de défauts.

Mais si on prend le cas des accidents de la route, dans ce cas, si l'on veut pouvoir établir une comparaison entre plusieurs pays, le plus simple consisterait à prendre le nombre d'habitant. Ainsi, en France, en l'an 2 000, il y a eu 180 000 accidents répertoriés pour 60 millions d'habitants ; cela fait un DPMO de 3 000. La lecture du tableau des DPMO avec un décalage de 1,5 (voir table T1) donne un z voisin de 4,2.

On peut également retrouver la relation entre le DPMO et le z en appliquant la relation :

$$z = 0,8406 + \sqrt{29,37 - 2,221 \times \ln(DPMO)}$$

$$\text{soit : } z = 0,8406 + \sqrt{29,37 - 2,221 \times \ln(3\,000)} = 4,24$$

Figure 2.2– Tableau du nombre de non-conformités en fonction du sigma (z du processus)

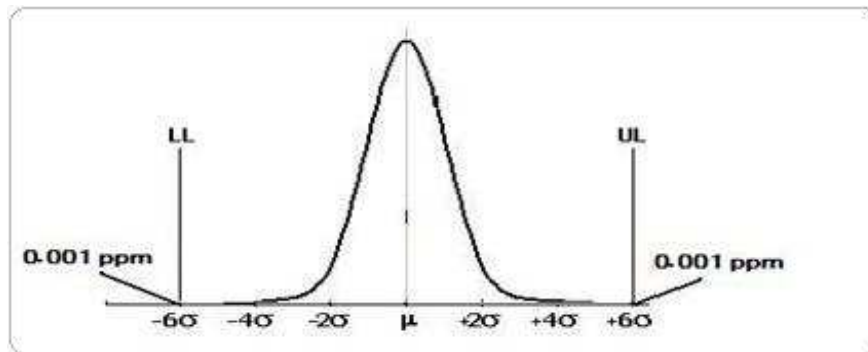
z	ppm centré dans les tolérances	DPMO avec un décalage de 1,5
1	317 310,52	697 672,15
2	45 500,12	308 770,21
3	2 699,93	66 810,63
4	63,37	6 209,70
5	0,57	232,67
6	0,00	3,40
7	0,00	0,02

3.2 L'origine des 3,4 ppm (produit par million)

Le calcul de l'objectif des 3,4 ppm résulte d'un calcul de pourcentage théorique de défauts dans le cas d'une loi normale.

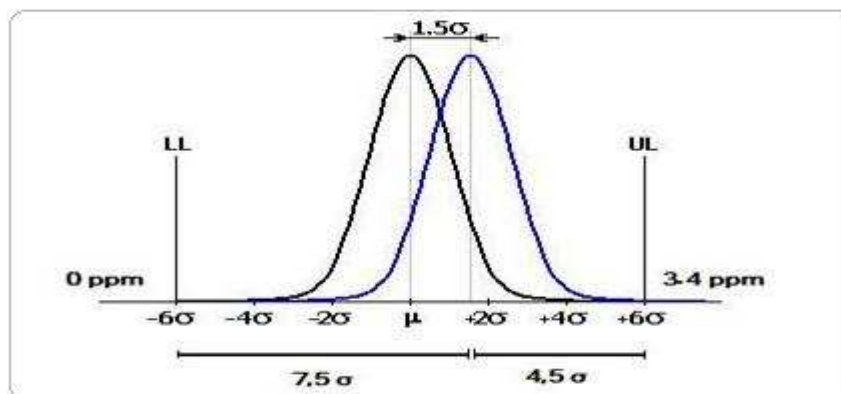
Dans le cas des produits mesurables, la capacité du processus se mesure en établissant le ratio entre la tolérance et la dispersion du processus (Voir chapitre 4- étape Mesurer, pour plus de détails sur les calculs de capacités).

Figure 2.3 - Niveau Six Sigma



En fait, l'approche Six Sigma tient compte d'une déviation de la moyenne de 1,5 sigma : car même si le processus est parfaitement sous contrôle, il n'est pas possible de détecter les petits décentrages du processus. Le plus petit décalage détectable est de 1,5 sigma. Dans ces conditions, la proportion de défauts sera de 3,4 ppm.

Figure 2.4 – Décalage de 1,5 sigma



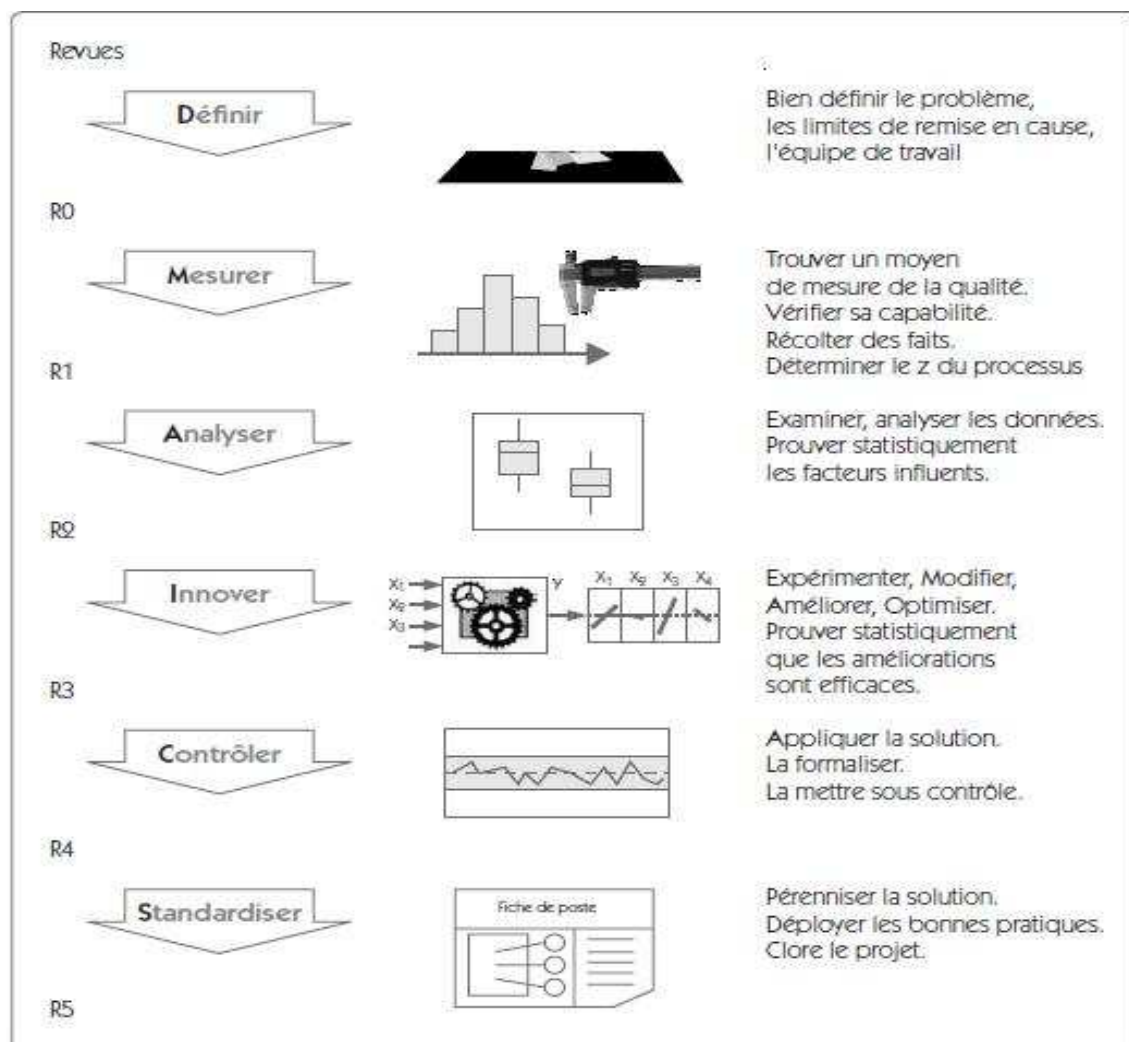
Ainsi, en tenant compte de ce petit décalage de 1,5 sigma, on aura sur un côté de la gaussienne 7,5 sigma, et de l'autre côté 4,5 sigma.

Il s'agit donc d'une estimation d'un pourcentage de non conformes dans une situation donnée. Le z permet d'estimer le niveau de qualité d'un processus, c'est un outil de communication. En aucun cas, il ne remplace l'analyse complète de la chute des capacités comme nous le verrons au chapitre 4 – étape2 « Mesurer ».

4. Six Sigma : une méthode de maîtrise de la variabilité DMAICS

4.1 La démarche DMAICS

Figure 2.5 – Les six étapes DMAICS de la démarche Six Sigma



Pour obtenir les niveaux de capabilités exigés par Six Sigma, il est absolument nécessaire d'utiliser des outils et plus particulièrement des outils statistiques. Dans l'approche Six Sigma, tous les outils utilisés sont connus, il n'y en a pas de nouveaux. C'est la structuration dans l'utilisation des différents outils qui est intéressante dans l'approche Six Sigma.

Figure 2.6 – DMAICS

Étapes	Objectifs/tâches	Résultats	Outils principaux
D Définir	Définir le projet : les gains attendus pour le client, pour l'entreprise, le périmètre du projet, les responsabilités.	Charte du projet Cartographie générale du processus Planning et affectation des ressources	Diagramme CTQ QOQCP QFD Diagramme de Kano Benchmarking Cartographie SIPOC
M Mesurer	Définir et valider les moyens de mesure. Mesurer les variables de sortie, les variables d'état et les variables d'entrée du processus. Collecter les données. Connaître le z du processus.	Cartographie détaillée du processus Capabilité des moyens de mesure Capabilité du processus	Analyse processus, logigramme Répétabilité et reproductibilité Analyse des 5M Matrice Causes/Effets Feuille de relevés Maîtrise statistique des procédés (SPC)
A Analyser	Analyser les données. Établir les relations entre les variables d'entrée et de sortie du processus. Identifier les variables clés du processus.	Établissement de la preuve statistique Compréhension du processus	Statistique descriptive Statistique inférentielle Plans d'expériences
I Innover/Améliorer	Imaginer des solutions. Sélectionner les pistes de progrès les plus prometteuses. Tester les améliorations.	Processus pilote Amélioration du z Détermination des caractéristiques à mettre sous contrôle	Méthode de créativité Vote pondéré Plans d'expériences AMDEC
C Contrôler	Mettre sous contrôle la solution retenue. Formaliser le processus.	Rédaction de modes opératoires Cartes de contrôle	Auto-maîtrise Maîtrise statistique des procédés (SPC)
S Standardiser	Pérenniser les solutions (cale anti-retour). Diffuser les bonnes pratiques. Clore le projet.	Indicateurs de performance Tableau de bord Plan d'audit Bilan de fin de projet	Auto-maîtrise Audit Benchmarking Bonnes pratiques

Six Sigma se décline en six étapes DMAICS (Définir, Mesurer, Analyser, Innover/Améliorer, Contrôler et Standardiser). En suivant sérieusement ces six étapes, un technicien qui n'est pas un expert en statistique pourra avec un minimum de formation atteindre l'objectif de variabilité qui est fixé.

Pour passer d'une étape à une autre, il faudra valider au travers d'une revue le fait que les objectifs de l'étape ont bien été atteints.

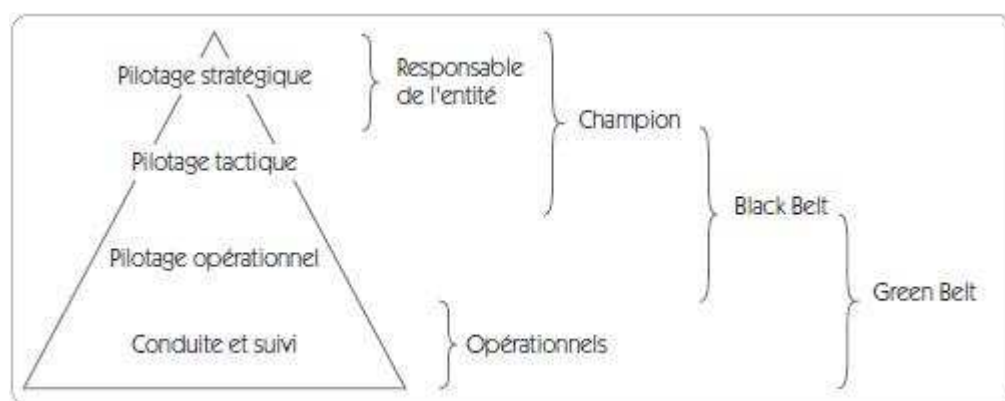
Chapitre 3

3 L'équipe Six Sigma

Pour mettre en œuvre une telle approche, il faut des hommes ayant des compétences et des responsabilités bien définies. Cela suppose aussi de former son personnel et de déterminer des rôles particuliers pour les individus qui vont conduire le changement. Pour illustrer la définition des rôles de chacun, l'entreprise General Electric s'est appuyée sur des dénominations marquantes telles que *White Belt*, *Green Belt*, *Black Belt*, *Master Black Belt* et *Champion*. D'une entreprise à l'autre, on parlera par exemple aussi bien d'équipier, de pilote, de coach, le tout étant que les fonctions soient remplies pour garantir le succès du déploiement de Six Sigma dans l'entreprise.

1. Les différents niveaux de pilotage

Figure 3.1 - Les différents niveaux de pilotage



Comme pour toutes autres activités, le pilotage d'une démarche Six Sigma doit reposer sur les quatre couches ; stratégique, tactique, opérationnelle, conduite et suivi.

***Stratégique :** on procède à la mise en place de Six Sigma à partir d'objectif en terme de coûts, de performances internes, de satisfaction clients et de perception externe, et enfin de parts de marché et de positionnement vis-à-vis

de la concurrence. Pour atteindre ces objectifs, il faut alimenter les moteurs du progrès en donnant une vision claire sur la façon dont on veut que les choses avancent. Ces engagements sont forcément pris au niveau le plus haut de l'entreprise en impliquant fortement les champions.

***Tactique :** le pilotage tactique n'est autre que la traduction des décisions stratégiques au niveau des services opérationnels. Il va consister à faire les choix des chantiers Six Sigma qui méritent d'être développés et à donner les moyens aux équipes de conduire ces projets. *Le Champions* est fortement impliqué dans cette phase, assisté du *Black Belt* pour le choix des chantiers.

***Opérationnel :** le pilotage opérationnel va principalement consister à conduire les chantiers Six Sigma notamment au travers de l'utilisation de la démarche DMAICS que nous avons décrite. Le *Black Belt* est donc leader dans cette couche de pilotage, assisté par les membres de son équipe, les *Green Belts*.

***Conduite et suivi :** cette couche très applicative va consister à appliquer les décisions qui sortent de la démarche DMAICS. Elle va impliquer tous les opérationnels du processus concerné, dont les *Green Belts* qui sont notamment destinés à être des opérationnels.

2. Les différents rôles

Pour être efficace, Six Sigma s'organise autour de plusieurs personnes clés qui ont chacune une compétence particulière et un rôle particulier. Les deux personnages les plus importants sont le Black Belt (ceinture noire) et le Champion.

Le Champion (C)

Un Champion est choisi par le patron de l'entreprise. Il a la responsabilité de déployer Six Sigma dans un secteur de l'entreprise. Typiquement, un Champion est un responsable de l'exécutif avec un haut niveau de responsabilité. Ce peut être le responsable d'un site, ou un responsable qui a une fonction importante dans l'entreprise. Il doit faire partie du comité de direction.

Il peut y avoir deux types de Champion : les Champions « déploiement » et les Champions « projet ».

Les Champions « déploiement » ont en charge le succès du déploiement de Six Sigma dans un secteur de l'entreprise. Ils doivent avoir une solide expérience de management au niveau stratégique et tactique, et dans la conduite de changements majeurs.

Les Champions « projet » doivent superviser les Black Belts d'une unité de l'entreprise. Ils se focalisent sur les projets. Ils s'investissent dans le choix des projets à réaliser et fournissent un support en faisant disparaître – si besoin est – les barrières culturelles. Ils doivent s'assurer que les ressources sont disponibles tant en homme qu'en matériels.

Ils connaissent parfaitement la philosophie de six Sigma ainsi que les principes afférents et théories sous-jacentes. Le Champion suit activement l'évolution des projets, étant notamment responsables de l'organisation des revues de projets qui ponctuent chaque fin d'étape.

Le Champion est très important, il donne sa cohésion à la démarche Six Sigma en reliant chaque projet aux objectifs stratégiques de l'entreprise et en évitant la variabilité dans la méthode.

Le Black Belt (BB - ceinture noire) ou pilote Six Sigma

Le *Black Belt* a pour rôle de piloter le groupe de travail. Il est affecté à 100% sur l'avancement des projets Six Sigma. Voici en quoi consiste son rôle :

- Il anime le projet.
- Il forme le groupe de travail.
- Il utilise les outils et la méthode Six Sigma.

Pour pouvoir être *Black Belt*, il faut cumuler deux compétences : une compétence dans les outils de la qualité, et plus particulièrement dans les outils statistiques, et une compétence dans le management d'une équipe. Réunir ces compétences est relativement rare dans les entreprises. La formation d'un *Black Belt* demande en général que l'on mette en place une solide formation en statistique et en méthode de résolution de problèmes. Le *Black Belt* ne dispose pas de pouvoir hiérarchique sur l'équipe Six Sigma, notamment dans le choix des outils à utiliser, le management des risques liés au projet et les résultats obtenus.

Le nombre de *Black Belt* nécessaires à la conduite du changement dans une entreprise est d'environ de 1 pour 100 employés.

Le Green Belt (GB - ceinture verte)

Les Green Belts sont des employés affectés sur un projet Six Sigma pour une partie de leur temps. La formation reçue est plus légère que celle des Black Belts, mais suffisante cependant pour mener à bien en autonomie de petits

projets dans le cadre de leur travail et participer efficacement à des projets plus ambitieux menés par des *Black Belts*. Ce sont souvent les *Green Belts* qui réalisent les expérimentations nécessaires, organisent les saisies de données requises, conduisent la mise en place de carte de contrôle.

En participant activement aux projets Six Sigma conduits par des *Black Belts*, le *Green Belt* se forge une expérience qui lui vaut d'intégrer les concepts et la philosophie de Six Sigma avec, à terme, la possibilité d'évoluer vers la formation de *Black Belt*.

Le White Belt (WB – ceinture blanche)

Peu d'entreprise utilisent cette notion de White Belt. Un White Belt est un employé qui a reçu une formation basique de quelques heures sur les fondamentaux de Six Sigma et sur les outils de base de la conduite des étapes « Mesurer », « Analyser », « Innover », « Contrôler ». C'est un minimum pour pouvoir participer à une équipe Six Sigma.

Le Master Black Belt (MBB – Maître ceinture noir)

Le *Master Black Belt* fait office d'expert à la fois dans l'utilisation des outils et de la méthode et dans la connaissance des fondamentaux de Six Sigma. Il fait partie de l'entreprise dans le cas de grandes sociétés, ou il est consultant dans le cas d'une entreprise de taille plus modeste. Son rôle est à facettes multiples. Il assiste tant le Champion dans la sélection des projets que les *Black Belts* dans la conduite de leur projet.

Il est formateur aussi bien des futurs Champions que des futurs *Black Belts*, et il joue un rôle important de veille technologique pour améliorer et développer la méthode.

Il a une responsabilité importante dans le déploiement de la méthode dans l'entreprise. A cette fin, il doit créer une dynamique Six Sigma en organisant des conférences, des échanges d'expériences, des formations complémentaires. Six Sigma n'est pas une méthode fermée, au contraire, elle est en perpétuelle mutation pour s'adapter aux évolutions de l'entreprise. Le *Master Black Belt* doit favoriser cette évolution en incitant les *Black Belts* à investir de nouveaux horizons au travers des congrès scientifiques, des réunions de professionnels sur les sujets proches de Six Sigma, des visiteurs d'entreprises.

Bien sûr, pour devenir *Master Black Belt* il faut un niveau de formation très élevé, mais la partie la plus importante en est l'expérience dans la conduite de projets Six Sigma. On devient *Master Black Belt* lorsque l'on a conduit plusieurs dizaines de projets avec succès.

3. Le groupe Six Sigma

3.1 Définition du groupe Six Sigma

La mise en œuvre d'un projet Six Sigma doit résulter d'un travail de groupe. Il y a deux façons d'apporter des améliorations : améliorer les performances du système ou améliorer le système lui-même. On considère généralement que l'amélioration des performances est la source de seulement 20% des améliorations. Autant la première possibilité de l'alternative peut être réalisée par un seul individu ou un groupe d'individus d'un même secteur, autant l'amélioration du système nécessite la création d'un groupe pluridisciplinaire.

Selon l'importance du projet, un groupe Six Sigma se compose de 3 à 10 personnes aux compétences transversales. Les participants sont sélectionnés parce qu'ils ont des choses en commun, mais aussi parce qu'ils ont différents points de vue sur le sujet. On cherche si possible à réunir des personnes de différents services. S'il n'y a que des personnes d'un même service, il y a des gros risques que l'amélioration locale apportée ne participe pas à l'amélioration globale du système.

Le travail de groupe comporte des avantages qu'il faut savoir utiliser et des inconvénients qu'on doit être capable d'éviter. On doit chercher à former un groupe susceptible d'engendrer un climat de créativité et à même de trouver un consensus par le biais de votes. On évitera par exemple de réunir des personnes ayant un contentieux.

3.2 La place du Black Belt dans le groupe

L'animateur du groupe est le *Black Belt*, qui n'a pas de responsabilité hiérarchique mais matricielle. Il doit agir davantage comme le capitaine d'une équipe de football que comme un responsable hiérarchique. Il doit être leader sur le terrain mais aussi dans les vestiaires. C'est souvent à la pause lorsque les troupes sont démotivées par une première mi-temps difficile que le capitaine joue un rôle décisif.

La hiérarchie crée la contrainte, le leadership crée la motivation. Si les gens s'investissent dans le groupe de travail, c'est parce qu'ils ont confiance dans le leader. Le *Black Belt* devra donc imposer son emprise non par un statut, mais par ses compétences, son charisme et son engagement dans le projet. Ce point

est particulièrement important et il faudra en tenir compte dans le choix des collaborateurs amenés à être des futurs *Black Belts*.

Il doit diriger le groupe, c'est lui qui a les compétences pour choisir un outil, faire les analyses nécessaires. Il s'appuie sur le groupe de travail pour émettre les hypothèses, faire les analyses, les expériences. Il facilite le consensus au moment des choix et suit l'application de ces choix. Il doit donc parfaitement connaître les règles de fonctionnement d'un groupe de travail.

3.3 Conditions de bon fonctionnement du groupe de travail

Le groupe de travail produira des résultats satisfaisants si les acteurs apprécient le fonctionnement du groupe et le travail qu'ils réalisent. Selon *HERZBERG*³, la satisfaction dans le travail dépend de cinq facteurs relatifs à la tâche à accomplir :

- L'accomplissement (donner du sens à sa vie) ;
- La reconnaissance de l'extérieur ;
- L'attirance pour le travail ;
- La responsabilité ;
- La possibilité d'avancement.

3. HERZBERG : Chercheur psychologue américain, spécialiste de la motivation au travail.

Les causes de non-satisfaction sont également au nombre de cinq. Elles ne sont pas liées à la tâche mais à l'environnement.

- La politique de l'entreprise ;
- Le poids de la hiérarchie ;
- La rémunération ;
- Les relations dans le travail ;
- Les conditions de travail.

Pour compter des gens motivés dans un groupe de travail, il faut avoir supprimé les causes de non-satisfaction et crée au moins une condition de satisfaction. Si la suppression des causes de non-satisfaction n'est pas toujours du ressort de *Black Belt*, il est en revanche de sa responsabilité de crée les conditions de satisfaction en :

- Créant une ambiance de travail ;
- Formant les membres du groupe ;
- Déléguant les tâches et les responsabilités ;
- Communiquant sur la réussite du projet.

D'une façon générale, un certain nombre d'actions permettent de former des groupes de travail efficaces dans les entreprises :

***Ecouter et communiquer :** encourager un dialogue à double sens, ouvert et honnête. Développer le partage d'informations.

***Former les collaborateurs :** la formation est à la base de l'ouverture d'esprit. Un collaborateur raisonne à partir de ses connaissances. Si ses connaissances sont limitées, son raisonnement sera limité, et on ne peut pas attendre de performances d'un groupe aux connaissances limitées. D'où l'importance de développer une politique de formation importante dans l'entreprise.

*** Favoriser l'ambiance de travail :** toutes les techniques de travail en groupe ne permettront pas de compenser la stérilité d'un climat de travail plein d'agressivité de rancœurs ourdies. Il faut encourager les actions qui tendent à renforcer un climat de travail amical et positif.

*** Croire dans ses collaborateurs :** supporter les décisions des groupes de travail, même si ces décisions vont à l'encontre a priori des connaissances des responsables.

*** Fournir un retour d'information :** Valoriser et partager les bénéfices des actions passées, c'est la façon de procéder qui permettra d'enclencher de nouvelles actions.

Chapitre 4

4 Les concepts Six Sigma

Etape 1 - Définir

La première étape d'une démarche Six Sigma va consister à parfaitement définir le cadre du projet.

Dans cette première partie, on va définir les vrais objectifs qui doivent être atteints pour garantir la satisfaction des clients. Pour ce faire, on se base sur le processus qui conduit à la réalisation du produit, lequel peut se décliner selon les trois critères, qualité, délais et coût :

- Livrer un produit ou un service sans défaillance ;
- Le livrer selon le programme établi ;
- Fournir le produit ou le service au coût le plus bas possible.

Parmi les points importants de cette étape, on mentionnera la recherche des Caractéristiques Critiques Pour la Qualité (CTQ : Critical To Quality) qui représentent les éléments essentiels et les plus sûrs en termes de satisfaction des clients. Il faudra ensuite être capable de les hiérarchiser et de fixer pour chaque caractéristique une cible et des spécifications limites.

Un second point concerne la cartographie du processus. Elle permet de mettre « noir sur blanc » les différentes étapes du processus, les entrées, les fournisseurs, les sorties, les clients. Cette cartographie vise à formaliser les connaissances et les pratiques de l'entreprise.

1. Identifier les CTQ (Critical To Quality)

1.1 Ecouter la voix du client

On l'a déjà souligné à de nombreuses reprises, le but de Six Sigma est d'atteindre la satisfaction du client. C'est cette satisfaction qui permettra à

l'entreprise de vendre plus et mieux, et ainsi d'améliorer ses performances économiques.

Pour satisfaire le client, il faut savoir ce qu'il souhaite, et la meilleure façon de le savoir est de lui demander. Se mettre à l'écoute des clients, c'est avoir une action en profondeur d'écoute de la «voix» du client. Il est donc indispensable de réaliser en permanence une étude de marché la plus complète possible pour bien identifier les besoins. Pour cela, il faut:

- **Identifier les différentes catégories de clients potentiels**
- **Analyser les produits:**
 - produits vendus par l'entreprise,
 - produits concurrents.
- **Écouter la voix des personnes intéressées, directement ou indirectement, par le produit:**
 - les propriétaires;
 - les personnes qui ont acheté vos produits;
 - celles qui ont acheté les produits concurrents;
 - celles qui sont passées aux produits concurrents;
 - celles qui sont satisfaites;
 - celles qui ne sont pas satisfaites.
- **Identifier toutes les attentes clients par rapport au produit:**
 - les innovations souhaitées;
 - la hiérarchie entre les différentes attentes;
 - les fonctions essentielles ou facultatives;
 - la liste des améliorations potentielles à apporter.

Une bonne écoute du client permet de réaliser la première matrice du *QFD* et de compléter les deux premières colonnes du diagramme *CTQ* que nous présentons ci-après.

1.2 Le diagramme CTQ (Critical To Quality)

Le diagramme *CTQ* a pour objectif de décomposer le besoin du client (ce qui l'amène à utiliser nos produits ou nos services) en exigences (qualité, coût, délais) qui doivent pouvoir être mises en face de caractéristiques que l'on sait évaluer par une mesure.

Pour chacune de ces caractéristiques, on doit pouvoir déterminer une cible et des spécifications limites.

Figure 4.1.1- Diagramme CTQ

	Besoin Ce qui amène le client à utiliser le processus.	Exigences Ce qui permet au client d'être satisfait.	Caractéristiques Comment mesure-t-on que le client est satisfait ?	Spécification Quelles sont les spécifications sur la mesure ?
Client	X	A		
		B		
		C		
		D		
		E		

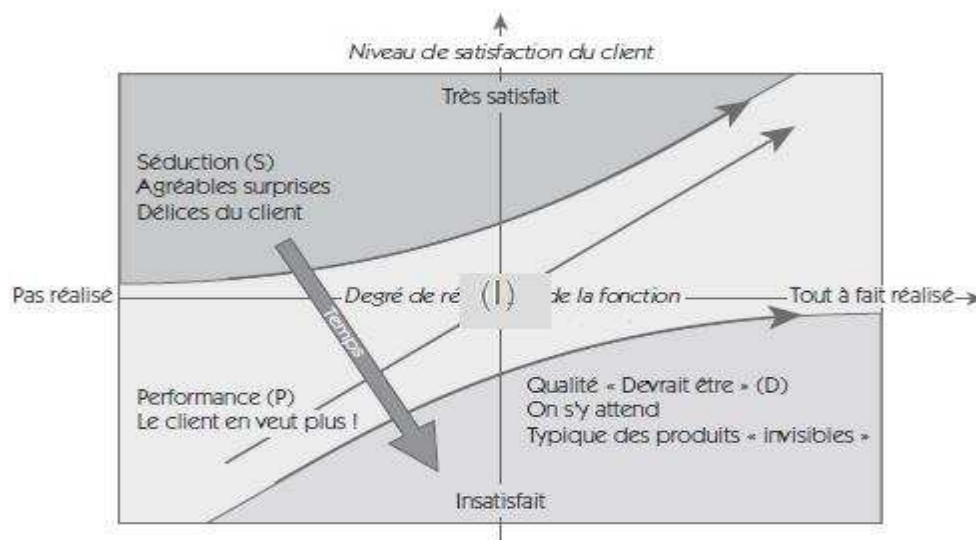
La construction d'un diagramme CTQ demande un certain nombre de réflexion : Comment mesure-t-on la satisfaction de ces exigences ? Quel est le niveau que l'on doit se fixer pour la satisfaction de cette exigence ? ...

En face de chaque exigence, doit figurer une caractéristique mesurable avec une spécification. On devra rechercher parmi ces caractéristiques celles qui sont critiques pour le client (CTQ) et bien valider que les spécifications que l'on détermine sont en accord avec ses attentes.

Le respect de ces caractéristiques formera le socle de la démarche Six Sigma.

1.3 Classification de Kano

Figure 4.1.2- Modèle de Kano



La méthode Kano, créée par le japonais Noriaki Kano en 1984 se fonde sur le constat que la satisfaction et l'insatisfaction ne sont pas deux expressions symétriquement opposées d'une perception. En effet, une caractéristique particulière d'un produit ou d'un service peut générer beaucoup de satisfaction auprès du client qui la découvre, sans pour autant que son absence aurait symétriquement causé de l'insatisfaction.

Dans son modèle de qualité, Kano classe les attentes des clients en 4 catégories :

1- Devrais être (D) : Les attentes de base, quasiment toujours implicites et dont le contentement n'apporte pas de satisfaction particulière. A l'inverse, ne pas répondre à ces attentes génère immédiatement une forte insatisfaction. Les fonctions ou caractéristiques qui y répondent sont donc obligatoires.

2- Performance (P) : Les attentes dont la réponse apporte une satisfaction proportionnelle à la réponse. Ces attentes sont en général explicitement exprimées : Une performance médiocre va créer une insatisfaction et une performance élevée va créer une satisfaction.

3- Séduction (S) : Les attentes qui amènent une satisfaction de type « Agréable surprise ». Correspondant à des besoins pas vraiment exprimés : En cas de faible performance, l'utilisateur sera indifférent ; en revanche, une bonne performance créera un sentiment de délice pour le client.

4- Indifférent (I) : Les attentes dont la réponse ou non laisse le client indifférent.

Pour chaque caractéristique, il y a un glissement avec le temps qui passe d'abord par la « Séduction », puis vers la « Performance », pour enfin être considérée comme « Devrais être ».

L'enquête de Kano vise à déterminer, pour chaque caractéristique, la catégorie dans la quelle elle se situe.

Cette catégorisation s'obtient grâce à un questionnaire en trois parties :

- La première partie traite des perceptions du client face à des caractéristiques parfaitement opérationnelles.
- La seconde partie traite des perceptions du client face à l'absence des mêmes caractéristiques.

- La troisième partie traite les prix à payer pour que ces caractéristiques soient présentes.

Figure 4.1.3- Questionnaire de Kano

CTQ	Que ressentez-vous si la caractéristique suivante est présente dans le produit ?	Que ressentez-vous si la caractéristique suivante est absente dans le produit ?	Quel prix acceptez-vous de payer pour que cette caractéristique soit présente ?
A	☐ Délice ☐ Espéré et souhaité ☐ Pas de sentiment ☐ Vit avec ☐ Pas désiré ☐ Autre	☐ Délice ☐ Espéré et souhaité ☐ Pas de sentiment ☐ Vit avec ☐ Pas désiré ☐ Autre	☐ 10 € ☐ 20 € ☐ 40 € ☐ 80 € ☐ 160 €
B	☐ Délice ☐ Espéré et souhaité ☐ Pas de sentiment ☐ Vit avec ☐ Pas désiré ☐ Autre	☐ Délice ☐ Espéré et souhaité ☐ Pas de sentiment ☐ Vit avec ☐ Pas désiré ☐ Autre	☐ 10 € ☐ 20 € ☐ 40 € ☐ 80 € ☐ 160 €
C	☐ Délice ☐ Espéré et souhaité ☐ Pas de sentiment ☐ Vit avec ☐ Pas désiré ☐ Autre	☐ Délice ☐ Espéré et souhaité ☐ Pas de sentiment ☐ Vit avec ☐ Pas désiré ☐ Autre	☐ 10 € ☐ 20 € ☐ 40 € ☐ 80 € ☐ 160 €

Pour chaque caractéristique, l'affectation dans une catégorie donnée sera déterminée par le croisement des questions sur la présence ou l'absence de la caractéristique.

1.4 Diagramme « Exigences/Performances »

Connaissant les CTQ, on doit maintenant définir si les exigences sont satisfaites ou non.

Figure 4.1.4- Diagramme « Exigences/Performances »



Le diagramme « Exigences/Performances » (figure 4.1.4) consiste à reprendre chaque exigence du client en lui mettant une note de -3 à +3 selon que cette exigence est faible ou forte.

En principe, un bon produit devrait adapter ses performances aux exigences du client (zone 1 et 4). Des performances élevées pour des exigences faible risquent de générer un surcoût du produit que le client n'est pas prêt à payer (zone 3). Evidemment, il est suicidaire de fournir des performances médiocres en face d'exigences élevées (zone 2).

On procède au recueil du niveau de performance de la même façon que pour le recueil des exigences, c'est-à-dire à partir d'un travail d'enquête auprès des clients.

Chaque CTQ doit être placé sur ce graphique.

- Les CTQ placés dans la zone offrent des potentiels de gains financiers.
- Les CTQ placés dans la zone offrent des potentiels de gains qualité.

1.5 La matrice QFD (Quality Function Deployment)

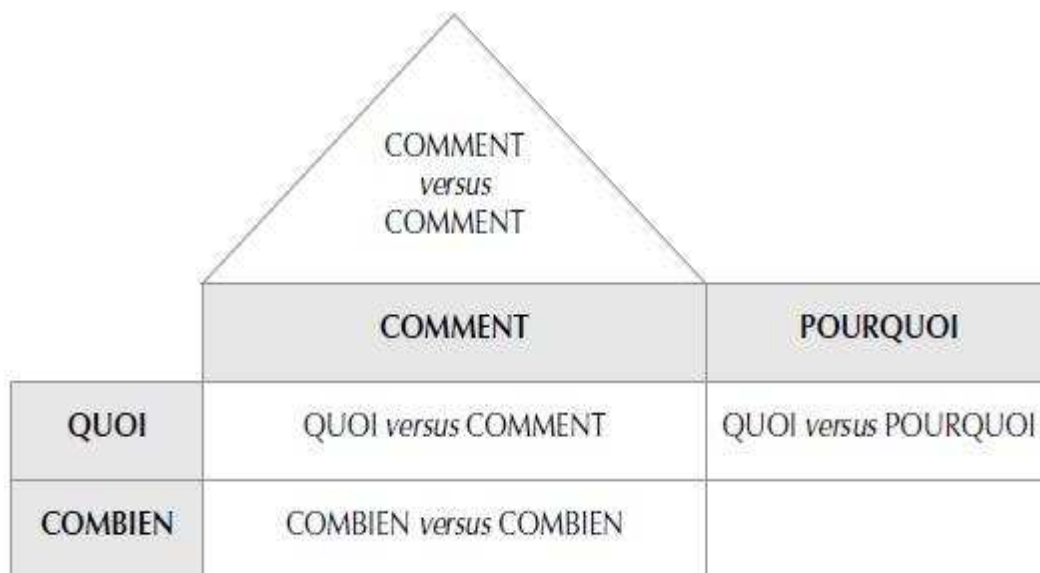
Cette méthode a été inventée chez *Mitsubishi* au Japon dans les années 60. Son but est d'aider les ingénieurs à prendre en considération la qualité des produits le plus tôt possible dans le processus de conception.

Le QFD signifie Quality Function Deployment ce que l'on traduit généralement par Déploiement de la Fonction Qualité. On distingue quatre matrices du déploiement :

- Matrice Attentes du client/Spécifications produits
- Matrice Spécifications produits/Caractéristiques
- Matrice Caractéristiques/Opérations
- Matrice Opérations/Spécifications de production

Pour bien comprendre le principe de construction de la matrice, il faut parfaitement définir les différentes zones comme le montre la figure suivante :

Figure 4.1.5 – la maison de qualité

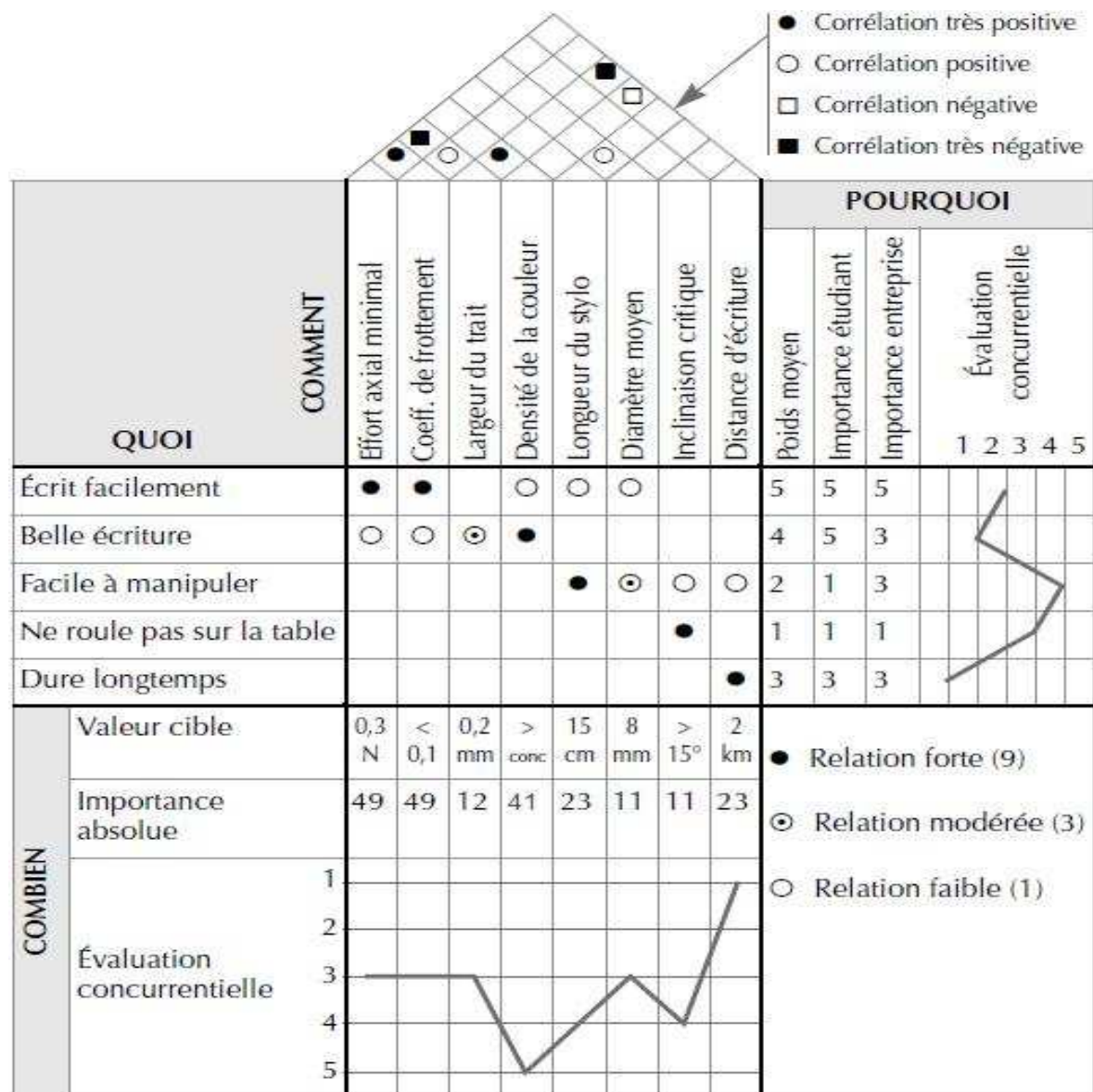


La matrice QFD est une méthode permettant de traduire de façon appropriée les attentes du consommateur en spécifications interne à l'entreprise et ceci tout au long du développement d'un produit, c'est-à-dire :

- dans les phases de recherche et de développement ;
- dans les phases d'étude, d'industrialisation et de réalisation ;
- dans les phases commerciales et de distribution.

On va s'intéresser ici à la première matrice du déploiement. L'outil se présente sous la forme d'une maison avec son toit qu'on appelle souvent « la maison de la qualité ».

Figure 4.1.6 – Exemple de matrice QFD sur un stylo-bille



1) Les **QUOI** : cette zone contient la liste des attentes et des exigences explicites ou implicites des clients sur le produit.

2) Les **POURQUOI** : cette zone a comme objectif de décrire le marché actuel. Elle comprend au moins deux éléments :

* La liste des catégories de clients que le produit doit satisfaire, ainsi qu'une évaluation de l'importance de chaque QUOI pour la catégorie concernée. Le poids moyen représente la moyenne des importances ;

* La liste des produits concurrents ou une évaluation par rapport à la concurrence.

3) Les QUOI versus POURQUOI : cette zone comporte les relations entre les QUOI et les POURQUOI. Le but de cette zone est d'établir une hiérarchie parmi l'ensemble des QUOI en fonction des données du marketing. On trouve notamment l'importance relative de chaque QUOI en fonction du type de client. On trouve également l'évaluation comparative des concurrents sur chaque QUOI.

4) Les COMMENT : sachant les besoins exprimés par les clients, il faut analyser la façon de les satisfaire. Quels critères d'évaluation du produit peut-on apporter pour répondre aux besoins ?

5) Les QUOI vs COMMENT : permet de mesurer les relations entre les besoins des utilisateurs et les moyens envisagés pour les satisfaire. Cette relation matricielle QUOI/COMMENT représente la base et l'originalité de toute méthode QFD. En règle générale, les relations QUOI/COMMENT sont hiérarchisées en fonction de l'importance de la relation. On utilise souvent une pondération 1, 3, 9 pour des relations faibles, moyennes et fortes.

6) Les COMBIEN : la liste des COMBIEN sert à caractériser les COMMENT un peu de même manière que les POURQUOI caractérisent les QUOI. On trouve en général dans cette liste : une note d'importance ; la cible à atteindre ; la liste des concurrents et l'évaluation par rapport à ceux-ci.

7) Les COMMENT vs COMBIEN : cette matrice relationnelle permet de caractériser les COMMENT en fonction des COMBIEN :

- * une évaluation calculée de l'importance des COMMENT en fonction des QUOI qu'ils satisfont et de leur importance respective ;
- * un objectif chiffré pour le COMMENT garantissant la satisfaction du client ;
- * une évaluation comparative des COMMENT par rapport à la concurrence.

8) Les COMMENT vs COMMENT : les solutions apportées pour satisfaire les clients sont parfois contradictoires. Par exemple dans un stylo bille, on souhaite qu'il glisse facilement sur la feuille et qu'il ne coule pas. Or le jeu entre la bille et le corps permet un meilleur glissement, mais une fuite plus importante. On identifiera donc dans cette partie toutes les relations positives (vont dans le même sens en terme de qualité) et négatives (vont dans le sens opposé).

2. Cartographier le processus

Selon la norme ISO 9000, un processus est défini comme un :

« Ensemble d'activités corrélées ou interactives, qui transforme des éléments d'entrée en éléments de sortie. »

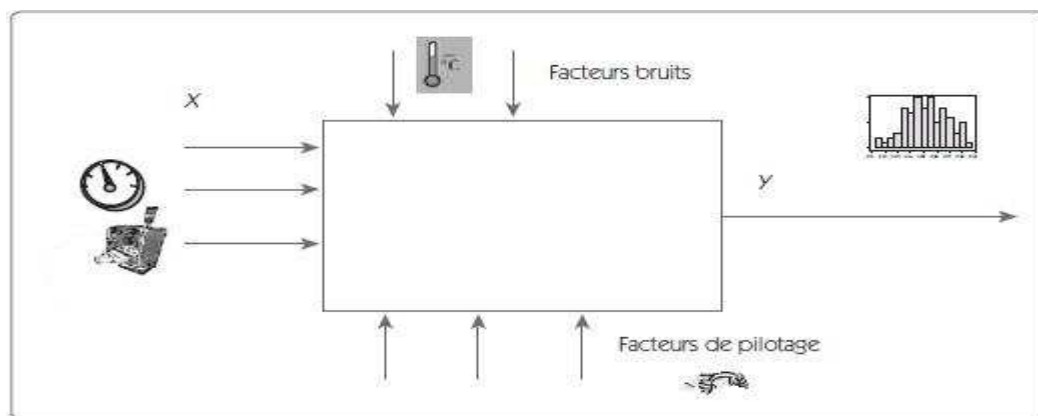
L'amélioration d'un processus de production commence toujours par une phase d'analyse. La cartographie du processus est un excellent moyen de réaliser une telle analyse. Son but est d'illustrer les flux physiques et les flux d'informations depuis les approvisionnements en matières jusqu'au client en fournissant une représentation visuelle des étapes permettant de délivrer le produit.

De nombreuses représentations ont été proposées pour réaliser cette cartographie. Nous nous limiterons aux formes les plus simples et les plus couramment rencontrées.

2.1 Boîte noire

Dans ce type de représentation, l'activité est figurée au moyen d'un rectangle. On fait apparaître les variables d'entrée (les X), les variables de sortie (les Y). Eventuellement, on fait apparaître les facteurs bruits (ceux qui perturbent l'activité mais qu'on ne maîtrise pas) et les facteurs de pilotage (qui permettent d'ajuster les Y sur la cible souhaitée).

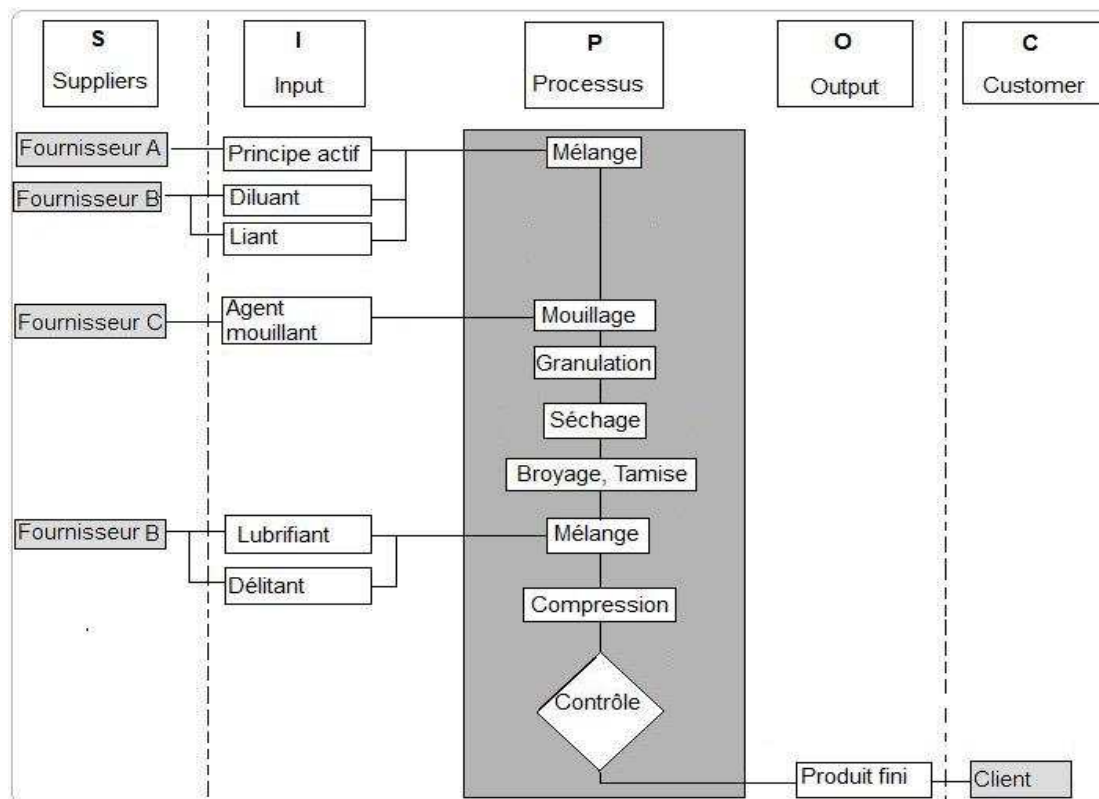
Figure 4.1.7 – Boîte noire d'une activité



2.2 Diagramme SIPOC

Un outil très adapté à cette cartographie est le diagramme SIPOC (Suppliers, Input, Process, Output, Customers) qui permet de faire apparaître les flux matières et les flux d'informations sur un même graphique. La figure 4.1.8 montre un exemple de SIPOC flux physiques. Le même diagramme est également représenté en indiquant le flux d'informations circulant dans le processus (les documentations aux postes, les relevés fournis par les postes...).

Figure 4.1.8 – SIPOC d'un processus de production d'un comprimé nus



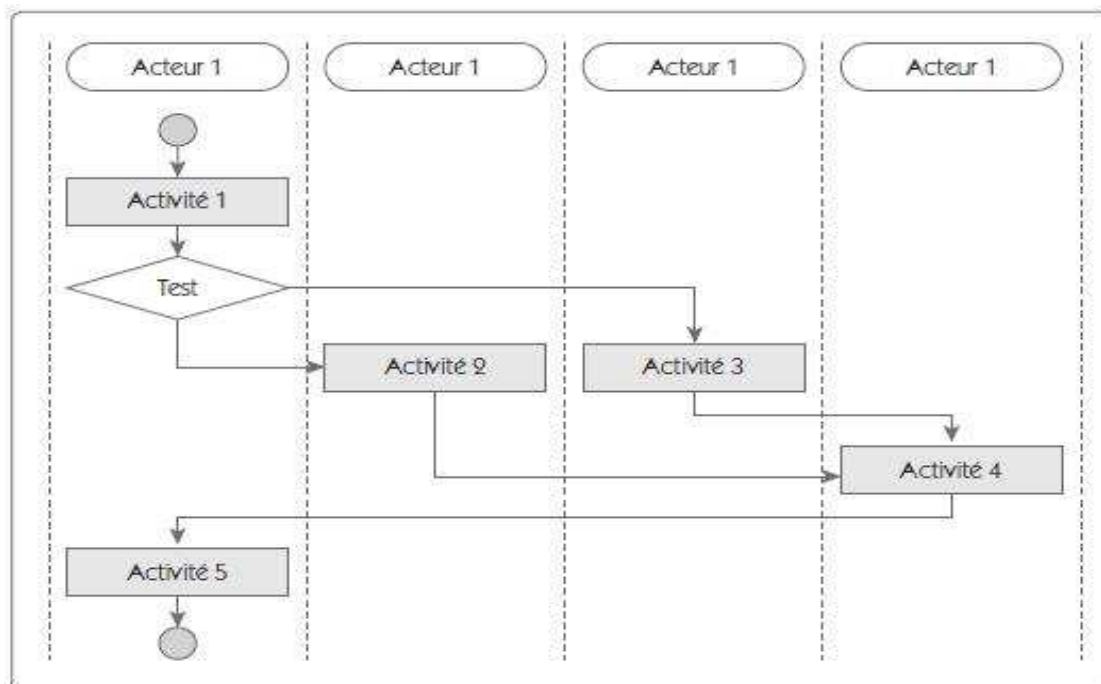
Dans le cadre *Processus*, on représente le flux du processus. Dans la colonne *Input*, on place les produits fournis et, dans la colonne *Supplier*, on spécifie le fournisseur de ce produit.

De même dans la colonne *Output*, on place les produits fournis par le processus, et on spécifie dans la colonne *Customer* les clients de ces produits.

2.3 Logigrammes

Ils sont utilisés principalement dans les logiciels spécialisés dans l'approche management de la qualité. Ils proposent une présentation matricielle reliant des activités et des acteurs.

Figure 4.1.9 – Cartographie matricielle



Sur chaque activité et sur chaque lien, on associe par hypertexte des informations, telles que :

- les informations ou produits transmis entre les activités ;
- les modes opératoires et instructions de l'activité ;
- les commentaires.

3. Définir les limites du projet

Une erreur classique l'on énonce un problème consiste à rechercher directement une solution sans avoir positionné correctement le problème.

L'étape « Définir » doit pousser le *Black Belt* à rassembler tous les éléments qui lui permettront de remonter aux causes qui sont à la racine du problème.

Pour y parvenir, il faudra bien définir au départ le périmètre du projet. A cet effet, il faut procéder à un déballage d'idées avec le groupe de travail en se

servant éventuellement de plusieurs outils qui peuvent améliorer l'efficacité de la réflexion, notamment les sept outils de base de la qualité⁴.

Outre ces outils de base, plusieurs méthodes ont fait preuve d'une grande efficacité :

- le diagramme des « 5 pourquoi » ;
- le diagramme « est/n'est pas » ;
- le diagramme « dedans dehors ».

3.1 Diagramme des « 5 pourquoi ? »

A partir des CTQ – qui ont été déterminés dès le début de l'étape « Définir »–, on doit rechercher les causes possibles de non-satisfaction du client.

La méthode des « 5 pourquoi ? » est une technique d'analyse des causes profondes d'un problème. Son intitulé trouve son origine dans un principe de gestion japonais selon lequel demander pourquoi au moins cinq fois garantit la découverte de la ou les causes d'un problème.

4. Les sept outils de base de la qualité : Les sept nouveaux outils de management de qualité : *Le diagramme d'affinité, * Le diagramme des relations, * Le diagramme en arbre, *le diagramme matriciel, *Le diagramme de décision, * Le diagramme en flèche, * L'analyse factorielle des données.

Le principe emprunte les étapes suivantes :

1. Se demander « pourquoi la situation existe ? »
2. Se redemander, pour chaque réponse proposée, « pourquoi la situation existe ? »
3. Répéter les étapes 1 et 2 cinq fois ou s'arrêter lorsqu'on n'est plus capable de fournir une réponse.

On dissocie dans le diagramme des « 5 pourquoi » la génération du problème et la diffusion du problème :

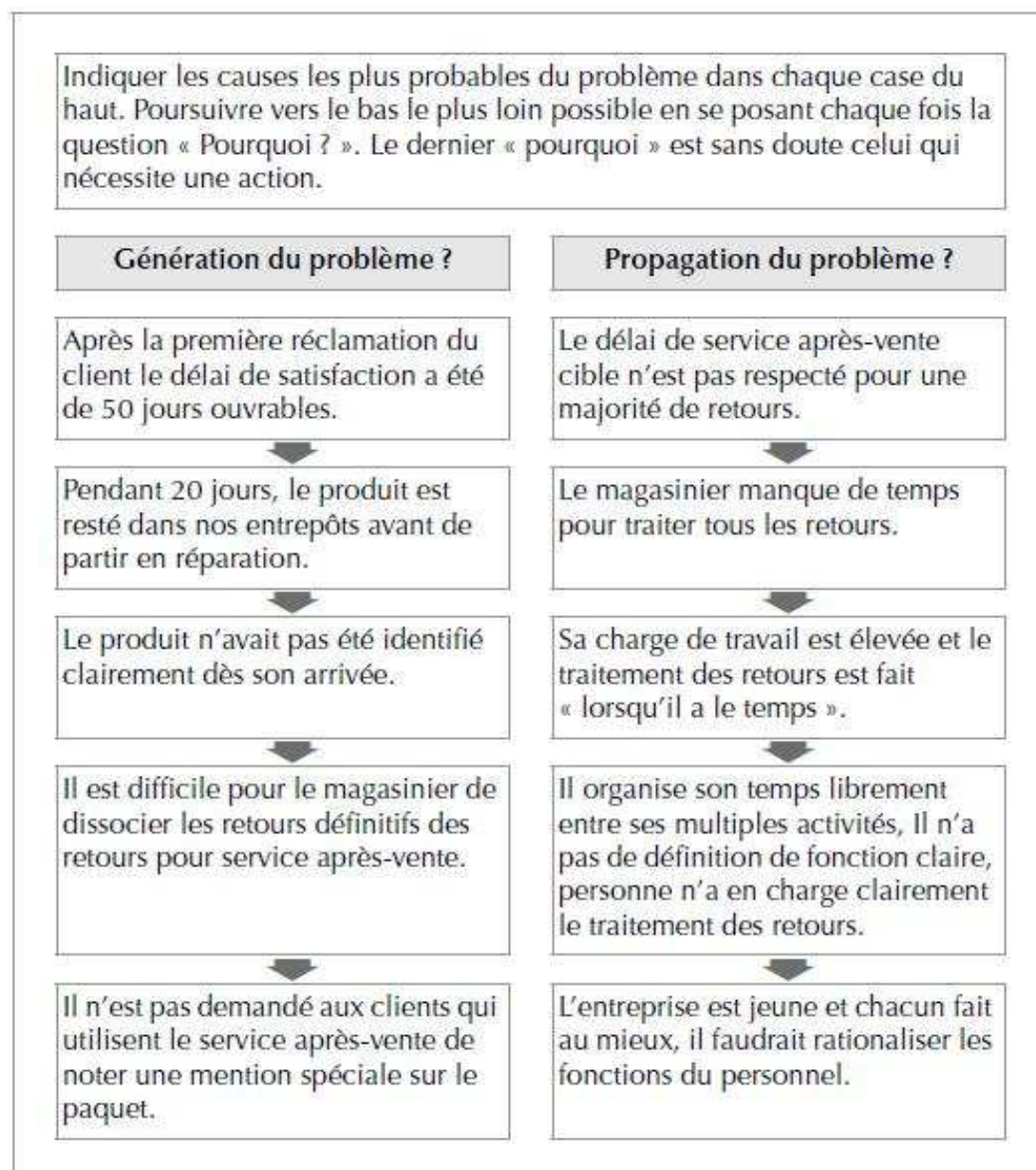
- * La génération du problème se pose la question sur ce qui est la source du problème.

- * La diffusion se pose les questions « Pourquoi ce problème n'est pas détecté ? », « Pourquoi a-t-il atteint un client ? ».

L'exemple ci-dessous (figure 4.1.10) concerne une entreprise de vente par correspondance à partir d'un site Internet. Elle a identifié une caractéristique critique pour le client : la rapidité du service après-vente.

Pour traiter ce problème, on a utilisé un traceur, c'est-à-dire que l'on a choisi de suivre une commande en particulier.

Figure 4.1.10 – Diagramme des « 5 pourquoi »



En se demandant « pourquoi », on veut obtenir de l'information. En refusant de se satisfaire d'une seule explication, on aborde le problème dans une perspective différente, ce qui améliore les chances d'en cerner les causes.

3.2 Diagramme « Est/N'est pas »

Le diagramme « Est/N'est pas » couplé avec une approche « QQQQCP » force à se poser les bonnes questions et évite d'adopter directement une solution triviale qui se révèle souvent être en fait une fausse bonne idée. Il a également pour objectif de faire apparaître des oppositions fortes qui seront très utiles pour les étapes « Mesurer » et « Améliorer ».

Figure 4.1.11 – Diagramme « Est/N'est pas »

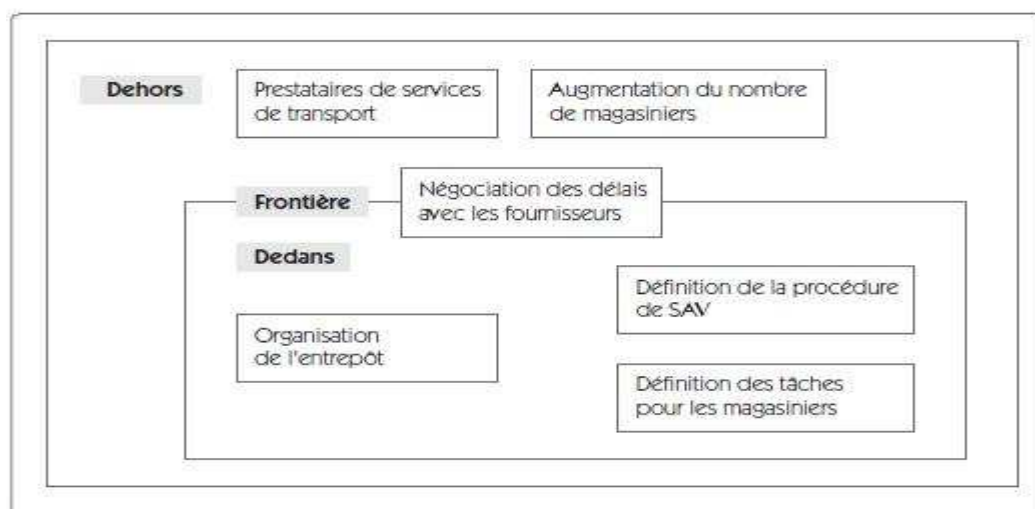
	EST	N'EST PAS
QUI	Quel est l'objet ? Et plus précisément ?	Quels sont les objets similaires qui pourraient aussi être défectueux, mais qui ne le sont pas ?
QUOI	Quel est le défaut ? Et plus précisément ?	Quels sont les autres défauts que l'objet pourrait avoir, mais qu'il n'a pas ?
OÙ	Où, géographiquement, observe-t-on l'objet défectueux ? Et plus précisément ? Où, sur l'objet, observe-t-on le défaut ? Et plus précisément ?	À quel autre endroit pourrait-on l'observer, mais on ne l'observe pas ? À quel autre endroit de l'objet pourrait-on l'observer, mais on ne l'observe pas ?
QUAND	Quand, historiquement, a-t-on enregistré ce problème pour la première fois ? Et plus précisément ? Quelle est la fréquence d'apparition ? Quand, dans le cycle de vie de l'objet, ce défaut apparaît-il ? Et plus précisément ?	À quel autre moment aurait-on pu l'enregistrer, mais on ne l'a pas enregistré ? Quelle autre fréquence aurait-on pu avoir et on ne l'a pas eue ? À quelles autres étapes de la vie de l'objet le défaut aurait-il pu apparaître et il n'est pas apparu ?
COMMENT	Comment et sous quelle forme apparaît le défaut ? Quelles sont les conséquences du problème (coûts, temps, ressources) ?	Sous quelle forme pourrait apparaître le défaut, mais il n'apparaît pas ? Quelle aurait pu être l'importance du problème ?
POURQUOI	Pourquoi y a-t-il d'objets défectueux ?	Pourquoi y a-t-il des objets qui pourraient être défectueux, mais ne le sont pas ?

3.3 Diagramme « Dedans/Dehors »

A l'issue du premier déballage d'idées, qui aura été enrichi par la mise en place d'outils tels que le diagramme des « 5 pourquoi », « Est/N'est pas », le groupe de travail est désormais capable de déterminer de façon assez précise les limites du projet. Le diagramme « Dedans/Dehors » est un outil de travail en groupe qui permet de parvenir à un consensus sur ce qui entre ou non dans le cadre du projet.

C'est un outil de travail en groupe, très simple à utiliser. On colle sur un mur une grande feuille de papier sur laquelle on dessine un cadre qui présentera les limites du projet.

Figure 4.1.12 – Diagramme « Dedans/Dehors »



Le groupe de travail va ensuite noter sur des post-it les différents éléments qui lui semblent faire partie du projet ou qui sont en dehors du cadre de l'étude. Ces post-it seront ensuite collés sur la feuille après discussion et consensus du groupe pour définir si l'item est dans ou hors cadre par rapport au projet.

En cas de désaccord du groupe, on colle le post-it sur la frontière du cadre ; il faudra sans doute revenir sur ce point dans les étapes ultérieures. Un item sur la frontière signifie que le groupe se pose des questions sur le sujet et une des missions du projet Six Sigma sera d'éclairer cette question.

L'exemple choisi (figure 4.1.12) reprend quelques items concernant l'entreprise de vente par correspondance, laquelle souhaite améliorer les délais sur son service après-vente.

Les diagrammes présentés dans cette première étape ne permettent que de mettre en évidence des orientations de la démarche. Pour pouvoir améliorer le processus, il faut être capable de mettre des chiffres derrière ces orientations. Cela sera l'objectif de l'étape « **Mesurer** ».

Etape 2 - Mesurer

La première étape nous a permis de parfaitement définir le cadre du chantier et de mettre en évidence les paramètres critiques pour la qualité telle qu'elle est vue par le client (CTQ) et d'orienter le projet vers des causes racines probables. Dans l'étape suivante, nous allons mettre en place un moyen de mesure qui permet de mesurer le z du processus. Afin d'avoir des données suffisamment fiables pour pouvoir les exploiter, on vérifiera au préalable que la variabilité de notre système de mesure est faible par rapport à la variabilité des éléments que l'on cherche à mesurer.

Un des apports essentiels de Six Sigma tient à l'importance qui y est donnée à la mesure. Le physicien britannique Lord KELVIN exprimait cela ainsi en 189 : « Lorsque vous pouvez mesurer ce dont vous parlez et l'exprimer par un nombre, vous en connaissez quelque chose. » Cela fait donc bien longtemps que la mesure est une base de la connaissance, mais peu d'approches d'amélioration des performances ont fait de la mesure un préalable indispensable, comme Six Sigma le préconise.

La mesure doit porter non seulement sur le produit mais aussi et surtout sur le processus. Lorsque l'entreprise est capable de quantifier la satisfaction des clients sur les CTQ et le fonctionnement de ses processus, elle peut relier les deux et mettre ainsi en évidence les caractéristiques qui ont un impact fort sur la performance. Elle peut ainsi manager à partir de faits, plutôt que par sensations.

La mesure va donc porter sur trois éléments :

- les sorties du processus (les Y) perçues par le client ;
- les entrées du processus (les X) ayant une influence sur les Y ;
- les variables du processus permettant de caractériser sa performance en termes de coût, qualité, sécurité.

Le but de l'étape « Mesurer » est donc de :

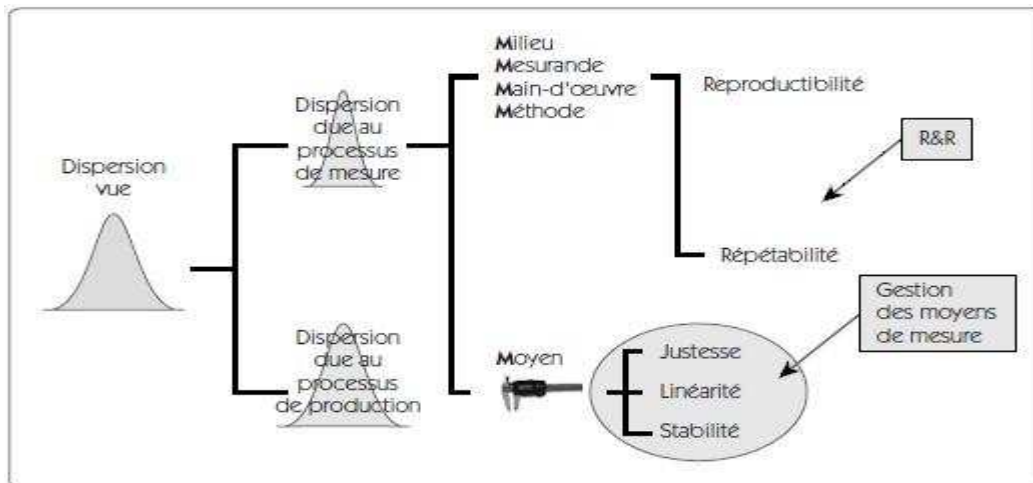
- mesurer les CTQ ;
- mesurer le z du procédé ;
- établir des relations entre les X et les Y du processus à fin d'améliorer l'efficacité de ce dernier.

1. Mesurer les CTQ

Un des objectifs de l'étape « Mesurer » est de mettre en place un processus de mesure capable de traduire la façon dont on satisfait le client. Autrement dit, mettre en place un processus qui permet de mesurer les caractéristiques critiques pour la qualité (Les CTQ).

La mesure ne fait pas partie des cinq causes fondamentales de variabilité du processus (Les 5M). En effet c'est un autre processus avec ses propres 5M (Moyen, Milieu, Méthodes, Mesurande, Main-d'œuvre) qui entre en partie dans la dispersion totale vue. Donc il faut s'assurer qu'on maîtrise bien le processus de mesure avant de l'utiliser.

4.2.1 – Décomposition de la dispersion vue



Le schéma illustre la décomposition de la dispersion vue : une partie de cette dispersion provient du processus de production, et une autre du processus de mesure.

L'additivité des variances nous permet d'écrire : $\sigma_T^2 = \sigma_P^2 + \sigma_M^2$ avec

σ_T^2 : Variance totale

σ_P^2 : Variance réelle du processus de production

σ_M^2 : Variance du processus de mesure

Le but de l'étude R&R est de vérifier que la part de la variance de mesure est faible par rapport à la variance du processus. C'est-à-dire qu'on veut vérifier qu'un écart entre deux mesures traduit bien un écart entre deux produits différents.

1.1 Définitions

Justesse : écart systématique entre la moyenne de plusieurs mesures et la valeur de référence.

Linéarité : différence de justesse sur la plage d'utilisation de l'instrument.

Stabilité : variation des résultats d'un système de mesure sur une même caractéristique et le même produit sur une procédure de temps prolongée. Ces trois points dépendent principalement du moyen de mesure et doivent être vérifiés périodiquement par l'entreprise. C'est le rôle de la « Gestion des moyens de mesure ».

Répétabilité : variations de mesures successives obtenues sur un même mesurande dans les mêmes conditions.

Reproductibilité : variations de mesures obtenues sur un même mesurande en faisant varier une condition.

Les parties répétabilité et reproductibilité dépendent principalement des 4M autres que « Moyen » dans le processus de mesure (figure 4.2.1). Une bonne gestion des moyens de mesure dans une entreprise ne garantit pas la répétabilité et la reproductibilité. C'est la raison pour laquelle il faut réaliser une étude spécifique.

1.2 Analyse du système de mesure (MSA)

Les entreprises relevant du domaine de l'automobile, utilisent souvent les définitions suivantes qui peuvent présenter de légères différences avec les définitions précédentes.

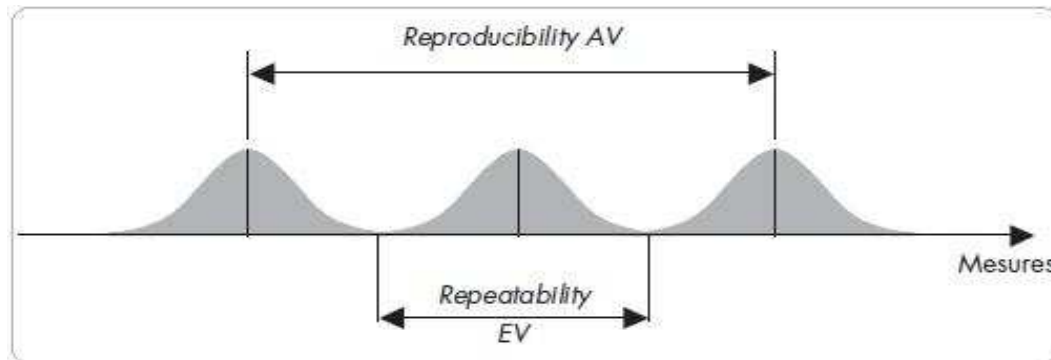
- * La répétabilité est nommée EV (Equipment Variation).

- * La reproductibilité représente le complément de variation engendré par les autres « M ». Le plus souvent elle est limitée à l'influence du changement d'opérateur AV (Appraiser Variation).

* La globalité des variations est représentée par un indicateur de dispersion GRR (Gage Repeatability and Reproducibility), obtenu à l'aide de l'additivité des différentes variances.

* L'erreur de justesse est nommée « Biais » (Bias).

Figure 4.2.2- Termes du MSA



L'analyse du système de mesure consiste à réaliser des tests qui vont nous permettre de juger sa capacité, ainsi sa validation.

- Test de linéarité :

L'étude de linéarité consiste à étudier la linéarité de l'instrument de mesure à partir de plusieurs étalons dont la valeur est connue et garantie.

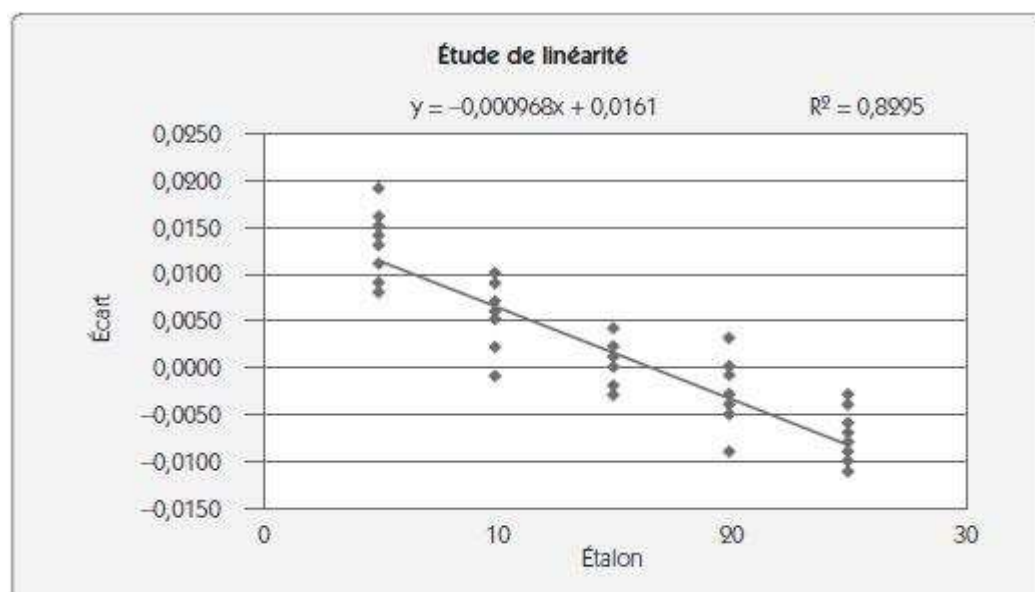
Dans l'exemple présenté (figure 4.2.3), on a pris 5 étalons (5, 10, 15, 20, 25) qui ont chacun été mesurer 10 fois.

Figure 4.2.3 – Données d’une étude de linéarité

Étalon	Y	Étalon	Y	Étalon	Y	Étalon	Y	Étalon	Y
5	5,011	10	10,006	15	15,002	20	19,995	25	24,996
5	5,009	10	10,01	15	15,001	20	19,996	25	24,989
5	5,013	10	10,002	15	14,997	20	20,003	25	24,992
5	5,016	10	10,005	15	15	20	20	25	24,994
5	5,014	10	10,006	15	15,004	20	19,999	25	24,994
5	5,019	10	9,999	15	15,001	20	19,997	25	24,991
5	5,014	10	10,007	15	14,998	20	19,999	25	24,997
5	5,009	10	10,005	15	15,001	20	19,997	25	24,993
5	5,008	10	10,002	15	15,001	20	19,996	25	24,989
5	5,015	10	10,009	15	14,998	20	19,991	25	24,99

En dessinant l’écart entre les valeurs et les étalons en fonctions des valeurs des étalons, on peut visualiser l’erreur de linéarité et la dispersion de mesure sur un étalon (figure 4.2.4).

Figure 4.2.4 – Test de linéarité



Ce graphique est complété par deux études statistiques :

- **La régression linéaire** sur la caractéristique de la droite obtenue $y = ax + b$, (voir plus de détail dans l'étape « Analyser »).

Figure 4.2.5 – Equation de régression

Équation de régression : écart = $-0,000968$ Étalon + $0,0161$				
Prédicteur	Coef.	Sigma	t	P
Constant	0,0161	0,001050	15,25	0,000
Étalon	-0,000968	0,00006334	-15,28	0,000

- **L'analyse du Biais** pour chaque position testée avec un test t pour savoir si ce biais est significatif. On peut éventuellement compenser ce biais qui forme une erreur systématique.

Figure 4.2.6 – Biais par position

Étalon	Moyenne	Sigma	t	p	Biais
5	0,013	0,0033089	12,2658718	0,000	Significatif
10	0,00518275	0,00331817	4,93925957	0,001	Significatif
15	0,00026431	0,00203675	0,41036934	0,692	Non significatif
20	-0,00276747	0,0032677	-2,67818922	0,025	Significatif
25	-0,007478	0,00280676	-8,42519325	0,000	Significatif

Dans notre exemple, l'instrument a une erreur de linéarité importante, doublée d'une dispersion de mesure autour de cet écart de linéarité, également importante. Pour être acceptable, l'instrument doit avoir un cumul d'erreur de linéarité et de dispersion négligeable par rapport à la tolérance que l'on cherche à mesurer.

Une étude de linéarité satisfaisante ne dispense pas de faire un test R&R.

- Test Gage R&R :

L'étude Gage R&R est utilisée pour évaluer les variations dues au système de mesure pour la collecte des données en continu (souvent mesurée par des jauges) sur les caractéristiques physiques, telles que :

- Poids
- Température
- Vitesse
- Adhérence ...



L'étude Gage R&R permet de tester la répétabilité et la reproductibilité d'un système de mesure :

- * Pour tester la répétabilité, on fait mesurer plusieurs fois par le même opérateur, sur la même caractéristique, la même mesure.
- * Pour tester la reproductibilité, on identifie quelles sont les conditions de mesure qui sont susceptibles de changer (opérateurs différents par exemple) et on réalise une mesure dans les deux conditions.
- * Idéalement, les tests Gage R&R sont aveugles (les opérateurs ne savent pas que ceci est un test spécial). Egalement, ils ne doivent pas savoir quelle partie sont-ils entrains de mesurer.
- * L'analyse des résultats de l'étude révèle la source de variation qui provient soit de différences dans les opérateurs (ou jauges), ou dans les unités elles-mêmes.

Les indices du système de mesure

- **Variation de l'étude %R&R**

Décrit la variation du système de mesure par rapport à la variation totale

$$\text{Etude \% R\&R} = (S_{\text{Gage R\&R}} / S_{\text{Total variation}}) \times 100$$

Interprétation:

Figure 4.2.7 – Tableau de décision en fonction du %R&R

Etude %R&R	0 - 10 %	10 - 20 %	20 - 30 %	> 30 %
Décision	Désirer	Acceptable	Marginal	Inacceptable

- **% Processus /Tolérance :**

Décrit la variation du système de mesure par rapport à la tolérance pour les pièces.

$$\%P/T = (S_{\text{Gage R\&R}} / \text{Tolérance}) \times 100$$

- **Nombre de catégories distinctes:**

Représente le nombre de catégories au sein des données du processus que le système de mesure peut distinguer.

$$\text{NCD} = (S_{\text{Pièce}} / S_{\text{Gage R\&R}}) \times 1,41$$

Au moins cinq catégories sont souhaitées pour un système de mesure adéquat.

➤ **Exemple d'une étude Gage R&R avec un logiciel de statistique**

- Instrument : Viscosimètre (Pa.s)
- Opérateur : 3 opérateurs (Yassine, Khalid et Youssef)
- Lot : 5 unités
- Essaie : 4 mesures pour chaque opérateur
- Tolérance : 10 +/- 4

• **Données de l'étude :**

Lot	Opér	Mesure	Lot	Opér	Mesure	Lot	Opér	Mesure	Lot	Opér	Mesure	Lot	Opér	Mesure
1	Yassine	9,92	2	Yassine	10,31	3	Yassine	11,79	4	Yassine	8,40	5	Yassine	9,04
1	Yassine	9,70	2	Yassine	10,44	3	Yassine	11,86	4	Yassine	8,41	5	Yassine	9,11
1	Yassine	9,42	2	Yassine	10,89	3	Yassine	11,62	4	Yassine	8,56	5	Yassine	9,08
1	Yassine	9,65	2	Yassine	9,97	3	Yassine	11,85	4	Yassine	8,18	5	Yassine	9,21
1	Khalid	9,36	2	Khalid	10,80	3	Khalid	11,77	4	Khalid	8,51	5	Khalid	9,34
1	Khalid	9,85	2	Khalid	10,45	3	Khalid	11,90	4	Khalid	8,20	5	Khalid	9,01
1	Khalid	9,96	2	Khalid	10,78	3	Khalid	11,50	4	Khalid	8,68	5	Khalid	9,19
1	Khalid	9,76	2	Khalid	10,08	3	Khalid	11,79	4	Khalid	8,58	5	Khalid	9,31
1	Youssef	9,63	2	Youssef	9,91	3	Youssef	11,59	4	Youssef	8,74	5	Youssef	9,46
1	Youssef	9,88	2	Youssef	10,44	3	Youssef	11,86	4	Youssef	8,32	5	Youssef	9,29
1	Youssef	9,89	2	Youssef	10,64	3	Youssef	11,83	4	Youssef	8,59	5	Youssef	9,38
1	Youssef	9,79	2	Youssef	9,98	3	Youssef	11,89	4	Youssef	8,33	5	Youssef	9,10

• **Modèle :**

Soit Y_{ijr} représentant la mesure de l'opérateur i pour l'unité j lors de la répétition r . On considère que l'on a :

$$Y_{ijr} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijr} \quad \text{avec}$$

* μ représente la moyenne de l'ensemble des valeurs ;

* α_i représente l'effet dû à l'opérateur i ;

* β_j représente l'effet dû à l'unité j ;

* $(\alpha\beta)_{ij}$ représente l'effet dû à l'interaction opérateur / unité ;

* ε_{ijr} représente l'erreur distribuée normalement avec une moyenne de 0 et une variance de σ_ε^2 .

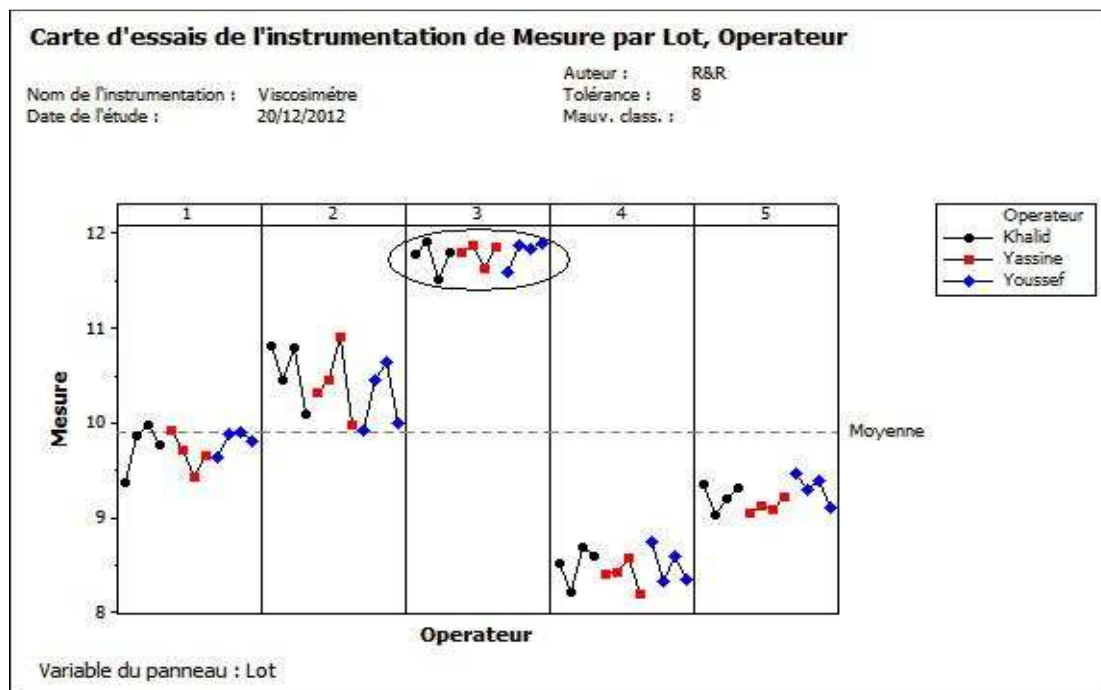
L'additivité des variances donne donc : $\sigma_y^2 = \sigma_\alpha^2 + \sigma_\beta^2 + \sigma_{(\alpha\beta)}^2 + \sigma_\varepsilon^2$

Lignes directrices pour la conception de l'étude gage R&R

- Les unités doivent représenter toute la gamme de variation dans le processus ;
- Chaque opérateur mesure chaque unité plus d'une fois ;
- Les données doivent être équilibrées : chaque opérateur doit mesurer chaque unité du même nombre de fois ;
- Cela devrait être une étude à l'aveugle ;
- L'ordre devrait être randomisé.

• Résultat de l'étude

1- Carte d'essais de l'instrumentation de mesure :



*Par exemple le pour le Lot N°1

- Chaque point représente une seule mesure par une seule personne, et ils sont connectés avec une ligne.
- Chaque couleur représente les mesures d'un opérateur, donc à ce niveau on peut juger la répétabilité.
- Chaque couleur différente représente un opérateur différent, donc on peut juger la reproductibilité.

* Le lot N°3 présente une très petite différence dans la répétabilité et la reproductibilité.

2-Analyse Gage R&R (Session et Graphes)

* Session :

R&R d'instrumentation de Mesure
 Nom de l'instrumentation : Viscosimètre
 Date de l'étude : 20/12/2011
 Tolérance : 8

Méthode ANOVA :

- Tableau ANOVA à double entrée avec interaction

Source	DL	Somme des carrés	CM	F	P
Lot	4	75,8654	18,9663	599,742	0,000
Opérateur	2	0,0557	0,0279	0,881	0,451 (> α)
Lot * Opérateur	8	0,2530	0,0316	0,649	0,733 (> α)
Répétabilité	45	2,1943	0,0488		
Total	59	78,3684			

Alpha = 0,25 (α = 25 %)

- Tableau ANOVA à double entrée sans interaction

Source	DL	Somme des carrés	CM	F	P
Lot	4	75,8654	18,9663	410,742	0,000
Opérateur	2	0,0557	0,0279	0,603	0,551
Répétabilité	53	2,4473	0,0462		
Total	59	78,3684			

Composantes de variation et leurs contribution :

Source	Comp.Var	% contribution (de Comp.Var)
R&R d'instrumentation total	0,04618	2,85
Répétabilité	0,04618	2,85
Reproductibilité	0,00000	0,00
Opérateur	0,00000	0,00
Lot à Lot	1,57668	97,15
Variation totale	1,62286	100,00

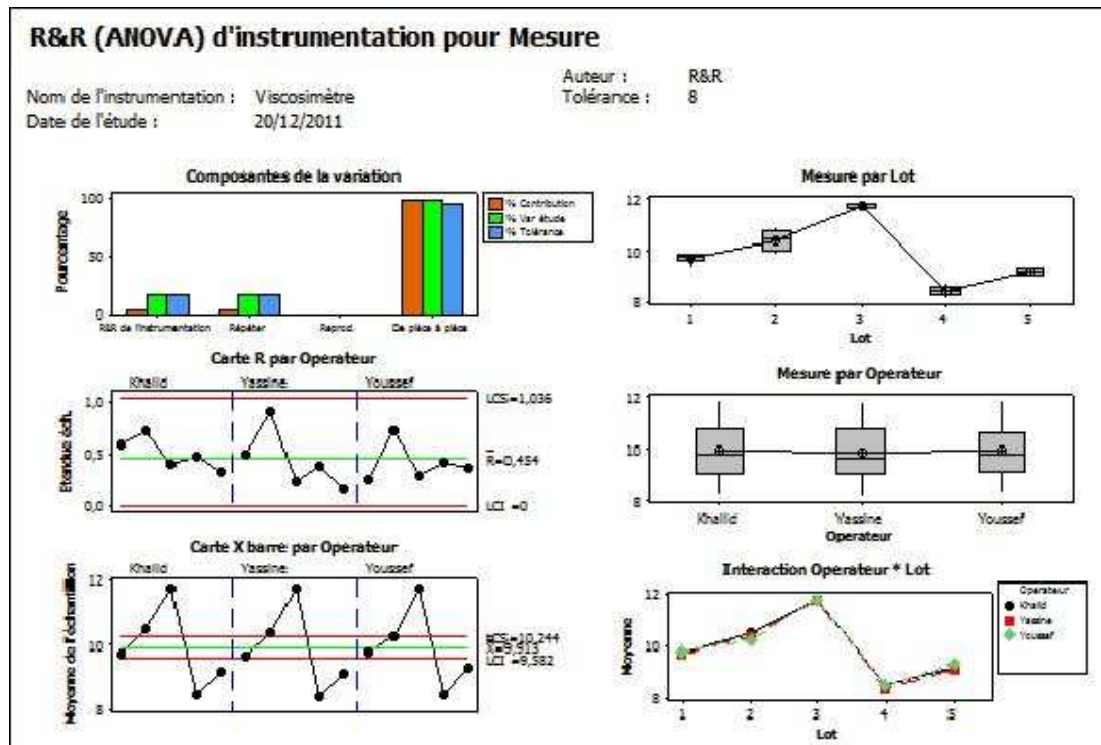
Tolérance :

Source	Ecart type(σ)	Variations d'étude (6 x σ)	% var étude (%VE)	% tolérance (VE/Tolérance)
R&R d'instrumentation total	0,21489	1,28931	16,87	16,12
Répétabilité	0,21489	1,28931	16,87	16,12
Reproductibilité	0,00000	0,00000	0,00	0,00
Opérateur	0,00000	0,00000	0,00	0,00
Lot à Lot	1,25566	7,53396	98,57	94,17
Variation totale	1,27391	7,64348	100,00	95,54

Nombre de catégories distinctes

Nombre de catégories distinctes = 8 (-8, 24) (NCD>5)

* Graphes :



3-Les conclusions :

- C'est un système de mesure acceptable (10 – 20%) pour la gamme des unités testées (% R&R = 16,12) ; on peut également calculer l'indice Cmc (capabilité de moyen de contrôle) qui doit être supérieur à 4 pour accepter l'instrument :

$$Cmc = \text{Tolérance} / R\&R = 8 / 1,28931 = 6,2 \quad (Cmc > 4).$$
- L'effet de l'opérateur et de l'interaction Lot/opérateur sont non significatifs ($P > \alpha$) ;
- Le système de mesure peut distinguer huit catégories ($NCD > 5$), ce qui nous a permis de distinguer la composante de variation Lot à Lot ;
- Dans le graphe des étendues (Carte-R), tous les points sont dans les limites de contrôle, ce qui nous indique l'absence d'une mesure aberrante (Cause spéciale). Dans ce cas il faudrait recommencer la mesure.
- Si encore le raffinement du système de mesure est souhaité, il faut enquêter sur la répétabilité.

2. Mesurer le processus

Cette deuxième phase de l'étape « Mesurer » consiste à réunir des informations qui soient mesurables sur le processus.

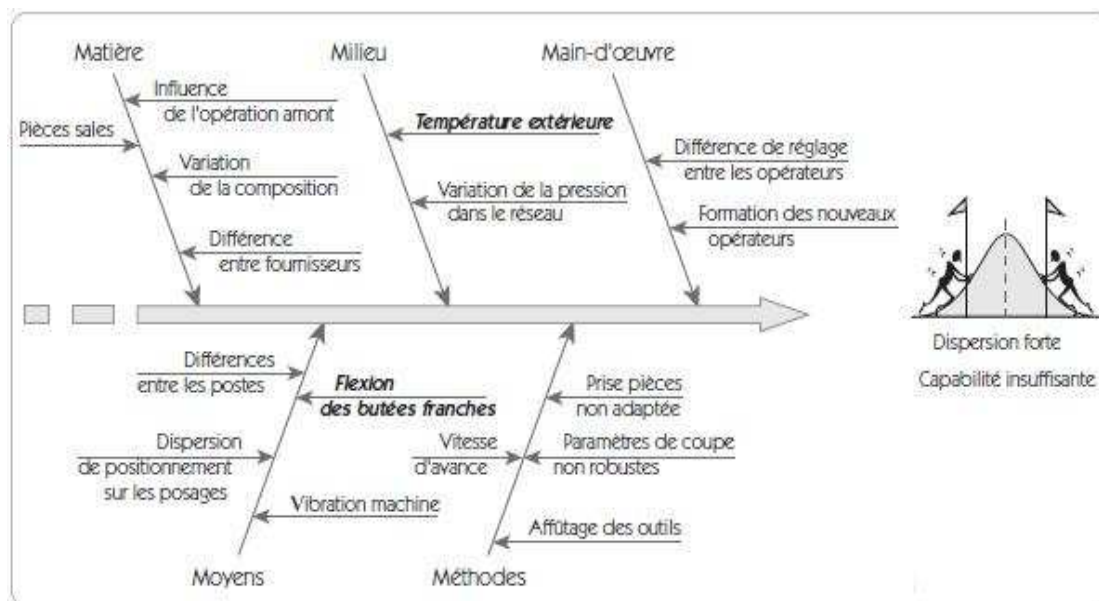
Cependant, pour faire en sorte que ces mesures soient pertinentes, on doit chercher à limiter la variabilité. Pour cela, on commence par améliorer le processus sans avoir recours à des statistiques, simplement en figeant le plus possible de facteurs suite à une analyse des 5M.

2.1 Analyse des 5M du processus

Dans cette analyse, on doit se poser la question suivante : Quelles sont les causes de la variabilité sur le processus source de non-satisfaction des clients ?

On recherchera tous les X influents sur le centrage et sur la dispersion de Y.

Figure – 4.2.8 – Diagramme des 5M (Diagramme d'Ishikawa)



Un des outils d'analyse parmi les plus utilisés est le diagramme en arête de poisson (diagramme d'Ishikawa). On identifie cinq causes fondamentales de variabilités :

- **Main d'œuvre** directe ou indirecte du processus.
- **Moyens** mis en œuvre (machine, outillage).
- **Méthodes** retenues pour la conduite du processus.
- **Matières** utilisées.
- **Milieu** dans lequel le processus évolue.

A partir de cette analyse, on doit identifier les éléments dont on a la garantie qu'ils ont une influence sur la variabilité. On fait par exemple apparaître en couleur ces éléments. Dans l'exemple présenté, deux éléments seulement étaient maîtrisés :

- Température extérieure ;
- Flexion des butées franches.

2.2 Figer les éléments non maîtrisés

Une des premières tâches d'amélioration de Six Sigma commence dès l'analyse des 5M. Il s'agit de « Ramasser les fruits au pied de l'arbre ».

En effet, avant de mettre en place de grosses améliorations (« aller chercher les fruits au sommet de l'arbre ») qui feront l'objet de l'étape

« Innover/améliorer », on doit chercher à maîtriser la variabilité en bloquant le plus possible toutes les petites sources de variabilité. L'analyse des 5M nous montre qu'il existe de nombreuses sources de variabilité, qui peuvent être bloquées à moindre frais très rapidement. Ce serait dommage de s'en priver.

Figer les éléments non maîtrisés consiste donc à passer en revue l'ensemble des sources de variabilité qui ont été identifiées (décentrage et dispersion), et à trouver pour chacune s'il existe une solution simple permettant de réduire cette variabilité à moindre frais.

Le tableau présenté ci-après (figure 4.2.9) montre quelques exemples simples de réduction de variabilité qui ont été réalisés à partir du diagramme de 5M (figure 4.2.8).

Figure 4.2.9 – Réduction des sources de variabilité

Source de variabilité	Solution envisagée
Différence de réglage entre les opérateurs	Rédaction d'une fiche de poste formalisant le réglage
Formation des nouveaux opérateurs	Mise en place d'une formation au poste
Variation de la pression dans le réseau	Mise en place d'un dispositif d'amortissement des variations de pression
Pièces sales	Modification de la gamme ➔ passage systématique en machine à laver

Voici les principaux moyens mis en œuvre pour figer les paramètres :

- Modifier le processus pour figer une position ;
- Fixer les valeurs des constantes, même là où cela n'a – a priori – pas d'influence, lorsque cela ne coûte rien ;
- Améliorer les procédures ;
- Figer davantage de consignes ;
- Systématiser la façon de faire ;
- Formaliser la façon de faire sur des documents et vérifier l'application...

A partir de ces actions, on constate généralement une réduction importante de la variabilité. Cette réduction du « bruit » permettra de mieux faire ressortir dans l'étape « Analyser » les X susceptibles de faire progresser de façon importante le processus.

2.3 Etablir la matrice d'impact

La matrice d'impact vient en complément des outils déjà présentés tels que les 5 pourquoi, le Diagramme Est/ N'est pas, Les 5M... qui entre dans le cadre de la formalisation du savoir faire.

Le but de la matrice d'impact est de faire apparaître les relations qui existent – a priori – entre les X du problème (les entrées) et les Y (les sorties). On demande aux participants à la séance de travail de citer et si possible d'évaluer l'impact des X sur l'ensemble des Y du processus. Il ne s'agit pas ici de trouver les facteurs responsables du problème, mais de simplement préciser l'impact de chaque X sur l'ensemble des Y. Cette analyse a beaucoup de similitude avec une analyse de type 5M. Elle est particulièrement utile pour faire apparaître les relations complexes lorsqu'il ya plusieurs CTQ à optimiser.

La figure 4.2.10 montre un exemple simple de matrice d'impact avec 3 caractéristiques critiques Y et 4 caractéristiques X.

Pour chaque CTQ, on affecte un poids, en général de 1 à 5 en fonction de son importance. L'analyse consiste à identifier pour chaque X son impact sur tous les Y. S'il impact fortement on mettra 9, moyennement 3, faiblement 1. Le poids de chaque X est automatiquement calculé en faisant la somme des produits (poids x impact). Ainsi la caractéristique « Lubrification » a un poids de :

$$5 \times 9 + 4 \times 9 + 3 \times 3 = 90$$

Pour chaque X, on affecte une note de capabilité (de 1 à 10) soit en fonction de la connaissance précise de celle-ci, soit de manière empirique. Cette note permet de calculer un coefficient de satisfaction (CS) potentiel sur chaque CTQ

fonction de l'impact des X et de leur capabilité. Ainsi le coefficient de satisfaction du premier CTQ est calculé par la relation :

$$CS = \frac{9 \times 3 + 3 \times 10 + 9 \times 5 + 1 \times 6}{9 \times 10 + 3 \times 10 + 9 \times 10 + 1 \times 10} = 49 \%$$

Le coefficient CS est égal à 100 % si chaque X impactant Y a une capabilité égale à 10. Le profil des coefficients de satisfaction doit refléter le profil des problèmes rencontrés sur les CTQ.

Figure 4.2.10 – Matrice d'impact

			Caractéristique X impactant les Y						
				Lubrification	Profil des dentures	Qualité des lavages	Déformation au montage		
N°	CQT : caractéristiques critiques du produit (Y)	Objectifs	Poids	90	51	54	32	Somme des coefficients	Niveau de satisfaction
1	Précision de marche	± 10	5	⑨	③	⑨	①	22	49 %
2	Robustesse aux positions	± 10	4	⑨	⑨			18	65 %
3	Vitesse de remontage	25	3	③		③	⑨	15	52 %
			Note de capabilité	3	10	5	6		

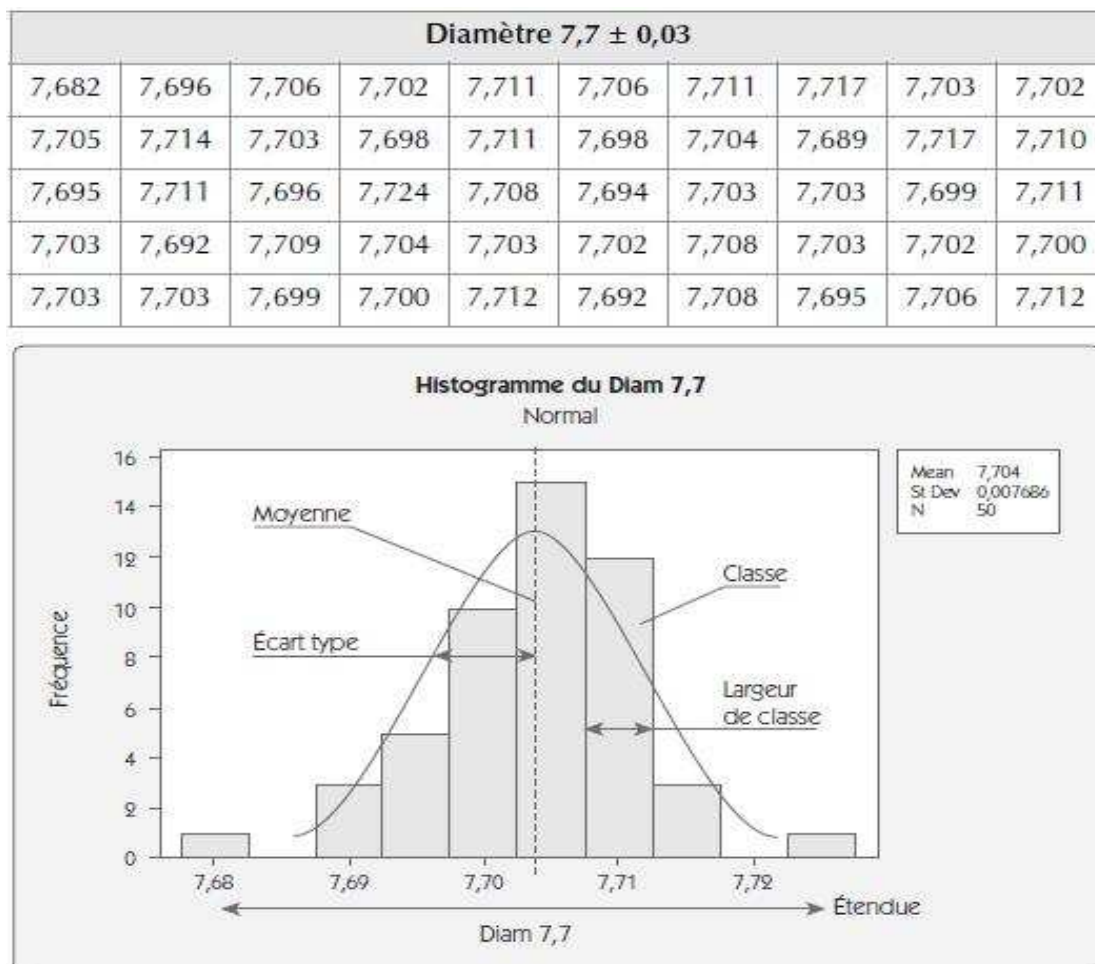
3. Estimer le z du processus

Lorsqu'on dispose d'un moyen de mesure, on veut identifier le niveau de qualité atteint. Pour cela, on doit mesurer le z du procédé. Rappelons que l'objectif d'une démarche Six Sigma est d'atteindre un z supérieur à 6, ce qui correspond à moins de 3,4 défauts par million d'opportunités.

3.1 Représentation graphique des Y

Pour pouvoir calculer le z du processus, il faut disposer d'un certain nombre de valeurs de Y (au moins une trentaine). Le premier travail consiste à représenter ces données sous forme graphique.

Figure – 4.2.11 Histogramme



Un histogramme est un diagramme à barres (rectangles) contigües dont les aires sont proportionnelles aux fréquences.

Chaque rectangle correspond à un regroupement en classe. Le nombre de classes N_c est proportionnel au nombre de valeurs N ; on prend en général :

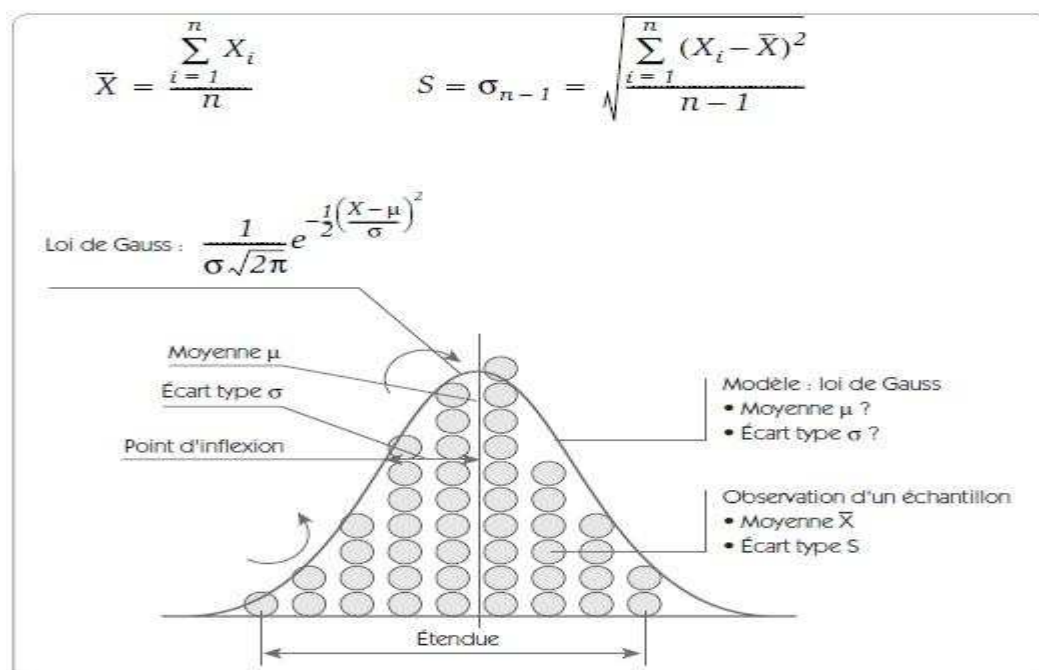
$$N_c = \sqrt{N} \text{ ou } N_c = 1 + \frac{10 \log(N)}{3}$$

La largeur de classe doit correspondre à un multiple de la résolution de l'instrument de mesure. Ainsi, sur l'histogramme, la largeur de classe est égale à 0,006 pour un instrument de mesure qui donnait des valeurs avec une résolution de 0,001.

3.2 Calcul des paramètres de position et de dispersion

Une fois que l'on dispose de ces données, on va qualifier la position et la variabilité de la population. Pour qualifier cette position, on calcule l'estimateur $\bar{X}$ de la moyenne μ , et pour la dispersion on calcule l'estimateur S de l'écart type σ .

Figure 4.2.12 – Représentation d'une gaussienne et calcul des estimateurs

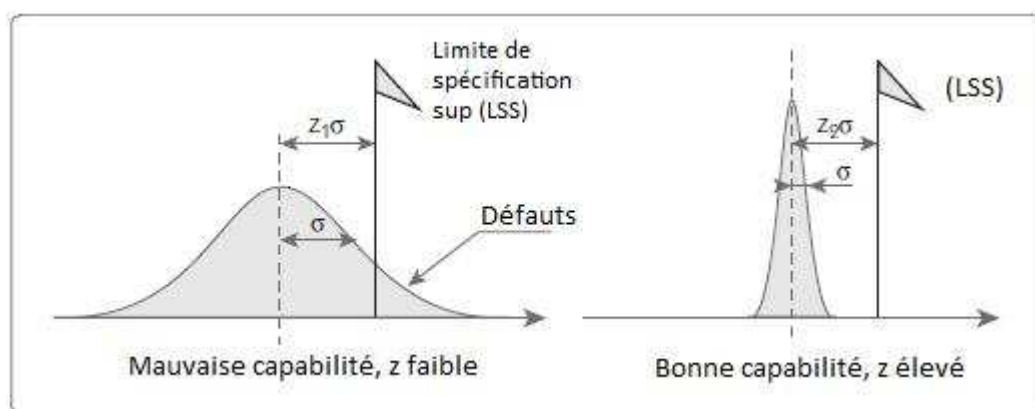


- $\bar{X}$ est un estimateur de la valeur de la moyenne de la population μ . En effet, un autre échantillonnage issu de la même population donnerait une valeur différente $\bar{X}$ pour une même valeur de μ inchangée.

De même, S est un estimateur de la vraie valeur de l'écart type σ . D'un point de vue pratique, l'écart type dans une courbe de Gauss représente la distance entre la moyenne et le point d'inflexion de la courbe.

3.3 Détermination du z à partir d'un échantillon

Figure 4.2.13 – Loi normale et capabilité



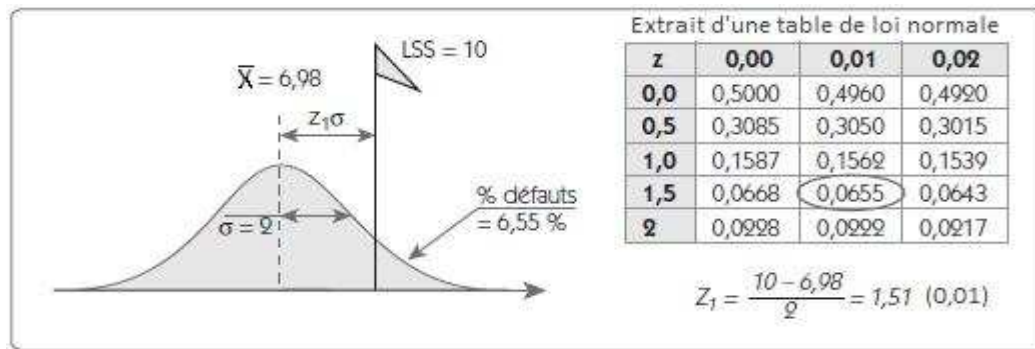
Un processus sera capable de donner satisfaction aux clients si sa dispersion est faible devant la tolérance. Pour caractériser la dispersion, on a vu que le meilleur indicateur était l'écart type. Il est donc possible de caractériser la capabilité du processus par le ratio :

$$z = \frac{LSS - \bar{X}}{\sigma}$$

S'il existe une spécification Supérieure et Inférieure, on peut calculer un z pour chaque spécification.

La figure suivante présente la relation entre le z et le % de non conformes.

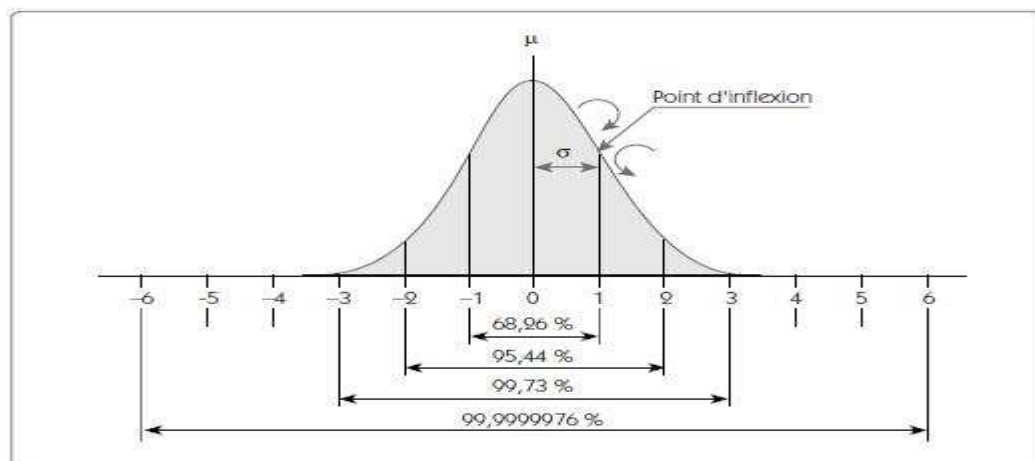
Figure 4.2.14 – Relation entre le z et la proportion hors tolérance



Pour un z donné, dans le cas d'une loi normale de distribution de Gauss, on peut déterminer facilement la proportion de non conformes en utilisant la table de loi normale. Dans l'exemple présenté (figure 4.2.14), le $z_1 = 1,51$ correspond à une proportion de non conformes de 0,0655 soit 6,55%.

Dans le cas de tolérance bilatérales (Min et Max), lorsqu'on procède est centré, la représentation (figure 4.2.15) donne les proportions de non conformités en fonction du z.

Figure 4.2.15 – Relation entre le z et la proportion de non conformes

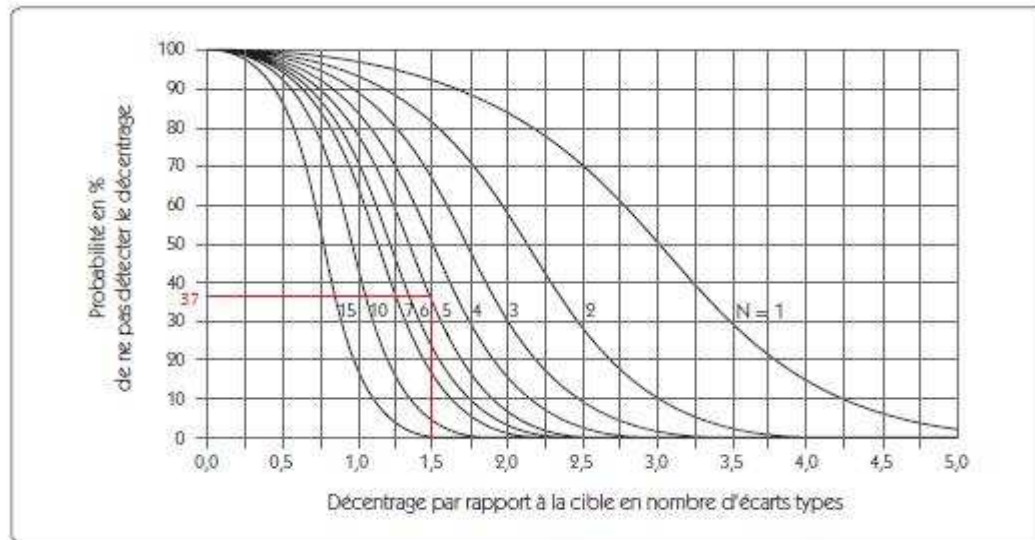


Pour déterminer le z du processus, il faut tenir compte des décentrages inévitables qui vont se produire au cours de la vie du processus.

Même avec les méthodes de pilotage par carte de contrôle (voir Etape 5 « Contrôler ») on ne sait pas bien détecter un décentrage inférieur à 1,5 écart type (figure 4.2.16).

Par exemple, dans un échantillon de taille 5, la probabilité de ne pas détecter un décentrage de $1,5\sigma$ est de 37,4%.

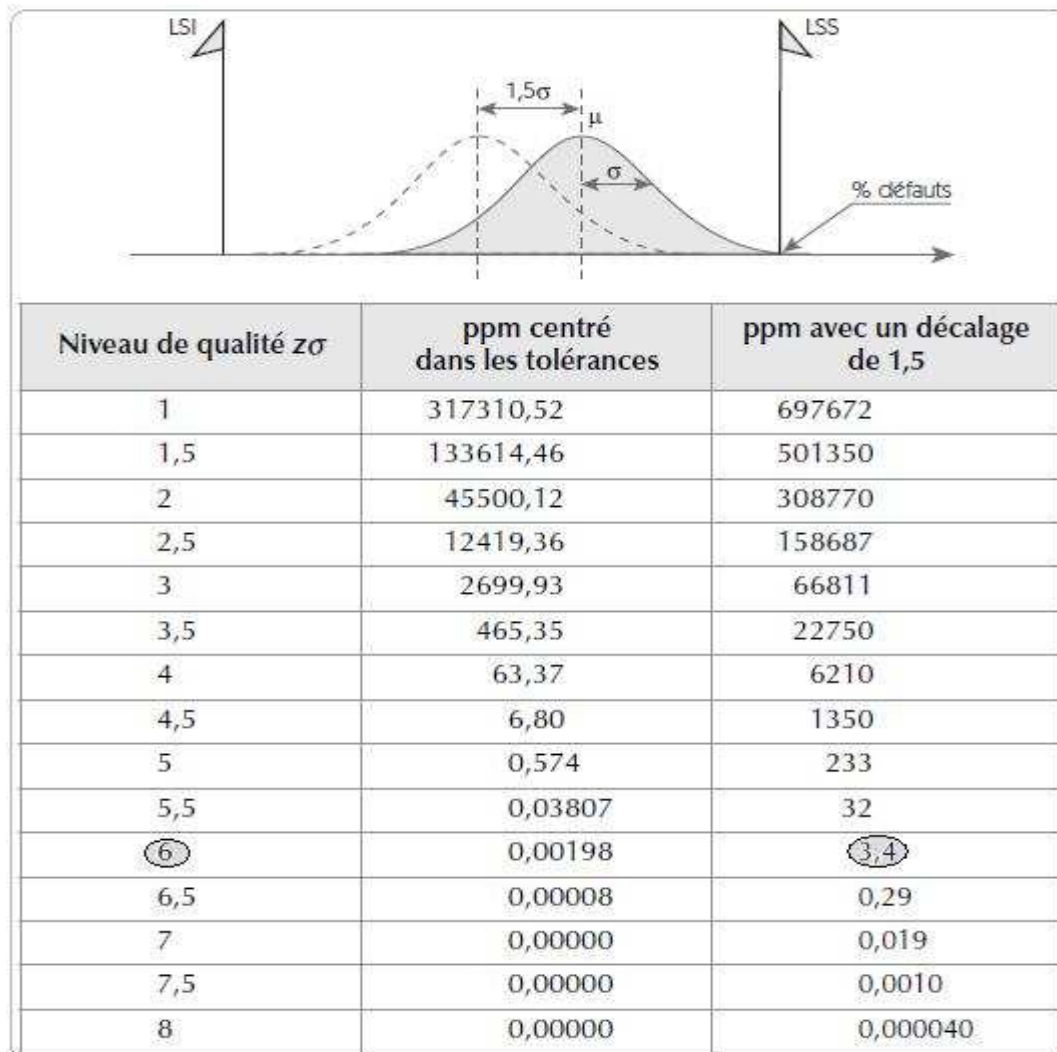
Figure 4.2.16 – Courbe d'efficacité des cartes de contrôle



On note sur cette courbe la difficulté de détecter un décentrage inférieur à 1,5 σ .

De manière arbitraire, on enlève donc 1,5 écart type pour déterminer la proportion de non conformités d'un $z_{\text{processus}}$ (figure 4.2.17).

Figure 4.2.17 – Défauts par million en fonction du niveau de qualité z



4. Le concept de capabilité

La capabilité se mesure par le rapport entre la performance demandée et la performance réelle d'une machine (ou procédé).

Une capabilité 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.

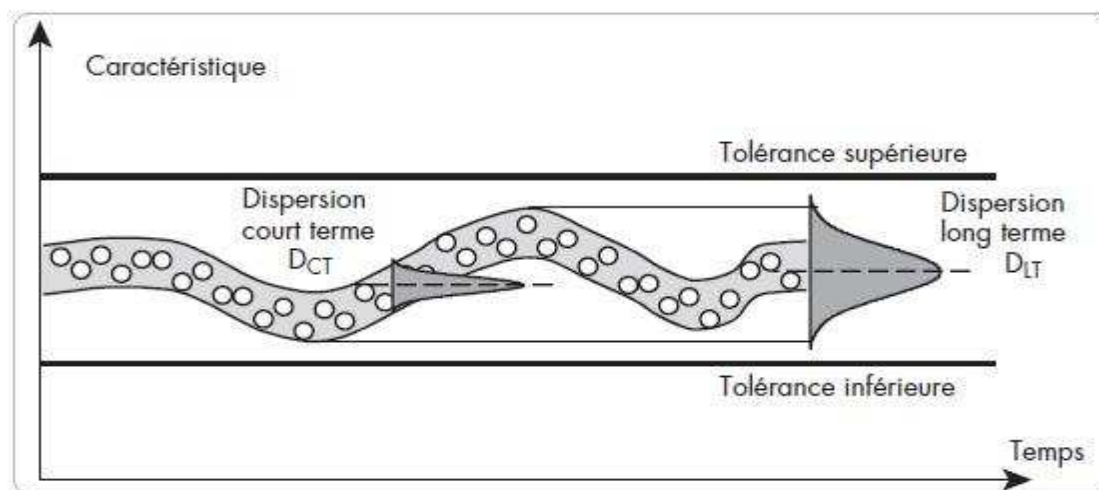
Les indices de capacité présentés dans cette section constituent les éléments indispensables d'analyse dans un projet Six Sigma.

4.1 Capacité et performance du processus

Dans un processus, on dissocie deux types de dispersion (figure 4.2.18) :

- La dispersion court terme qui est une caractéristique intrinsèque du processus ;
- La dispersion long terme qui dépend de la dispersion court terme et de la façon dont on pilote le processus.

Figure 4.2.18 – Dispersion court terme et dispersion long terme



En fait, au cours d'une semaine de production, on dissocie les deux types de dispersion : $\sigma_{\text{court terme}}$ et $\sigma_{\text{long terme}}$.

La dispersion court terme ($\sigma_{\text{court terme}}$), est principalement due à la machine et aux conditions retenues dans la gamme de fabrication. Les cinq M contribuent à cette dispersion court terme. Mais tout au long de la semaine de production, les « M » (température, changement de lot de matière, d'équipe...) créent des variations de réglage. La dispersion mesurée sur une semaine de production est donc plus importante que la dispersion sur un temps très court.

Pour différencier ces deux dispersions, nous parlerons de dispersion court terme et de dispersion long terme ($\sigma_{\text{Long terme}}$). Ce qui est livré au client est donc bien la dispersion long terme qui inclut la dispersion court terme plus ces variations de réglage.

Lorsque l'on calcule un écart type, il faut bien savoir si on calcule un écart type court terme ou un écart type long terme. La différence n'est pas due à la formule qui est toujours la même, mais aux données sur lesquelles on applique la formule. Donc :

- A partir de la dispersion court terme ($\sigma_{\text{court terme}}$), on calculera des indices de capacité : C_p , C_{pk} et C_{pm} .
- A partir de la dispersion long terme ($\sigma_{\text{long terme}}$), on calculera les indices de performance : P_p , P_{pk} et P_{pm} .

4.1.1 Performance du processus : P_p et P_{pk}

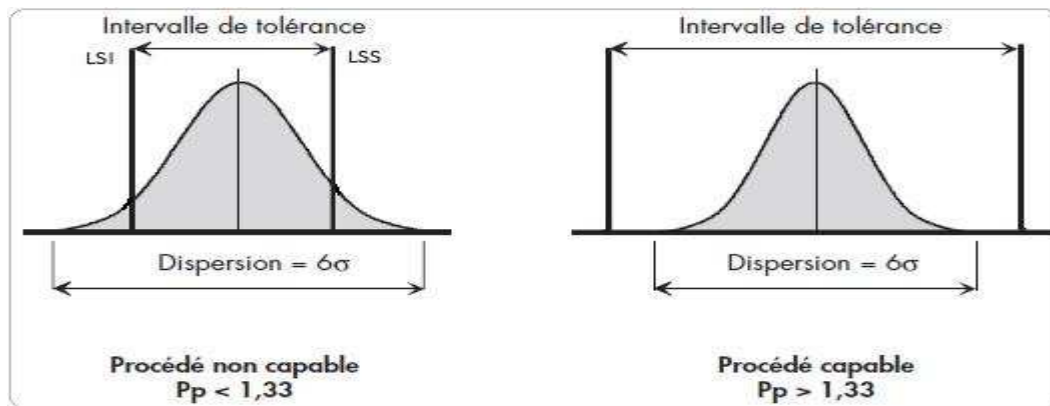
a – Indicateur P_p (Performance intrinsèque)

Pour préciser toutes ces notions un peu floues, la MSP fournit un indicateur précis dans ce domaine, c'est l'indicateur P_p (Performance processus). Cet indicateur est également appelé CAP (Coefficient d'Aptitude du processus).

$$P_p = \frac{\text{Intervalle de tolérance}}{\text{Dispersion Long terme}} = \frac{LSS - LSI}{6\sigma_{LT}}$$

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

Figure 4.2.20 – L'indicateur Pp



Dans une première approche, un procédé sera dit capable si l'intervalle de tolérance est plus grand que la dispersion aléatoire du procédé avec une petite marge, c'est-à-dire lorsque le Pp est supérieur à 1,33 (**Pp > 1,33**).

La figure 4.2.20 montre deux situations typiques, la première correspond à un procédé non capable car la dispersion aléatoire 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.

Pour calculer cette dispersion, il faut un nombre suffisamment élevé de mesures (une centaine) et vérifier que la distribution de ces mesures a bien une forme de cloche. Si ce n'est pas le cas, on peut toujours calculer le Pp, mais on ne peut plus en déduire le pourcentage hors tolérance (% défauts).

La dispersion utilisée pour le calcul de la performance Pp est la dispersion long terme (σ_{LT}) du processus. En effet, la mesure de la performance doit traduire la capacité à fabriquer des pièces sur le long terme. Il faut donc tenir compte dans le calcul de la dispersion long terme, de l'ensemble des influences qui peuvent perturber le procédé pendant le temps de production. Cette dispersion est constituée des dispersions à court terme et des dispersions

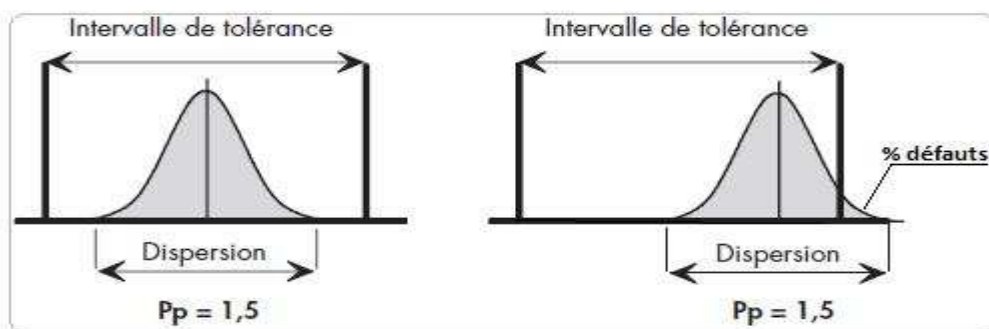
consécutives aux variations de consignes (dérégages) incontournables sur le long terme.

Le calcul du Pp sera donc réaliser à partir d'un échantillon représentatif de l'ensemble d'une production. En général, la période retenue pour le calcul d'un Pp est au moins d'une semaine. Ainsi, le Pp calculé donnera une bonne indication de la qualité de la production livrée au client.

b – Indicateur de dérégage Ppk (Décentrage du processus)

Nous venons de voir qu'une des conditions pour qu'un procédé soit adapté sur le long terme est que l'indicateur Pp soit supérieur à 1,33. Cette condition est-elle suffisante ?

Figure 4.2.21- Nécessité d'un indicateur Ppk

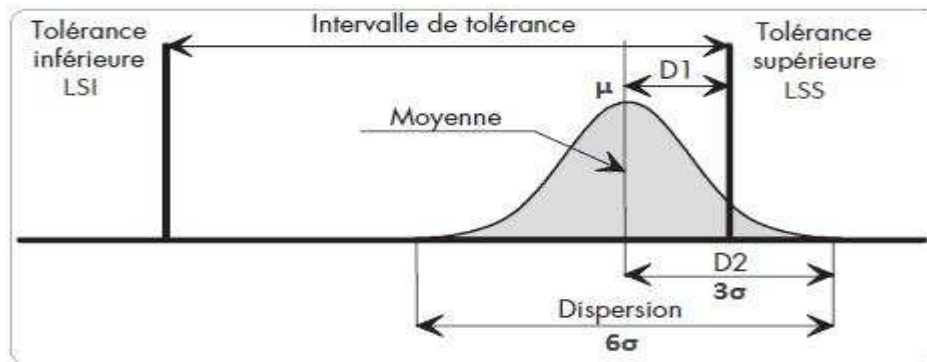


Dans cette figure, les deux situations ont un Pp supérieur à 1,33, et pourtant, lorsque la production est décentrée, il existe des pièces hors tolérance.

L'indicateur Pp est donc insuffisant et il faut mettre en place un autre indicateur Ppk, qui tiendra compte du dérégage du procédé.

Cet indicateur devra être aussi simple d'interprétation que le Pp, c'est-à-dire que le procédé sera capable si Ppk est supérieur à 1 (dans un premier temps). Bien sûr, comme pour le Pp, un Ppk sera trop risqué, nous retiendrons comme limite de capacité 1,33 ($Ppk = 1,33$).

Figure 4.2.22 – Procédé dérégulé du côté supérieur à la moyenne



Dans le cas de cette figure, le procédé est dérégulé du côté supérieur à la moyenne. Dans ce cas, on note que la production est capable tant que la distance D1 ($LSS - \mu$) est plus grande que la distance D2 (moitié de la dispersion globale).

Le Ppk est donc un indicateur qui compare les deux distances D1 et D2 en établissant le rapport entre les deux distances. Dans ce cas :

$$Ppk = \frac{D1}{D2} = \frac{LSS - \mu}{3\sigma_{LT}}$$

Dans le cas d'un déréglage du côté inférieur à la moyenne, il faut considérer la distance D'1 ($\mu - LSI$), et donc :

$$Ppk = \frac{D'1}{D2} = \frac{\mu - LSI}{3\sigma_{LT}}$$

c – Interprétation de Pp et Ppk

Un procédé, pour être capable, ne doit pas produire d'articles défectueux. Le critère de base pour la capabilité sera donc le Ppk qui inclut à la fois la capabilité intrinsèque et le déréglage. Nous retiendrons comme limite de capabilité :

$$Ppk > 1,33$$

Mais il ne faut pas pour autant négliger le Pp. En effet, en comparant pour un procédé le Pp et le Ppk, nous pouvons obtenir de précieux renseignements. En cas de réglage parfait, on vérifie aisément que $Pp = Ppk$. En revanche, plus le dérèglement est important et plus la différence entre Pp et Ppk devient importante. L'objectif des opérateurs sera donc d'avoir un Ppk le plus proche possible du Pp.

4.1.2 Capacité du processus : Cp et Cpk

Les indicateurs Cp et Cpk, sont les indicateurs de performance calculés à partir de la dispersion court terme (σ_{CT}). Les formules permettant de les calculer sont donc les mêmes que pour Pp et Ppk ; il suffit de remplacer σ_{LT} par σ_{CT} :

$$Cp = \frac{LSS - LSI}{6\sigma_{CT}}$$

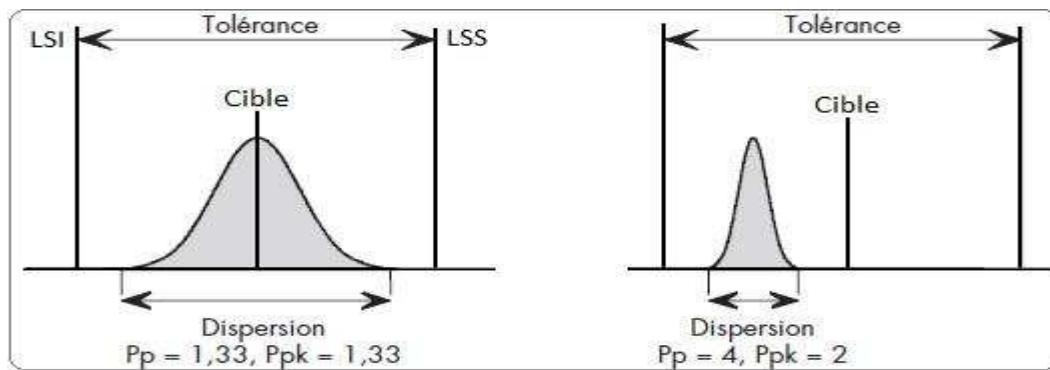
$$Cpk = \frac{LSS - \mu}{3\sigma_{CT}} ; \frac{\mu - LSI}{3\sigma_{CT}}$$

Pour ces indicateurs, on considère généralement un procédé capable sur le court terme si : **Cp > 2** et **Cpk = 1,5**.

4.1.3 Des indicateurs liés à la cible : le Cpm et le Ppm

Les indicateurs de capacité Cp, Cpk, Pp, Ppk sont aujourd'hui couramment admis comme les indicateurs de capacité de référence. Pourtant, les contraintes de la production font apparaître les limites de ces indicateurs.

Figure 4.2.23 – Le Ppk n'est pas suffisant



En effet, dans certains cas, un Ppk de bon niveau ($Ppk = 2$) peut donner moins de satisfaction qu'un Ppk considéré comme limite ($Ppk = 1,33$) (figure 4.2.23).

Dans les relations clients/fournisseurs établies sur le Ppk, les deux productions donnent satisfaction. Pourtant une des productions est centrée avec le maximum de densité de probabilité sur la valeur cible, alors que la seconde est décentrée et la densité de probabilité au voisinage de la valeur cible est pratiquement nulle.

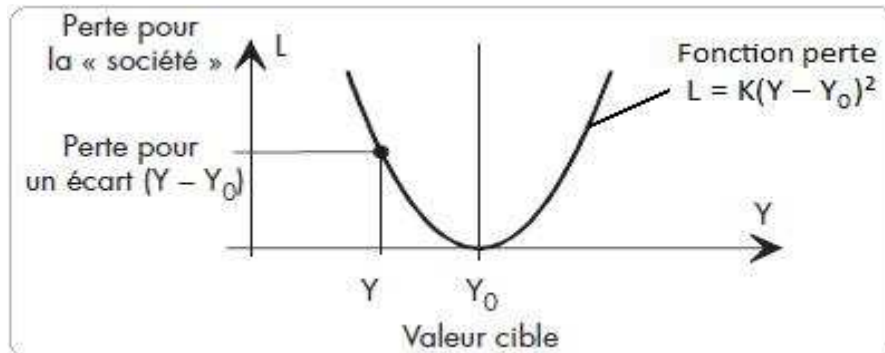
Limiter les exigences en matière de capabilité au seul Ppk peut être dangereux. Le seul respect de l'indicateur $Ppk > 1,33$ peut conduire à des montages impossibles dans le cas d'un tolérancement statistique.

Pour tenir compte de cette évolution dans la façon de voir l'intervalle de tolérance en fabrication, les indicateurs de capabilité Cp , Cpk pour le court terme et Pp , Ppk pour le long terme doivent être complétés. Un autre indicateur commence à être largement utilisé dans les entreprises : **Cpm et Ppm**.

L'indicateur Cpm tient compte à la fois de la dispersion et du centrage. Son objectif est de donner une image globale du procédé par un seuil indicateur.

Il assure que les conditions de centrage et de dispersion minimum sont respectées. L'indicateur Cpm est basé sur la fonction perte de Taguchi.

Figure 4.2.24 – Fonction perte de Taguchi



Le Dr. Genichi Taguchi définit la fonction perte comme étant une fonction du second degré de l'écart par rapport à la valeur cible.

La fonction perte s'exprime par $L = K (Y - Y_0)^2$ avec :

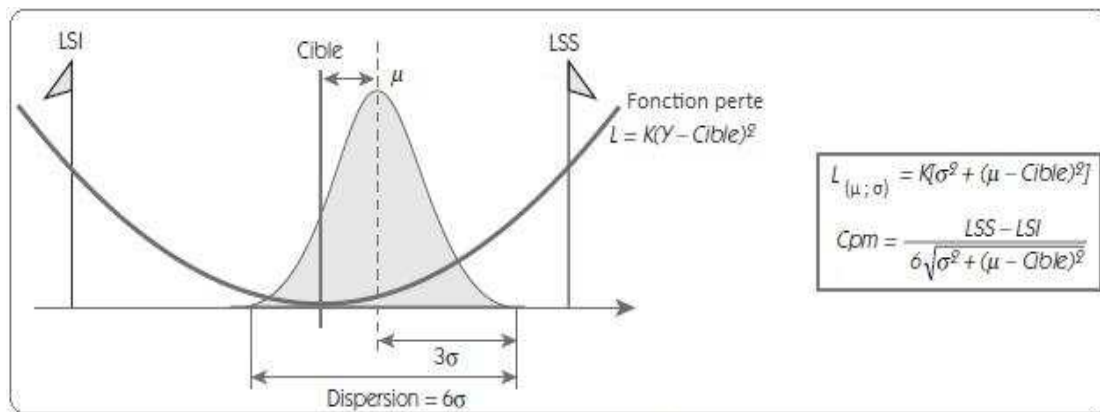
- K : une constante qui dépend du problème posé ;
- Y_0 : valeur cible recherché ;
- Y : valeur prise par la caractéristique.

Il est donc nécessaire de faire évoluer notre raisonnement en matière d'intervalle de tolérance et nous pouvons déjà conclure :

* L'importance, ce n'est pas seulement qu'une pièce soit dans l'intervalle de tolérance, mais c'est aussi et surtout la répartition des pièces à l'intérieur de cet intervalle.

* La répartition doit être **centrée sur la cible**, de dispersion la plus faible possible compte tenu du processus disponible.

Figure 4.2.25 – Indice Cpm



La perte moyenne pour une production de moyenne μ et d'écart type σ se calcule par la relation :

$$L = K [\sigma^2 + (\mu - \text{Cible})^2]$$

L'indice Cpm est calculé de façon à être proportionnel à cette perte. Il est défini par la relation :

$$Cpm = \frac{LSS - LSI}{6\sqrt{\sigma_{CT}^2 + (\mu - \text{Cible})^2}}$$

La fonction perte intervient au dénominateur. On note que l'indicateur Cpm est égal à Cp lorsque le procédé est parfaitement centré ($\mu = \text{Cible}$). Cpm décroît lorsque le décentrage augmente.

Cpm est relié à Cp et Cpk par la relation :

$$Cpm = \frac{Cp}{\sqrt{1 + 9(Cp - Cpk)^2}}$$

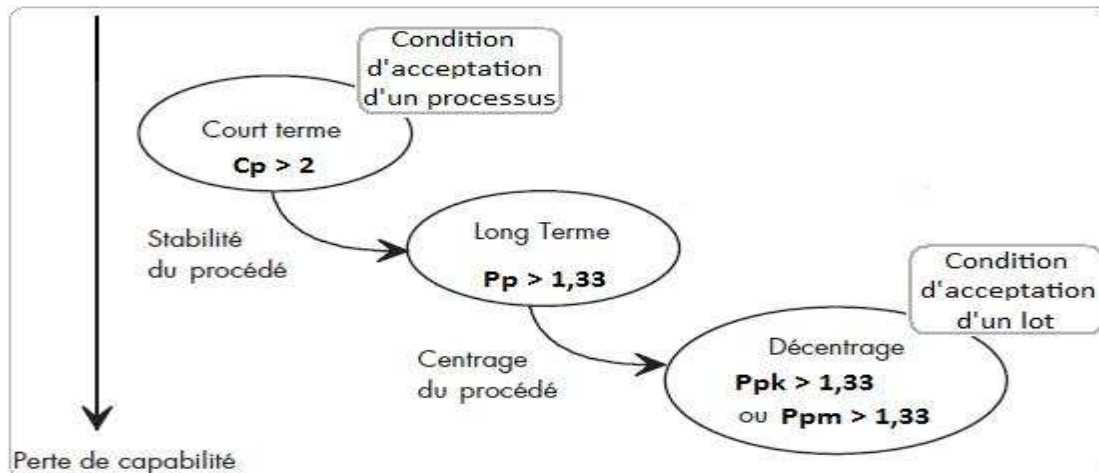
On définit de la même façon l'indicateur Ppm à partir des données long terme.

$$Ppm = \frac{LSS - LSI}{6\sqrt{\sigma_{LT}^2 + (\mu - \text{Cible})^2}} = \frac{Pp}{\sqrt{1 + 9(Pp - Ppk)^2}}$$

Comme on le constate, Cpm et Ppm tient compte à la fois du centrage (Cpk, Ppk) et de la dispersion (Cp, Pp).

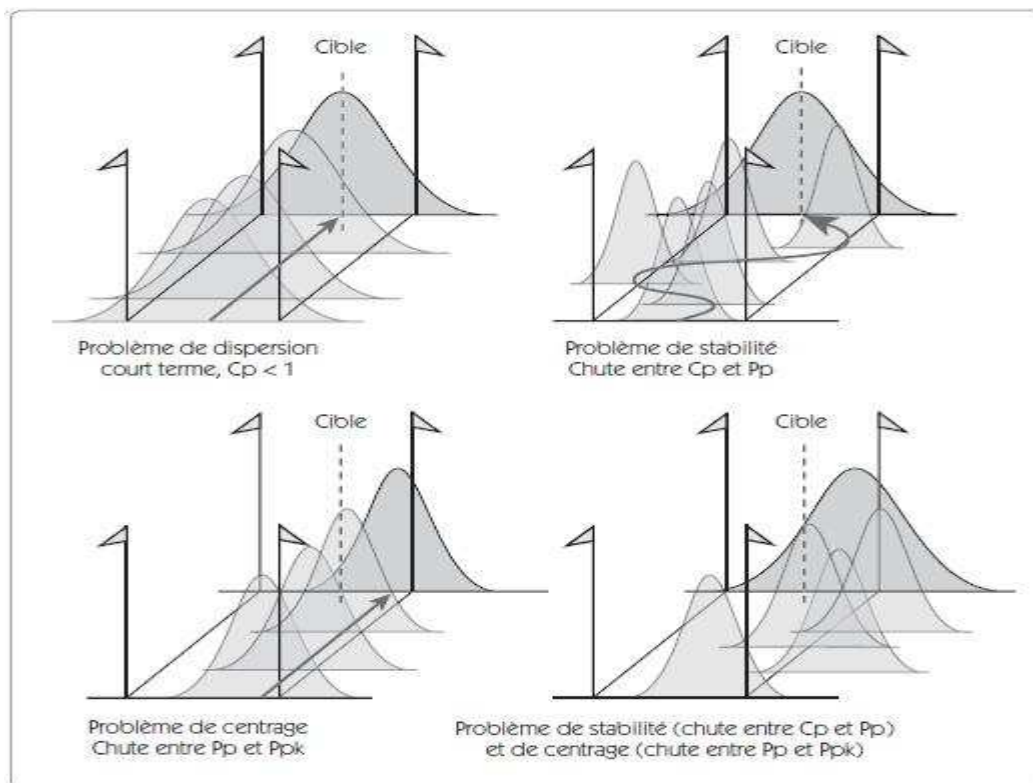
4.2 La chute de capacité

Figure 4.2.26 – Chute des capacités



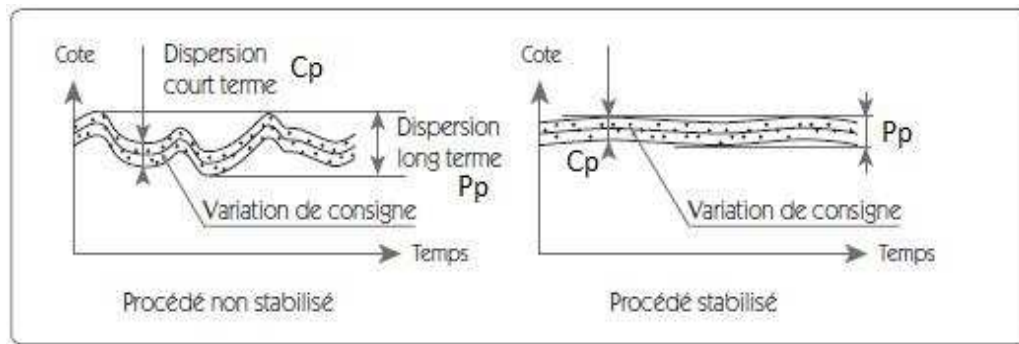
L'analyse des chutes de capacité pour un procédé est souvent très intéressante. En effet, nous partons d'un procédé avec un potentiel de capacité C_p pour arriver à un produit livré au client avec une Performance P_{pk} . L'important est bien entendu d'avoir un P_{pk} ou un P_{pm} supérieur à 1,33 selon le critère choisi. Si ce n'est pas le cas, il est fondamental, pour résoudre le problème, de déterminer l'origine de ce manque de capacité.

Figure 4.2.27 – L'origine de la non-qualité



La chute de capacité entre C_p et P_p (figure 4.2.28) traduit l'instabilité du procédé. En effet, si on sait stabiliser un procédé, on limite les variations de consigne et la dispersion long terme sera proche de la dispersion court terme.

Figure 4.2.28 – Chute entre Cp et Pp



On peut quantifier cette chute entre le Cp et le Pp par le rendement de stabilité (Rs) :

$$Rs \% = 100 (Pp/Cp)$$

Nous avons vu précédemment que la chute de capabilité entre Pp et Ppk était due au dérèglement. Lorsqu'un procédé est centré, on a l'égalité entre Pp et Ppk. Plus la chute entre Pp et Ppk est importante, plus le décentrage est fort. On peut quantifier cette chute entre le Pp et le Ppk par le rendement de réglage (Rr) :

$$Rr \% = 100 (Ppk/Pp)$$

Enfin, après la production, pour accepter le lot, les entreprises qui pratiquent de manière intensive la méthode exigent en général une performance du processus correspondant à un $Ppk > 1,33$ (ou $Ppm > 1,33$).

Etape 3 - Analyser

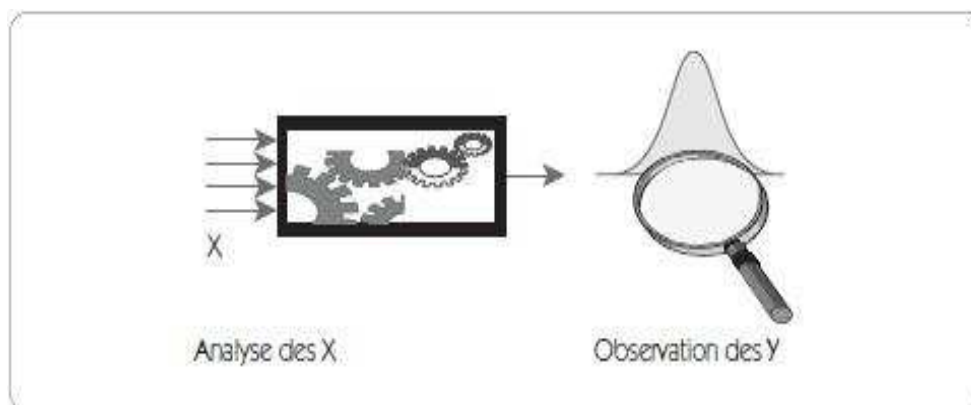
L'étape « Analyser » a pour objectif d'augmenter notre connaissance du processus afin de découvrir les causes racines de la variabilité et de la performance insuffisante. A la fin de cette étape, on doit avoir une idée très précise des sources d'insatisfaction et des paramètres qui devront être modifiés pour atteindre la performance attendue.

Une des clés de cette étape est « la preuve statistique ». En effet, l'analyse des données récoltées dans l'étape « Mesurer » doit être conduite de manière rigoureuse en utilisant les outils statistiques. Dans cette étape, on recourt principalement aux outils de visualisation des données, aux outils de comparaison de moyennes, aux tests d'analyse de la variance et aux tests de corrélation.

Dans cette étape, on va insister particulièrement sur :

- * La visualisation graphique des données ;
- * L'utilisation de la statistique descriptive ; et
- * La mise en œuvre de la statistique inférentielle.

Figure 4.3.1 Etape Analyser



Pour analyser les X et les Y, on fait appel à la représentation graphique et à la statistique descriptive. Pour l'établissement de relations entre les X et les Y, on s'appuie sur la statistique inférentielle.

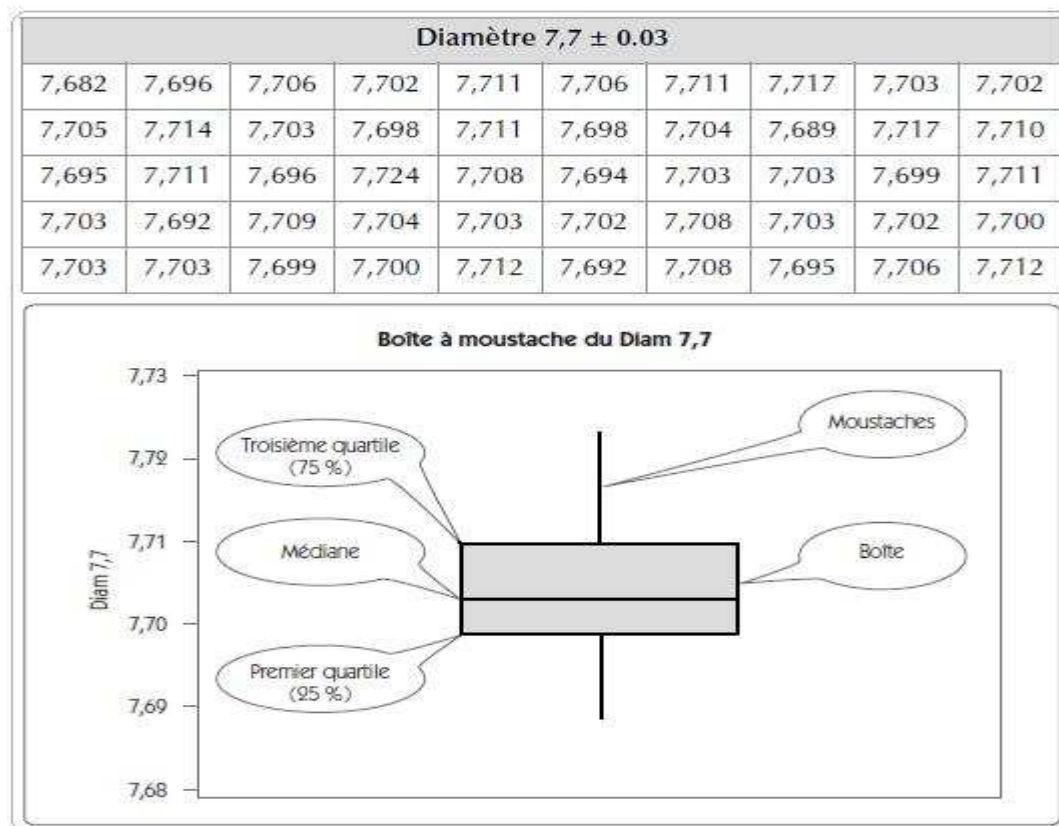
1. Représentation graphique des données

La représentation graphique des données est un premier niveau d'interprétation. Lorsque l'on dispose simplement d'un tableau de relevés (figure 4.3.2), il est très difficile de se faire une idée de la répartition de ces données. Dans cette partie on va s'intéresser à deux types de graphes souvent utilisés :

- La boîte à moustache (Box Plot) ;
- Le diagramme multi-vari ;

1.1 La boîte à moustache

Figure 4.3.2 – Boîte à moustache d'un relevé de données



La boîte à moustache est couramment utilisée pour représenter les distributions de population. Dans cette représentation, on distingue :

- Le bas de la boîte correspond au premier quartile Q1 (25% des valeurs) ;
- le haut de la boîte correspond au troisième quartile Q3 (75% des valeurs);
- le trait séparant la boîte représente la médiane (50% des valeurs).
- Les moustaches qui sont les lignes qui s'étendent de part et d'autre de la boîte, représentant l'étendue des données.

Ce type de représentation est particulièrement utile pour visualiser la symétrie d'une répartition.

1.2 Le diagramme multi-vari

Le diagramme multi-vari présente l'intérêt de représenter sur un même graphique l'influence de plusieurs X sur une réponse Y.

L'Américain *Dorian SHAININ*⁵ a identifié trois grandes classes de variations dans un processus :

- **Variation de position ou à l'intérieur d'une unité**

-Position sur une machine multi-posages

-Variation entre 2 machines, 2 opérateurs, 2 ateliers...

- **Variations cycliques ou d'une unité à l'autre**

-Variation d'un lot à un autre

-Variation d'une coulée à une autre...

- **Variation temporelles**

-Variation matin et soir

-Variation entre les jours de la semaine...

Après avoir recherché les grands types de variations pouvant concerner le processus étudié, on doit recueillir des données permettant de les mettre en évidence.

5. **Dorian SHAININ** a développé toute une approche de l'amélioration des produits et des processus industriels très complémentaire de l'approche Six Sigma.

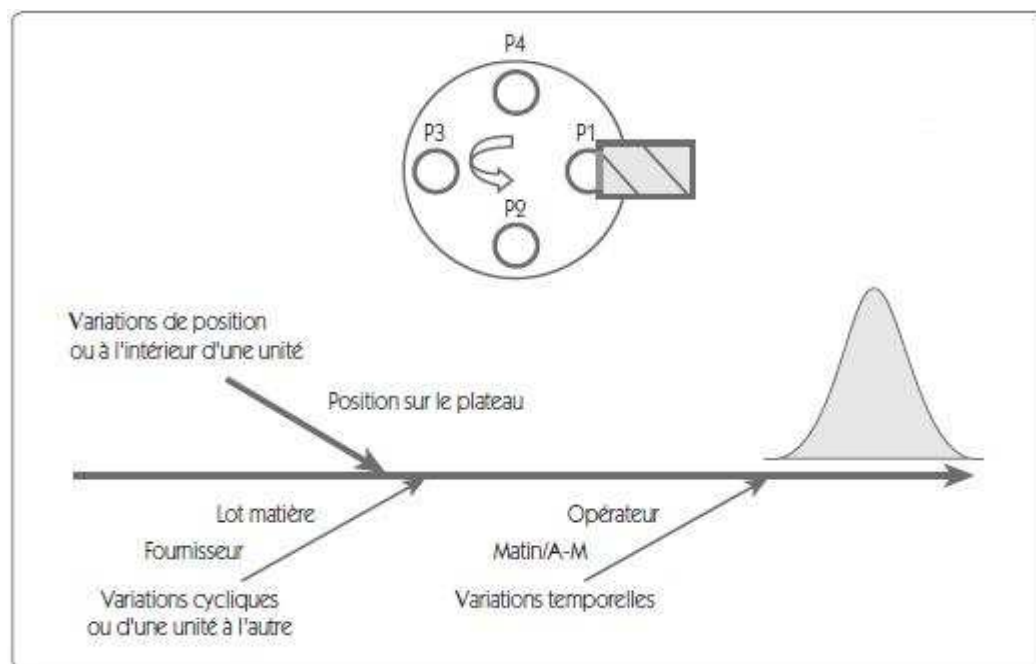
Pour illustrer ce propos, on va prendre l'exemple suivant :

Une entreprise de mécanique réalise un usinage⁶ sur machine à quatre postes.

Une étude sur les causes de dispersion possibles (figure 4.3.3) a permis d'identifier :

- La position sur le plateau
- Le lot matière
- Le fournisseur
- L'opérateur
- Le matin et le soir

Figure 4.3.3 – Type de variations



6. Usinage : C'est une technique de fabrication de pièces mécaniques. Le principe de l'usinage est d'enlever de la matière de manière à donner à la pièce brute la forme voulue, à l'aide d'une machine-outil. Par cette technique on obtient des pièces d'une grande précision.

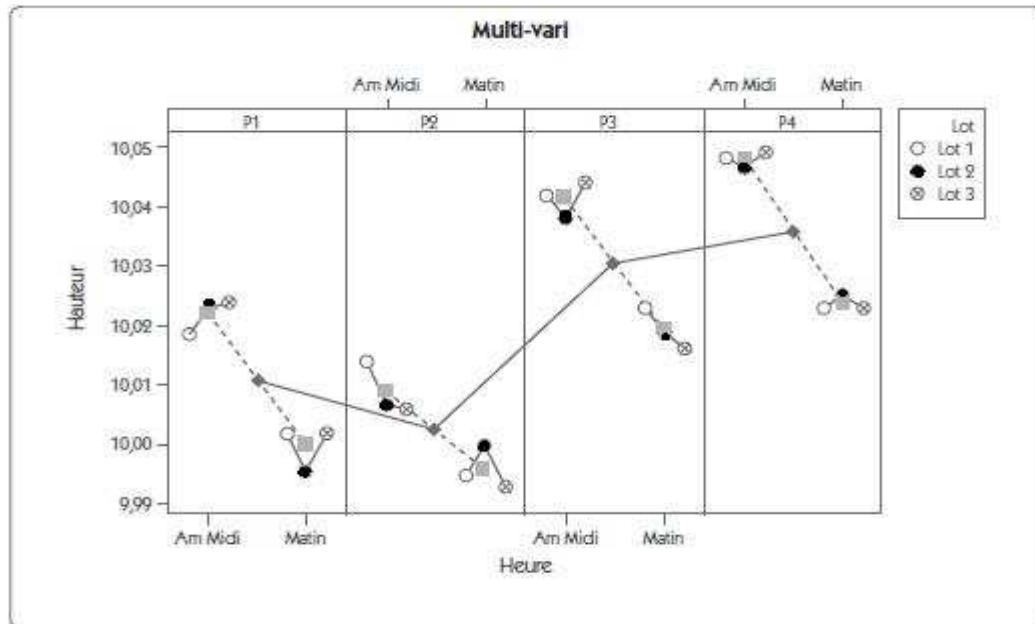
La saisie de données pour pouvoir réaliser le multi-vari se rapporte ainsi :

Figure 4.3.4 – Données du diagramme multi-vari

Lot	Heure	Poste	N1	N2	N3
Lot 1	Matin	P1	10,019	10,004	9,982
Lot 1	Matin	P2	10,000	9,985	9,998
Lot 1	Matin	P3	10,030	10,032	10,007
Lot 1	Matin	P4	10,030	10,013	10,025
Lot 1	Après-midi	P1	10,022	10,012	10,022
Lot 1	Après-midi	P2	10,028	10,001	10,012
Lot 1	Après-midi	P3	10,031	10,052	10,043
Lot 1	Après-midi	P4	10,046	10,041	10,058
Lot 2	Matin	P1	9,998	9,999	9,992
Lot 2	Matin	P2	10,008	9,980	10,012
Lot 2	Matin	P3	10,020	10,016	10,022
Lot 2	Matin	P4	10,033	10,004	10,040
Lot 2	Après-midi	P1	10,023	10,030	10,016
Lot 2	Après-midi	P2	10,015	9,999	10,006
Lot 2	Après-midi	P3	10,031	10,039	10,045
Lot 2	Après-midi	P4	10,053	10,037	10,051
Lot 3	Matin	P1	10,005	10,005	9,997
Lot 3	Matin	P2	10,003	9,987	9,989
Lot 3	Matin	P3	10,038	10,007	10,004
Lot 3	Matin	P4	10,010	10,017	10,041
Lot 3	Après-midi	P1	10,020	10,030	10,022
Lot 3	Après-midi	P2	10,003	10,008	10,006
Lot 3	Après-midi	P3	10,040	10,040	10,053
Lot 3	Après-midi	P4	10,048	10,057	10,041

Le multi-vari se présente de la façon suivante :

Figure 4.3.5 – Multi-vari



Interprétation

- Le n° de lot n'a pas d'influence sur la hauteur usinée, on ne retrouve pas d'écart systématique entre les lots 1,2 et 3.
- La position sur le plateau semble avoir une influence forte, la position 4 donnant la hauteur la plus forte et la position 2 la plus faible.
- La différence entre le matin et l'après-midi est confirmée avec une chute de la hauteur entre ces deux modalités.

Ce diagramme multi-vari donne une forte indication visuelle, mais ne fournit pas de preuve statistique. On doit l'utiliser conjointement à une analyse de la variance (ANAVAR) pour pouvoir conclure de façon rigoureuse.

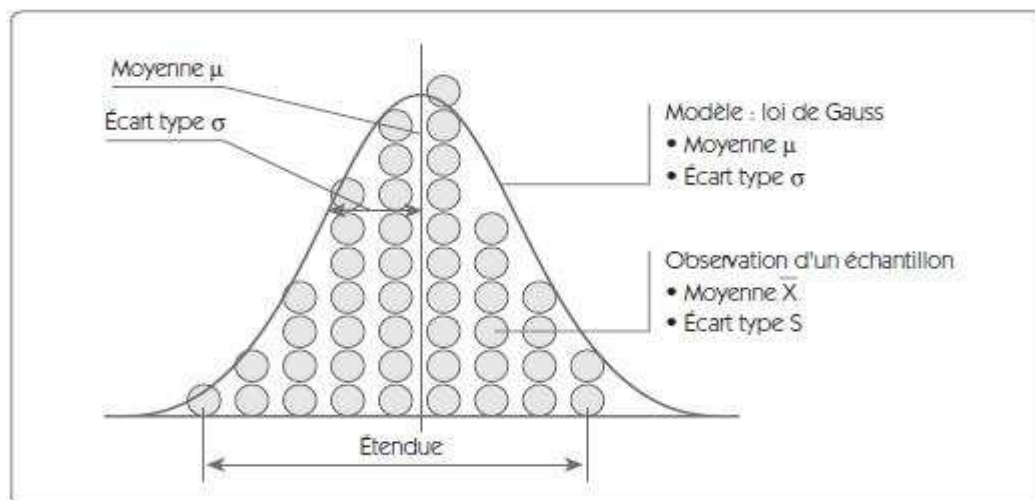
2. Statistique descriptive

La statistique descriptive a pour objectif de donner une description statistique d'un ensemble de données. Dans cette partie on va s'intéresser à l'étude des paramètres statistiques, à savoir :

- Les paramètres de position de la distribution ;
- Les paramètres d'échelle de la distribution.

La statistique descriptive doit fournir une estimation des paramètres. En effet, les paramètres de position et d'échelle sont calculés à partir d'un échantillon. Si on prend un autre échantillon, on aura d'autres estimations. Il convient donc de différencier la vraie valeur de la moyenne μ de son estimateur $\bar{X}$. De même, la vraie valeur de l'écart type σ , et son estimateur S .

Figure 4.3.6 – Répartition de Gauss



2.1 Paramètres de position

Comme son nom l'indique, un paramètre de position donne une indication sur la position de la distribution par rapport à la grandeur mesurée. Voici les principaux indicateurs :

• La moyenne $\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$

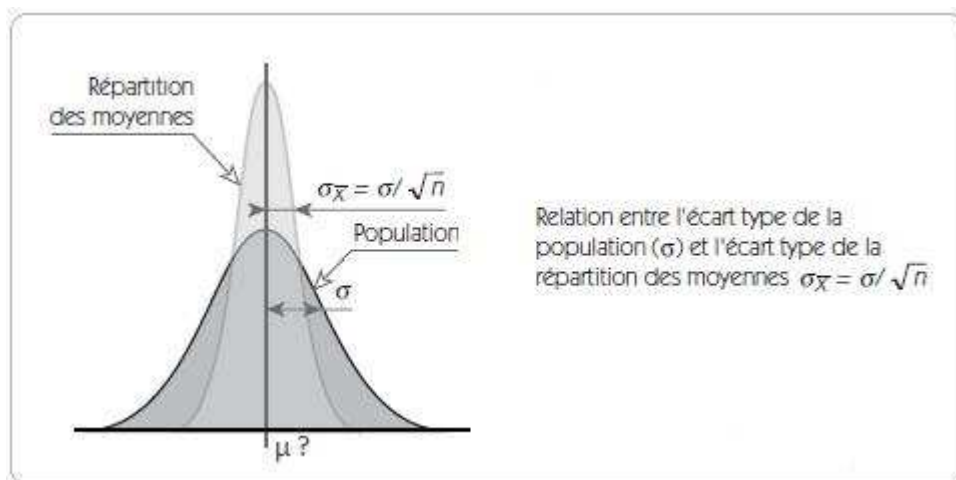
• La médiane $\bar{Y}$ qui représente la valeur telle qu'il y a autant de valeurs d'un côté que de l'autre. Dans le cas de répartition symétrique, la médiane et la moyenne sont théoriquement identiques.

Sur chacun de ces indicateurs, on peut calculer **un intervalle de confiance**.

Prenons le cas de la moyenne :

La moyenne $\bar{X}$ d'un échantillon aléatoire permet d'estimer la moyenne μ de la population. Et comme il n'est pas possible de connaître μ (à moins de mesurer la totalité de la population), on peut néanmoins calculer l'intervalle dans lequel on a 95% de chances de trouver μ . Pour cela on utilise la loi de distribution des moyennes $\bar{X}$. Les moyennes suivent une loi normale d'écart type $\sigma/\sqrt{n}$.

Figure 4.3.7 - Intervalle de confiance sur les moyennes



En général, nous adoptons l'intervalle de confiance à 95%, soit à 2σ ($\bar{X}$). On peut donc écrire : $\mu = \bar{X} \pm 2\sigma(\bar{X})$

Soit plus explicitement : $\bar{X} - 2\sigma(\bar{X}) < \mu < \bar{X} + 2\sigma(\bar{X})$ à 95%.

Or l'écart type de la répartition des moyennes $\sigma(\bar{X}) = \sigma/\sqrt{n}$, donc

$$\bar{X} - 2 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{X} + 2 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Lorsque σ est connu, compte tenu de la position de $\bar{X}$, il est facile de trouver l'intervalle de confiance donnant 95% de chances de trouver μ . Généralement sigma (σ) est inconnu. On doit le remplacer par son estimateur S :

$$\bar{X} - 2 \frac{S}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{X} + 2 \frac{S}{\sqrt{n}}$$

2.2 Paramètres d'échelle

Les paramètres d'échelle donnent une idée de la dispersion des mesures.

Voici les paramètres qui sont le plus utilisés :

- **L'étendue (R);**
- **L'écart type (σ);**
- **La variance (σ^2);**
- **La position des quartiles.**

Parmi tous ces éléments, l'étendue est la plus naturelle. Elle représente l'écart qui existe entre la plus grande valeur et la plus petite. Mais l'étendue a un inconvénient majeur : sa valeur dépend de la taille de l'échantillon.

C'est la raison pour laquelle les statisticiens ont cherché à exprimer la dispersion des valeurs en utilisant un critère qui soit indépendant de la taille de l'échantillon. L'écart type a cette propriété de convergence vers une valeur définie lorsque la taille des échantillons augmente.

$$\sigma_{n-1} = S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

Il existe une relation entre l'étendue pour une taille d'échantillon donnée et l'écart type (σ) :

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2}$$

Le coefficient d_2 dépend à la fois de la taille de l'échantillon et du nombre d'échantillon qui ont permis de calculer la moyenne des étendues ($\bar{R}$).

Figure 4.3.8 – Coefficient d_2 pour l'estimation de σ à partir de $\bar{R}$

		Nombre d'échantillons															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	>15
Nombre de mesures par échantillon	2	1,414	1,279	1,231	1,206	1,191	1,181	1,173	1,168	1,163	1,160	1,157	1,154	1,153	1,151	1,149	1,128
	3	1,912	1,806	1,769	1,750	1,739	1,731	1,726	1,722	1,719	1,716	1,714	1,712	1,711	1,710	1,708	1,693
	4	2,239	2,151	2,121	2,105	2,096	2,090	2,086	2,082	2,08	2,078	2,076	2,075	2,073	2,072	2,071	2,071
	5	2,481	2,405	2,379	2,366	2,358	2,353	2,349	2,346	2,344	2,342	2,34	2,339	2,338	2,337	2,337	2,326

La variance est le carré de l'écart type ; on a donc la relation $V(X) = \sigma^2 (X)$.

La variance (σ^2) et la moyenne (μ) possèdent la propriété d'additivité, ce qui n'est pas le cas de l'écart type (σ). Cela a plusieurs conséquences, notamment pour le calcul de l'estimation d'un écart type à partir de la moyenne de plusieurs écarts types $\bar{S}$ issus de k échantillons de taille n. On doit alors introduire un coefficient correcteur c_4 et on obtient les relations suivantes :

$$V = \frac{\sum V_i}{k} \quad \text{et} \quad \sigma = \frac{\frac{1}{k} \sum S_i}{c_4} = \frac{\bar{S}}{c_4}$$

Figure 4.3.9 – Coefficient c_4 pour l'estimation de σ à partir de $\bar{S}$

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
c_4	0,7979	0,8862	0,9213	0,9400	0,9515	0,9594	0,9650	0,9693	0,9727

L'intervalle de confiance pour les écarts types peut également être donné en utilisant les propriétés de la loi des carré X^2 (appelé également loi des Khi-carré).

Les valeurs de X^2 pour une probabilité p donnés se trouvent en fonction du nombre de degrés de liberté $\nu = (n-1)$ dans la table de X^2 .

L'intervalle de confiance à 95% sur l'écart type se calcule comme suit :

$$S \sqrt{\frac{\chi^2_{(\alpha/2)}}{(n-1)}} < \sigma < S \sqrt{\frac{\chi^2_{(1-\alpha/2)}}{(n-1)}} \text{ avec } \alpha: \text{ Risque } \alpha$$

Par exemple si $\alpha = 5\%$, donc :

- $\alpha/2 = 0,025 \rightarrow X^2_{0,025}$
- $1 - \alpha/2 = 0,975 \rightarrow X^2_{0,975}$

3. Statistique inférentielle – Test de comparaison

La statistique inférentielle a pour objectif de vérifier s'il existe une relation entre les X et les Y.

Les X sont des variables indépendantes (ou facteurs). Y est une variable dépendante (ou réponse), qui dépend de la configuration des X.

La statistique inférentielle est un élément très important du vaste domaine des statistiques. Dans cette partie on va se limiter aux tests les plus couramment pratiqués.

3.1 Les tests de comparaison

3.1.1 Test d'hypothèse

Un test d'hypothèse est un procédé d'inférence permettant de contrôler (accepter ou rejeter) à partir de l'étude d'un ou plusieurs échantillons aléatoires, la validité d'hypothèses relatives à une ou plusieurs populations.

Les méthodes de l'inférence statistique nous permettent de déterminer, avec une probabilité donnée, si elles sont suffisamment importantes pour signifier que les échantillons proviennent de populations vraisemblablement différentes.

Le principe des tests d'hypothèses est de poser une hypothèse de travail et de prédire les conséquences de cette hypothèse pour la population ou l'échantillon.

Lorsque l'on fait un test statistique, on cherche à vérifier une des deux hypothèses suivantes:

- **L'hypothèse nulle** : notée H_0 , est l'hypothèse que l'on désire contrôler, elle consiste à dire qu'il n'existe pas de différence entre les paramètres comparés ou que la différence observée n'est pas significative, et est due aux fluctuations d'échantillonnage.

Cette hypothèse est formulée dans le but d'être rejetée.

- **L'hypothèse alternative** : notée H_1 , est la négation de H_0 , elle est équivalente à dire « H_0 est fausse ». La décision de rejeter H_0 signifie que H_1 est vrai.

Comme on raisonne sur des échantillons, il y a toujours le risque de conclure à tort comme le montre le tableau suivant :

Figure 4.3.10 – Risque alpha (α) et risque bêta (β)

		Conclusion du test	
		Hypothèse H_0 vrai	Hypothèse H_1 vrai
Situation réelle	Hypothèse H_0 vrai ; il n'y a pas d'écart entre les situations	Conclusion juste ($1 - \alpha$)	Conclusion fausse Risque α
	Hypothèse H_1 vrai ; il y a un écart entre les situations	Conclusion fausse Risque β	Conclusion juste ($1 - \beta$)

***Risque alpha (α) :** c'est le risque de conclure qu'il y a une différence significative (H_1) alors que cela n'est pas vrai.

***Risque bêta (β) :** c'est le risque de conclure qu'il n'y a pas une différence significative (H_0) alors que cette différence existe bien.

Application :

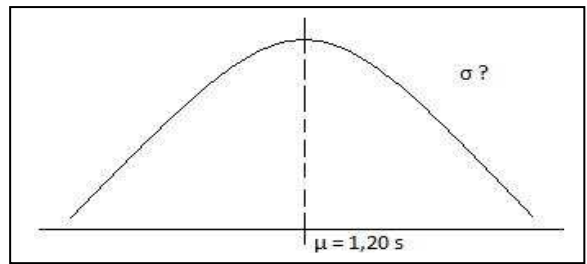
Un neurologue veut tester l'effet d'un médicament sur le temps de réponse, par l'injection d'une dose unitaire de la drogue à 100 rats. En soumettant chacun à un stimulus neurologique, et à l'enregistrement de son temps de réponse.

Le neurologue sait que le temps de réponse moyen chez les rats en temps normal (en absence de la drogue) est de 1,20 seconde. Après l'injection de la drogue, la moyenne des temps de réponse des 100 rats est de 1,05 seconde, avec un écart type de l'échantillon 0,5.

Penser-vous que le médicament a un effet sur le temps de réponse ?

Réponse :

- $n = 100$ rats (taille du lot)
- $\mu = 1,20$ s (moyenne de la population)
- $\mu_x = 1,05$ s (moyenne de l'échantillon)
- $S = 0,5$ (estimateur de l'écart type de la population)



Maintenant, supposant les deux hypothèses suivantes :

- H_0 : Le médicament n'a aucun effet sur le temps de réponse, c'est-à-dire que $\mu_x = 1,20$ s
- H_1 : Le médicament a un effet sur le temps de réponse, c'est-à-dire que $\mu_x \neq 1,20$ s

➤ On supposant que H_0 est vrai :

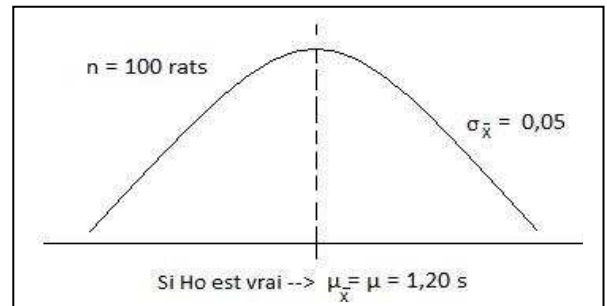
Cela revient à dire que $\mu_x = \mu = 1,20$ s

L'écart type de notre échantillon σ_x :

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \approx \frac{S}{\sqrt{n}}$$

$$\sigma_{\bar{x}} = 0,05$$

➤ Qu'elle est la probabilité d'avoir une moyenne de 1,05 s ?



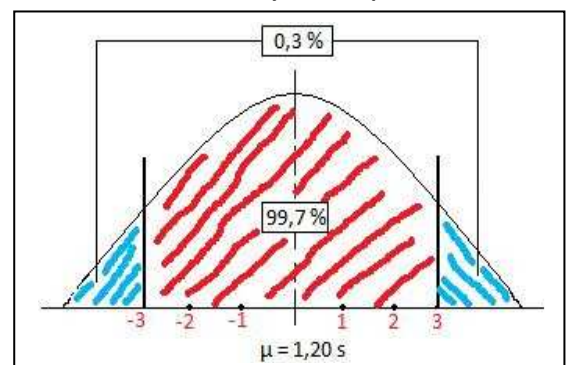
On calcule le z-score (ou z-statistique) :

$$Z = \frac{\mu - \mu_{\bar{x}}}{\sigma_{\bar{x}}} = \frac{1,20 - 1,05}{0,05}$$

$$Z = 3$$

Ceci veut dire que le résultat $\mu_x = 1,05$ s, se trouve à $\pm 3\sigma$ de la moyenne μ .

Or $\pm 3\sigma$ correspond à 99,7 % (table - z).



Donc la probabilité d'avoir une moyenne de 1,05 s est de 0,3 % (dans les deux ares) se qui correspond à une chance sur 300 (1/300).

Cette probabilité très faible (0,3%) prouve que le médicament à bien un effet sur le temps de réponse, donc en en rejette l'hypothèse H_0 et en accepte l'hypothèse H_1 .

3.1.2 Les tests de comparaison (les différents tests)

Lors de la mise en œuvre d'un test de comparaison dans une entreprise, on cherche soit à comparer une situation par rapport à une situation théorique, soit à comparer plusieurs situations.

Avec les tests de comparaison, on peut comparer des moyennes ou des variances.

Figure 4.3.11 – Les différents tests

	Comparaison par rapport à une valeur théorique	Comparaison entre deux valeurs	Comparaison entre plusieurs valeurs
Comparaison de moyennes	Test $Z_{théorique}$	Test z Test t	ANAVAR
Comparaison de variances	Test χ^2	Test F	Hartley

Il existe de nombreux tests de comparaison, mais on va se limiter dans cette partie à ceux qui sont les plus couramment utilisés dans une stratégie Six Sigma.

Fiche – Test χ^2 Comparaison d'une variance à une valeur théorique σ	
Ce que fait le test Étant donné un échantillon de taille n , dont les valeurs observées ont pour variance S^2 . Peut-il être considéré comme représentatif de la population totale de variance σ^2 ?	
Comment faire le test ?	Exemple Le ressort que je produis a une force moyenne $\mu = 1,2 \text{ N}$ et un écart type $\sigma = 0,1 \text{ N}$. Ces valeurs ont été calculées sur 150 données, on suppose donc σ et μ connus. On conçoit un nouveau ressort afin de diminuer la dispersion sur la force. Les 8 prototypes du nouveau ressort donnent : 1,32 1,22 1,18 1,29 1,21 1,23 1,25 1,20
1. À partir des valeurs relevées, calculer l'écart type S .	$\bar{X} = 1,23$ $S = 0,047$
2. Vérifier l'hypothèse sigma connu en calculant l'intervalle bilatéral à 5 % devant contenir S . $\sigma \sqrt{\frac{\chi^2_{(\alpha/2)}}{(n-1)}} < S < \sigma \sqrt{\frac{\chi^2_{(1-\alpha/2)}}{(n-1)}}$ Le χ^2 est pris pour $n-1$ ddl et pour les risques 0,975 et 0,025.	$0,1 \sqrt{\frac{1,69}{7}} < S < 0,1 \sqrt{\frac{16}{7}}$ soit $0,049 < S < 0,15$
3. Conclure. Si S est dans l'intervalle, on conclut que l'écart n'est pas significatif. Si S est hors de l'intervalle on conclut que l'écart est significatif.	S étant hors de l'intervalle, on refuse l'hypothèse σ connu. On conclut que le nouveau ressort est significativement plus « régulier » que le ressort précédent.
4. En cas de doute sur le résultat (risque β), augmenter la taille de l'échantillon et recommencer la procédure.	

Fiche – Test F Comparaison de deux variances	
Ce que fait le test Permet de comparer deux écarts types (ou deux variances) afin de conclure s'il y a un écart significatif entre les deux.	
Comment faire le test ?	Exemple On conçoit un nouveau ressort afin de diminuer la dispersion sur la force. On hésite entre deux matériaux. Pour valider, on fait deux échantillons avec ces deux matériaux. Le premier matériau donne : 1,32 1,22 1,18 1,29 1,21 1,23 1,25 1,20 Le second matériau donne : 1,25 1,23 1,26 1,18 1,22 1,21
1. À partir des valeurs relevées, calculer les écarts types.	$S_1 = 0,047 ; S_2 = 0,029$
2. On nomme S_1 l'écart type maxi et S_2 l'écart type mini.	
3. Faire le ratio F entre la variance la plus élevée et la variance la plus faible. $F = \frac{S_{Max}^2}{S_{Min}^2}$	$F = \frac{0,047^2}{0,029^2} = 2,67$
4. Rechercher dans la table de Snedecor à 0,05 la valeur F_{limite} pour $(n_1 - 1)$ ddl au numérateur et $(n_2 - 1)$ ddl au dénominateur.	Colonne 7 ligne 5 $F_{limite} = 4,88$
5. Conclure. Si $F > F_{limite}$ on conclut que l'écart est significatif. Sinon, l'écart n'est pas significatif.	$2,67 < 4,88$ On conclut que l'écart n'est pas significatif.
6. En cas de doute sur le résultat (risque β), augmenter la taille de l'échantillon et recommencer la procédure.	

Fiche – Test z théorique	
Comparaison d'une moyenne à une valeur théorique (σ connu)	
Ce que fait le test Étant donné un échantillon de taille n , dont les valeurs observées ont pour moyenne $\bar{X}$. Peut-il être considéré comme représentatif de la population totale de moyenne μ et d'écart type σ ?	
Domaine d'application Les moyennes doivent suivre une loi normale. Cette condition est robuste sur la répartition des valeurs individuelles. Comment faire le test ?	Exemple Le ressort que je produis a une force moyenne $\mu = 1,2 \text{ N}$ et un écart type $\sigma = 0,1 \text{ N}$. Ces valeurs ont été calculées sur 150 données, on suppose donc σ et μ connus. On conçoit un nouveau ressort afin d'augmenter cette force. Les 4 prototypes du nouveau ressort donnent : 1,32 1,45 1,18 1,29.
1. À partir des valeurs relevées, calculer la moyenne $\bar{X}$ et l'écart type S .	$\bar{X} = 1,31$ $S = 0,111$
2. Vérifier l'hypothèse sigma connu en calculant l'intervalle bilatéral à 5 % devant contenir S $\sigma \sqrt{\frac{\chi^2_{(\alpha/2)}}{(n-1)}} < S < \sigma \sqrt{\frac{\chi^2_{(1-\alpha/2)}}{(n-1)}}$ Si ce n'est pas le cas, passer au test t théorique.	$0,1 \sqrt{\frac{0,216}{3}} < S < 0,1 \sqrt{\frac{9,35}{3}}$ soit $0,027 < S < 0,18$ S étant dans l'intervalle, on accepte l'hypothèse σ connu.
3. Calculer la variable réduite z_0 $z_0 = \frac{ \bar{X} - \mu }{\sigma / \sqrt{n}}$	$z_0 = \frac{ 1,31 - 1,2 }{0,1 / \sqrt{4}} = 2,2$
4. Chercher dans la table de Gauss la valeur z_{lim} pour le risque choisi (5 % en bilatéral, soit 2,5 % de chaque côté).	$z_{lim} = 1,96$
5. Conclure. Si $z_0 > z_{lim}$, on conclut que l'écart est significatif. Si $z_0 \leq z_{lim}$, on conclut que l'écart n'est pas significatif.	2,2 étant supérieur à 1,96, on conclut que le nouveau ressort est significativement plus puissant que le ressort précédent.
6. En cas de doute sur le résultat (risque β), augmenter la taille de l'échantillon.	

Fiche – Test t théorique	
Comparaison d'une moyenne à une valeur théorique (σ inconnu)	
Ce que fait le test Étant donné un échantillon de taille n , dont les valeurs observées ont pour moyenne $\bar{X}$ et un écart type estimé S . Peut-il être considéré comme représentatif de la population totale de moyenne μ ?	
Domaine d'application Les moyennes doivent suivre une loi normale. Cette condition est robuste sur la répartition des valeurs individuelles. Comment faire le test ?	Exemple Je veux produire des ressorts dont la force moyenne doit être supérieure à la valeur théorique $\mu = 1,2$ N. Les prototypes du nouveau ressort donnent : 1,32 1,45 1,18 1,29
1. À partir des valeurs relevées, calculer la moyenne et l'écart type S . On suppose que l'écart type σ est estimé par S . On utilise alors la loi de Student.	$\bar{X} = 1,31$ $S = 0,111$
2. Calculer la variable réduite t_0 $t_0 = \frac{ \bar{X} - \mu }{S/\sqrt{n}}$	$t_0 = \frac{ 1,31 - 1,2 }{0,111/\sqrt{4}} = 1,98$
3. Chercher dans la table de Student la valeur t_{lim} pour le risque choisi (5 % en bilatéral, soit 2,5 % de chaque côté) et le nombre de ddl ($n-1$).	$t_{lim} = 3,182$ risque bilatéral, $v = 4-1 = 3$
4. Conclure. Si $t_0 > t_{lim}$, on conclut que l'écart est significatif. Si $t_0 \leq t_{lim}$, on conclut que l'écart n'est pas significatif.	1,98 étant inférieur à 3,182, on conclut que le nouveau ressort n'est pas significativement supérieur à 1,2 N.
5. En cas de doute sur le résultat (risque β), augmenter la taille de l'échantillon et recommencer la procédure.	Si on veut améliorer le test, il faut refaire des prototypes afin d'augmenter la taille de l'échantillon.

Fiche – Test z Comparaison de deux moyennes (σ connu)	
Ce que fait le test Étant donné deux échantillons de taille n_1 et n_2 , dont les valeurs observées ont pour moyenne $\bar{X}_1$ et $\bar{X}_2$. On considère connus les écarts types σ_1 et σ_2 . Peut-on conclure que la différence entre $\bar{X}_1$ et $\bar{X}_2$ est significative ?	
Domaine d'application Les moyennes doivent suivre une loi normale. Cette condition est robuste sur la répartition des valeurs individuelles. Comment faire le test ?	Exemple Le ressort que je produis a une force moyenne $\mu = 1,2$ N et un écart type $\sigma = 0,1$ N. Ces valeurs ont été calculées sur 150 données, on suppose donc σ et μ connus. On conçoit un nouveau ressort afin d'augmenter cette force. On teste en parallèle la solution actuelle et la solution innovante. Les 5 ressorts actuels en test donnent : 1,21 ; 1,26 ; 1,15 ; 1,12 ; 1,18 Les 4 prototypes du nouveau ressort donnent : 1,32 ; 1,45 ; 1,18 ; 1,29
1. À partir des valeurs relevées, calculer les moyennes $\bar{X}_1$, $\bar{X}_2$ et les écarts types S_1 et S_2 .	$\bar{X}_1 = 1,18$; $\bar{X}_2 = 1,31$ $S_1 = 0,054$; $S_2 = 0,111$
2. Vérifier l'hypothèse sigma connu en calculant l'intervalle bilatéral à 5 % devant contenir S pour les deux écarts types. $\sigma \sqrt{\frac{\chi^2_{(\alpha/2)}}{(n-1)}} < S < \sigma \sqrt{\frac{\chi^2_{(1-\alpha/2)}}{(n-1)}}$ Si ce n'est pas le cas, passer au test t.	$0,035 < S_1 < 0,17$ $0,027 < S_2 < 0,18$ S_1 et S_2 étant dans l'intervalle, on accepte l'hypothèse σ connu = 0,1 N.
3. Calculer la distance entre les deux moyennes $d = \bar{X}_1 - \bar{X}_2 $	$d = 1,31 - 1,18 = 0,13$
4. Calculer l'écart type de la distance $\sigma_d = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{\sqrt{n_1}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\sqrt{n_2}}\right)^2}$	$\sigma_d = \sqrt{\left(\frac{0,1}{\sqrt{5}}\right)^2 + \left(\frac{0,1}{\sqrt{4}}\right)^2} = 0,07$

5. Calculer la variable z_0 $z_0 = \frac{d}{\sigma_d}$	$z_0 = \frac{0,13}{0,07} = 1,88$
6. Chercher dans la table de Gauss la valeur z_{lim} pour le risque choisi (5 % en bilatéral, soit 2,5 % de chaque côté).	$z_{lim} = 1,96$
7. Conclure. Si $z_0 > z_{lim}$, on conclut que l'écart est significatif. Si $z_0 \leq z_{lim}$, on conclut que l'écart n'est pas significatif. 8. En cas de doute sur le résultat (risque β), augmenter la taille de l'échantillon et recommencer la procédure.	1,88 étant inférieur à 1,9, on conclut que le nouveau ressort n'est pas significativement plus puissant que le ressort précédent. Pour diminuer le doute, il faut augmenter la taille de l'échantillon.

Fiche – Test t Comparaison de deux moyennes (σ inconnu)	
Ce que fait le test Étant donné deux échantillons de taille n_1 et n_2, dont les valeurs observées ont pour moyenne $\bar{X}_1$ et $\bar{X}_2$ et pour écarts types S_1 et S_2. Peut-on conclure que la différence entre $\bar{X}_1$ et $\bar{X}_2$ est significative ? Attention : si les deux échantillons peuvent être appariés, c'est-à-dire que chaque valeur d'un échantillon peut être mise en regard d'une valeur d'un second échantillon par un caractère commun, il faut utiliser le test t apparié.	
Domaine d'application Les moyennes doivent suivre une loi normale. Cette condition est robuste sur la répartition des valeurs individuelles. Comment faire le test ?	Exemple Dans la conception d'un assemblage collé, on veut tester deux types de colles différentes pour augmenter la force à l'arrachement. La colle 1 a donné : 3,1 ; 5,2 ; 3,8 ; 6,3 ; 4,5 La colle 2 a donné : 4,7 ; 8,2 ; 5,6 ; 6,3 ; 7,5 ; 6,5
1. À partir des valeurs relevées, calculer les moyennes $\bar{X}_1$, $\bar{X}_2$ et les écarts types S_1 et S_2 .	$\bar{X}_1 = 4,58$; $\bar{X}_2 = 6,47$ $S_1 = 1,24$; $S_2 = 1,26$
2. Vérifier l'homogénéité des deux variances par le test F. $F = \frac{S_{Max}^2}{S_{Min}^2}$ à comparer à $F_{théor}$ pour v_1 et v_2 ddl	$F = \frac{1,26^2}{1,24^2} = 1,04$; $F_{thér} = 6,26$ $F < F_{théor}$ on accepte l'homogénéité des variances.
3. En cas d'homogénéité des variances, calculer la variance intra-série $S^2 = \frac{v_1 S_1^2 + v_2 S_2^2}{v_1 + v_2}$	$S^2 = \frac{(4 \times 1,24^2) + (5 \times 1,26^2)}{4 + 5} = 1,57$ $S = \sqrt{1,57} = 1,25$
4. Calculer la distance entre les deux moyennes $d = \bar{X}_1 - \bar{X}_2 $	$d = 6,47 - 4,58 = 1,89$
5. Calculer l'écart type de la distance $\sigma_d = \sqrt{\left(\frac{S}{\sqrt{n_1}}\right)^2 + \left(\frac{S}{\sqrt{n_2}}\right)^2} = S \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2}}$	$\sigma_d = 1,25 \sqrt{\frac{5 + 6}{30}} = 0,76$

6. Calculer la variable t_0 $t_0 = \frac{d}{\sigma_d}$	$t_0 = \frac{1,89}{0,76} = 2,49$
7. Chercher dans la table de Student la valeur t_{lim} pour le risque choisi (5 % en bilatéral, soit 2,5 % de chaque côté) et le nombre de ddl ($n_1 + n_2 - 2$).	$t_{lim} = 2,26$
8. Conclure. Si $t_0 > t_{lim}$, on conclut que l'écart est significatif. Si $t_0 \leq t_{lim}$, on conclut que l'écart n'est pas significatif. 9. En cas de doute sur le résultat (risque β), augmenter la taille de l'échantillon et recommencer la procédure.	2,49 est supérieur à 2,26 On conclut que la colle 2 est significativement plus résistante (au risque de 2,5 %) que la colle 1.

Fiche – Test de Hartley															
Comparaisons de plus de deux variances															
Ce que fait le test Le test de Hartley consiste à comparer plusieurs variances $S_1^2, S_2^2, \dots, S_k^2$, toutes établies avec le même nombre ν de degré de liberté. Ce test permet de tester l'égalité de $k(k < 13)$ variances.															
Domaine d'application Les échantillons sont tirés d'une population normale. Les échantillons ont une taille identique. Comment faire le test ?	Exemple On a tiré 6 échantillons de taille $n = 4$ et on souhaite calculer un estimateur de l'écart type à partir de l'ensemble des écarts types de ces échantillons. On trouve <table><tr><td>S</td><td>2,5</td><td>3,2</td><td>1,9</td><td>2,8</td><td>2,5</td><td>1,7</td></tr><tr><td>S^2</td><td>6,25</td><td>10,24</td><td>3,61</td><td>7,84</td><td>6,25</td><td>2,89</td></tr></table>	S	2,5	3,2	1,9	2,8	2,5	1,7	S^2	6,25	10,24	3,61	7,84	6,25	2,89
S	2,5	3,2	1,9	2,8	2,5	1,7									
S^2	6,25	10,24	3,61	7,84	6,25	2,89									
1. Identifier S_{max}^2 et S_{min}^2 qui sont respectivement la plus forte et la plus faible des estimations des k variances.	$S_{max}^2 = 10,24 ; S_{min}^2 = 2,89$														
2. Former le rapport r tel que $r = \frac{S_{Max}^2}{S_{Min}^2}$	$r = \frac{S_{Max}^2}{S_{Min}^2} = \frac{10,24}{2,89} = 3,54$														
3. Comparer ce rapport à la valeur dans la table de Hartley pour k, ν et α .	$r_{limite} = 62$														
4. Si $r < r_{table}$ on accepte l'hypothèse d'homogénéité et on peut calculer un estimateur plus précis à partir de : $S = \sqrt{\frac{\nu_1 S_1^2 + \nu_2 S_2^2 + \dots + \nu_k S_k^2}{\nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_k}}$ Comme $\nu_1 = \nu_2 = \nu_k$ on peut simplifier l'expression précédente qui devient : $S = \sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_k^2}{k}}$	$r < r_{limite}$ on accepte l'hypothèse d'homogénéité. On peut calculer $S = \sqrt{\frac{6,25 + 10,24 + \dots + 2,89}{6}} = 2,49$														

4. Analyse de la variance

La méthode d'analyse de la variance ou ANAVAR consiste à identifier et à comparer les sources de variation d'une variable :

- La variabilité à l'intérieur des échantillons (intra-échantillon), que l'on associe à l'erreur non expliquée par le modèle ;
- La variabilité entre les échantillons (inter-échantillon), que l'on associe au facteur.

4.1 Analyse de la variance sur un facteur

4.1.1 Principe

L'analyse de la variance sur un facteur permet de tester d'éventuelles différences significatives entre plusieurs modalités d'un facteur.

Illustrons ce principe par un exemple :

On réalise un essai avec trois types de joints pour diminuer une fuite. Le montage de chaque type de joint a été réalisé sur cinq produits ; le résultat est présenté au tableau suivant.

Figure 4.3.12 – influence du joint sur la fuite

	1	2	3	4	5	$\bar{Y}$
Joint 1	11	9	9	7	8	8,8
Joint 2	9	8	10	8	7	8,4
Joint 3	13	9	11	10	9	10,4

La question posée est la suivante :

Peut-on conclure que le joint 2, qui a donné la plus faible moyenne de fuite, est significativement meilleur ?

Pour répondre à cette question, on doit vérifier une des deux hypothèses suivantes :

- H_0 : Le facteur (ici, c'est le joint) n'est pas significatif
- H_1 : Le facteur est significatif.

Dans le cas où l'hypothèse nulle (H_0) est vraie, l'écart constaté sur les moyennes ne sera en fait que l'expression de la dispersion aléatoire. La variance de l'effet du facteur (variance inter-échantillon) sera donc du même ordre de grandeur que la variance résiduelle (variance intra-échantillon).

Dans le cas où H_0 est fausse, la variance de l'effet sera très supérieure à la variance résiduelle.

Le principe de l'analyse de la variance consiste donc à comparer deux variances :

- La variance de l'effet du facteur, et
- La variance résiduelle.

Pour y procéder, on utilise le *test F* déjà présenté (Voir Fiche – *test F*).

4.1.2 Décomposition de la variance

a – Vocabulaire

* **Variable Y** : ce que l'on mesure, aussi appelé variable réponse (ici, la fuite).

* **Facteur** : ce qui différencie les populations ou les échantillons, ce qui est susceptible d'affecter Y (ici, le type de joint).

* **Niveaux d'un facteur** : modalité du facteur, dont le nombre est noté m (ici, $m=3$, et les niveaux sont joint 1, joint 2, joint 3).

* **Unité expérimentale** : ce sur quoi on applique les traitements, dont le nombre du niveau i est noté n_i (ici, l'unité expérimentale est le produit et $n_i = 5$).

b – Notations

$\bar{\bar{Y}}$ Moyenne de l'ensemble des valeurs

$\bar{Y}_i$ Moyenne des mesures de la modalité i

Y_{ij} Mesure de modalité i de la répétition j

m Nombre de modalité

n Nombre de répétitions pour chaque modalité

c – Décomposition de la variance

L'exemple présenté à la figure 4.3.12 comporte 15 valeurs (m modalités et n répétitions sur chaque modalité) sur lesquelles on peut calculer la variance totale :

$$V_T = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{\bar{Y}})^2}{nm - 1}$$

Cette variance a deux origines :

- La variance résiduelle que l'on peut observer lorsque le facteur reste sur la même modalité (le même joint) = Variance intra-échantillon.

$$V_R = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2}{m(n - 1)}$$

- La variance due aux variations de modalités du facteur (variation sur $\bar{Y}$ en changeant le joint) = Variance inter-échantillon.

$$V_A = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\bar{Y}_i - \bar{\bar{Y}})^2}{m - 1} = \frac{n \sum_{i=1}^m (\bar{Y}_i - \bar{\bar{Y}})^2}{m - 1}$$

Dans cette décomposition de la variance, les numérateurs sont appelés « Somme des écarts au carré (SS) » et les dénominateurs « degrés de liberté (v) ».

On a ainsi $V_T = \frac{SS_T}{v_T}, V_R = \frac{SS_R}{v_R}, V_A = \frac{SS_A}{v_A}$

On montre facilement que l'on a : $SS_T = SS_A + SS_R$ et $v_T = v_A + v_R$

$$\begin{aligned}
 SS_T &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{\bar{Y}})^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\underbrace{Y_{ij} - \bar{Y}_i}_a + \underbrace{\bar{Y}_i - \bar{\bar{Y}}}_b)^2 \\
 SS_T &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 + (\bar{Y}_i - \bar{\bar{Y}})^2 + 2(Y_{ij} - \bar{Y}_i)(\bar{Y}_i - \bar{\bar{Y}}) \\
 SS_T &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\bar{Y}_i - \bar{\bar{Y}})^2 + 2 \underbrace{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_i)(\bar{Y}_i - \bar{\bar{Y}})}_{=0} \\
 SS_T &= SS_R + SS_A
 \end{aligned}$$

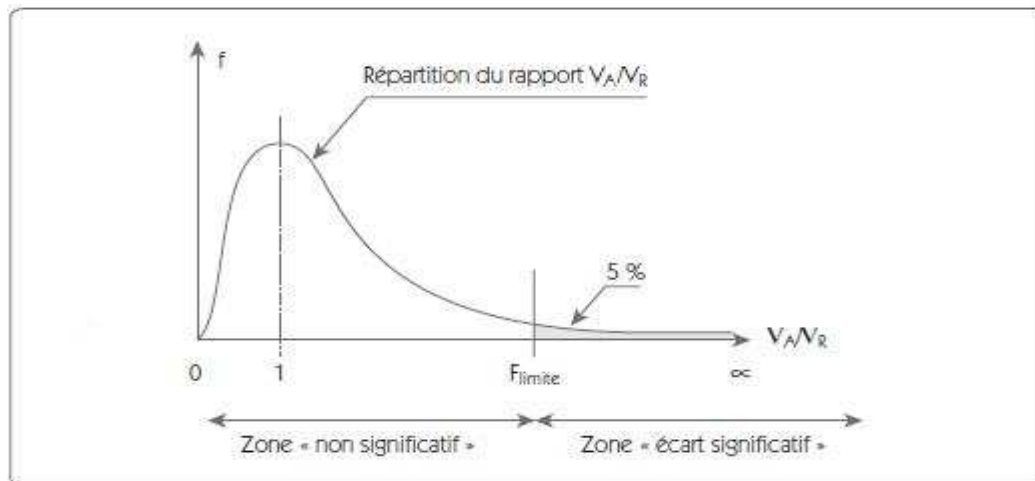
De même,

$$v_T = nm - 1 = nm - m + m - 1 = m(n - 1) + m - 1 = v_R + v_A$$

On supposant que H_0 est vrai, la variance de l'effet V_A est égale à la variance résiduelle V_R . Le test de l'analyse de la variance consiste à comparer V_A et V_R par un *test F* (Test Fisher-Snedecor) en calculant le ratio :

$$F = \frac{V_A}{V_R}$$

Figure 4.3.13 – Test de Fisher Snedecor



Le facteur sera significatif si la valeur de F est supérieure à la limite maximale admissible en fonction du risque alpha (α) choisi dans la table de Snedecor pour v_A et v_B degrés de libertés.

4.1.3 Tableau d'analyse de la variance

Cette analyse se pose sous forme de tableau :

Figure 4.3.14 – tableau d'ANAVAR

Origine	Somme des carrés SS	ddl	V	F	F_{limite}	p	Contrib.
A	$SS_A = n \sum_{i=1}^m (\bar{Y}_i - \bar{\bar{Y}})^2$	$v_A = m-1$	$V_A = \frac{SS_A}{v_A}$	$F = \frac{V_A}{V_R}$	Table		$\frac{SS_A}{SS_T} \%$
Résidus	$SS_R = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2$	$v_R = m(n-1)$	$V_R = \frac{SS_R}{v_R}$				$\frac{SS_R}{SS_T} \%$
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{\bar{Y}})^2$	$v_T = nm-1$	$V_T = \frac{SS_T}{v_T}$				

Ce qui donne dans le cas de notre exemple :

Figure 4.3.15 – Application sur les fuites

Origine	Somme des carrés SS	ddl	V	F	F _{limite}	p	Contrib.
A	$SS_A = 5(0,4^2 + 0,8^2 + 1,2^2)$ = 11,2	$v_A = 2$	$V_A = \frac{11,2}{2}$ = 5,6	$F = \frac{5,6}{2,1}$ = 2,67	$v_1 = 2$ $v_2 = 12$ $F_L = 3,88$	0,11	30,8 %
Résidus	$SS_R = 8,8 + 5,2 + 11,2$ = 25,2	$v_R = 12$	$V_R = \frac{25,2}{12}$ = 2,1				69,2 %
Total	$SS_T = 36,4$	$v_T = 14$	$V_T = \frac{36,4}{14}$ = 2,6				

Interprétation :

Le ratio F calculé 2,67 étant plus petit que le ratio limite trouvé dans la table de Snedecor 3,88 ($F < F_L$). Donc on peut accepter l'hypothèse H_0 et conclure que le facteur n'est pas significatif. De même, lorsqu'un logiciel calcule la probabilité (ici, $p = 0,11 > \alpha = 5\%$), lorsque cette probabilité est supérieur à 0,05 on accepte l'hypothèse H_0 . La part de la variance résiduelle est de 69,2 %, et la part du facteur est de 30,8 %.

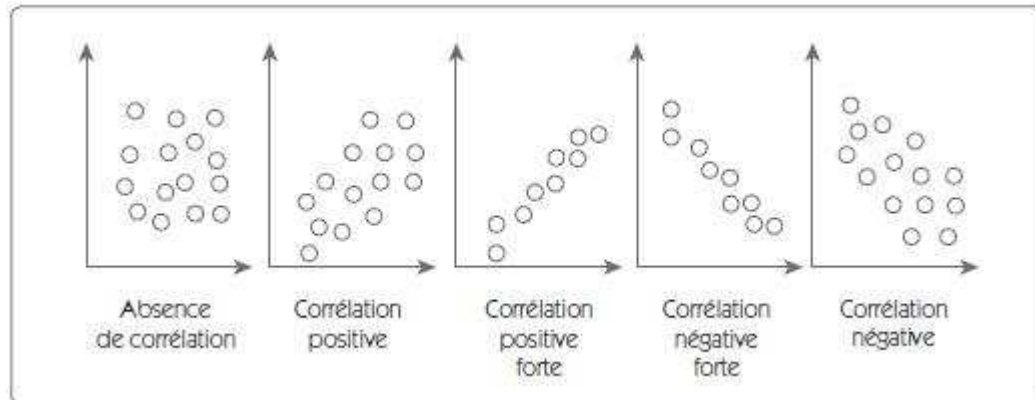
A partir de ses résultats, il est aisé de généraliser l'analyse de la variance pour des cas comportant plusieurs facteurs X.

5. L'Etude des corrélations

Le diagramme de corrélation permet d'étudier la relation qu'entretiennent deux variables (X et Y). On dit qu'il y a corrélation si ces deux variables évoluent de façon commune (nuage de point orienté).

On peut classer les diagrammes de corrélation en cinq types selon le nuage de points comme l'indique la figure suivante :

Figure 4.3.14 – Les types de corrélation



Les résultats graphiques peuvent être utilement enrichis par :

- L'équation de la droite de régression ;
- Le coefficient R^2

Il faut cependant ne pas confondre corrélation et relation causale: Une bonne corrélation entre deux grandeurs peut révéler une relation de cause à effet entre elles, mais pas nécessairement.

Par exemple : Si on compare la durée de vie des individus à la quantité de médicaments pour le cœur qu'ils ont absorbée, on observera probablement une corrélation négative. Il serait imprudent de conclure que la prise de ses médicaments diminue la vie des individus : en fait, dans ce cas, la corrélation est l'indice d'une cause commune : la maladie du cœur (Crise cardiaque par exemple).

5.1 La régression linéaire (Calcule et Application sur logiciel)

L'analyse de la régression permet de connaître la relation entre les variables indépendants (X) et les variables dépendants (Y). Le problème consiste à

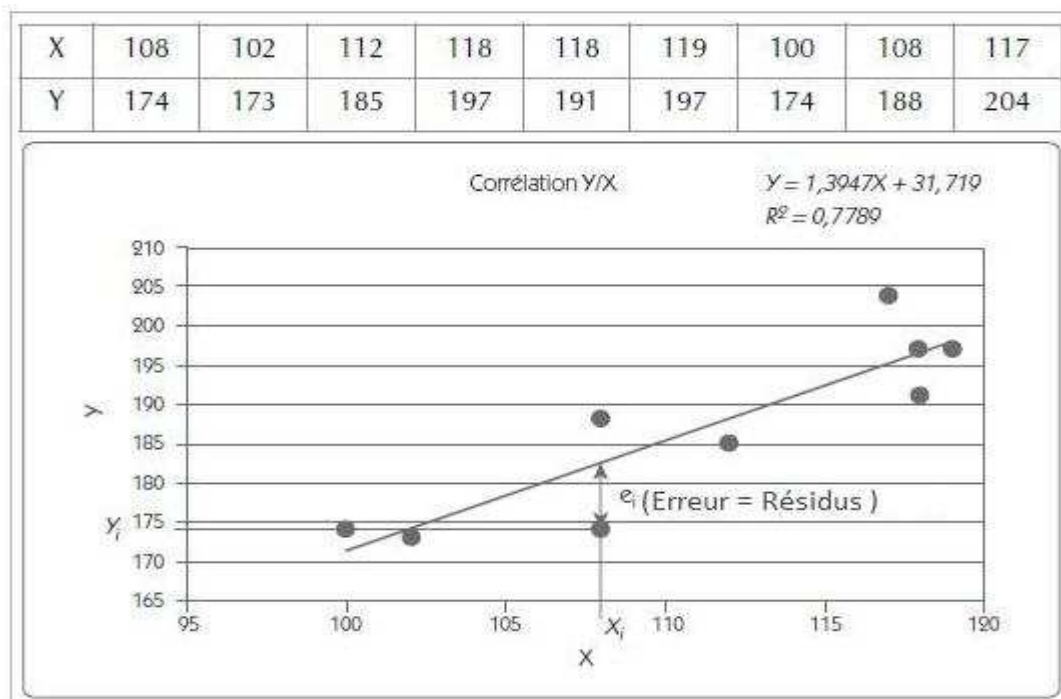
déterminer quelle équation de la droite correspond le mieux à la relation qui existe.

Rappelons que la droite a pour équation $Y = \alpha_0 + \alpha_1 X$, avec :

- X : Les essais
- Y : Résultats des essais

5.1.1 Identification des coefficients α_0 et α_1

Figure 4.3.15 – Droite de régression



Pour chaque couple de points, on peut écrire $e_i = Y_i - (\alpha_0 + \alpha_1 X_i)$.

Ce qui peut s'écrire sous forme matricielle de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ \dots \\ e_i \\ \dots \\ e_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ \dots \\ Y_i \\ \dots \\ Y_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & X_1 \\ \dots & \dots \\ 1 & X_i \\ \dots & \dots \\ 1 & X_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{bmatrix} \text{ soit } e = Y - Xa$$

La minimisation des moindres carrés de Gauss « e_i^2 »

Dans cette méthode, il s'agit de trouver les coefficients α_0 et α_1 qui minimisent les écarts (e_i^2) entre la droite et les points. Lorsque ces écarts sont minimaux, on obtient la droite qui passe au mieux des points.

Solution :

La somme des écarts e_i^2 s'écrit $e^t \cdot e$ avec e^t la matrice transposée de e .

Minimiser $e^t \cdot e$ consiste à trouver les valeurs de α_0 et α_1 qui annulent la dérivée de $e^t \cdot e$ par rapport à a .

$$e^t \cdot e = [Y - Xa]^t [Y - Xa] \quad (\text{avec } e = Y - Xa)$$

$$= Y^t Y - 2a^t X^t Y + a^t X^t X a$$

$$\frac{\partial e^t \cdot e}{\partial a} = -2X^t Y + 2X^t X a$$

Pour annuler cette dérivée, on a alors

$$\frac{\partial e^t \cdot e}{\partial a} = -2X^t Y + 2X^t X a = 0$$

$$2X^t X a = 2X^t Y$$

$$a = \frac{2X^t Y}{2X^t X}$$

Finalement on trouve $\boxed{\hat{a} = X^t Y \cdot (X^t X)^{-1}}$

On appliquant cette relation sur les données de l'exemple, on trouve :

$$\text{Matrices } X = \begin{bmatrix} 1 & 108 \\ \dots & \dots \\ 1 & 117 \end{bmatrix} \text{ et } Y = \begin{bmatrix} 174 \\ \dots \\ 204 \end{bmatrix}$$

$$X^t Y = \begin{bmatrix} 9 & 1002 \\ 1002 & 111974 \end{bmatrix} ; (X^t X)^{-1} = \begin{bmatrix} 29,76 & -0,266 \\ -0,266 & 0,0024 \end{bmatrix}$$

$$\hat{a} = (X^t X)^{-1} \cdot X^t Y = \begin{bmatrix} 31,719 \\ 1,3947 \end{bmatrix}$$

Donc, notre droite de régression est $Y = 1,3947X + 31,719$.

Mais il faut se poser la question suivante : ces coefficients sont-ils significatifs ?

- L'hypothèse H_0 : le Coefficient a une valeur aléatoire autour de 0.
- L'hypothèse H_1 : le Coefficient est significativement différent de 0.

5.1.2 – Test de Student sur les coefficients

On utilise le test de Student pour voir si le coefficient calculé est significativement différent de 0.

Pour répondre, on doit calculer la variable réduite $t = \alpha / \sigma_\alpha$; après avoir calculé le coefficient α (α_0 et α_1), il faut donc connaître σ_α .

La variance (V) sur les coefficients dépend :

- de la dispersion résiduelle (σ_r)
- de la position des points testés dans le domaine d'étude (matrice X)

Démonstration

$$\hat{a} = (X^t X)^{-1} \cdot X^t Y, \text{ donc}$$

$$V(\hat{a}) = V[(X^t X)^{-1} \cdot X^t Y]$$

Dans l'hypothèse nulle (H_0): $V(Y) = V(e_i) = \sigma_r^2$, avec

- $V(Y)$: Variance des résultats des essais
- $V(e_i)$: Variance résiduelle ($= \sigma_r^2$)

Donc la variance sur les coefficients

$$\boxed{V(\hat{a}) = \sigma_r^2 (X^t X)^{-1}}$$

On appliquant cette relation sur les données de l'exemple, on trouve :

Figure 4.3.16 – Calcul des résidus e_i

X	108	102	112	118	118	119	100	108	117
Y	174	173	185	197	191	197	174	188	204
$\alpha_0 + \alpha_1 X$ ($\hat{Y}$)	182,4	174,0	187,9	196,3	196,3	197,7	171,2	182,4	194,9
$e_i = Y - (\alpha_0 + \alpha_1 X)$	-8,4	-1,0	-2,9	0,7	-5,3	-0,7	2,8	5,6	9,1

On calcule $V(e_i) = \sigma_r^2 = \frac{\sum e_i^2}{ddl} = 32,98$, avec

ddl: degrés de liberté = 9 (données) - 2 (coefficients) = 7

$$\text{Soit } \sigma_r = \sqrt{\frac{\sum e_i^2}{ddl}} = 5,74$$

Connaissant σ_r^2 on détermine facilement $V(\hat{a}) = \sigma_r^2 (X^t X)^{-1}$

$$V(\hat{a}) = \sigma_r^2 (X^t X)^{-1} = 32,98 \begin{bmatrix} 29,76 \\ 0,0024 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 981,66 \\ 0,079 \end{bmatrix}$$

Donc

$$\bullet \sigma_{\alpha 0} = \sqrt{981,66} = 31,33$$

$$\bullet \sigma_{\alpha 1} = \sqrt{0,079} = 0,28$$

Ce qui permet de faire le tableau de test de Student :

Figure 4.3.17 – Test de Student

Prédicteur	Coef.	sigma σ_α	t (= α/σ_α)	p
Const α_0	31,719	$\sqrt{981,66} = 31,33$	$31,72/31,33 = 1,01$	0,345
Pente α_1	1,3947	$\sqrt{0,079} = 0,28$	$1,39/0,28 = 4,97$	0,0016

On considère que la corrélation est significative lorsque p est inférieur à 0,05 (Risque alpha 5%).

Dans notre exemple, on conclut que la constante α_0 n'est pas significativement différent de 0 ($p > 0,05$), mais la pente de α_1 est significative ($p < 0,05$).

5.1.3 – Coefficient de détermination R^2

Le test de Student permet de savoir si les coefficients calculés sont significatifs ou non. Mais ce n'est pas parce qu'un facteur X est significatif que l'on a expliqué avec ce facteur une part importante des variations de Y.

C'est la raison pour laquelle il faut compléter l'analyse par le calcul d'un coefficient R^2 qui mesure la proportion de la variance sur Y expliquée par la corrélation entre X et Y. Comme la totalité des variations ne peuvent pas être expliquées par la relation, R^2 est donc toujours compris entre 0 et 1.

Le coefficient R^2 se calcule très simplement par la relation suivante :

$$R^2 = \frac{V(Y) - V(e_1)}{V(Y)} = \frac{130,5 - 28,858}{130,5} = 0,779$$

Mais si l'on veut tenir compte de la variance résiduelle (σ_r^2), on calcule le ratio :

$$R_{Ajust}^2 = \frac{V(Y) - \sigma_r^2}{V(Y)} = \frac{130,5 - 32,98}{130,5} = 0,747$$

Signification de R^2 :

Le ratio R^2 calcule la proportion de la variance totale que l'on peut imputer à la corrélation. Ainsi, un coefficient R^2 d'environ 0,779 pourra-t-il être interprété de la façon suivante :

77,9 % de la variance sur Y sont dus aux variations de X. Cela signifie également que, si on fige la variable X, on obtient une réduction de 30 % de la variance Y.

A partir de ses résultats, il est aisé de généraliser cette méthode, pour des cas comportant plusieurs entrées X, « Méthode de la régression linéaire multiple ».

Etape 4 - Innover/Améliorer

Les trois premières étapes de la démarche Six Sigma nous ont permis de bien connaître les facteurs X responsables de la variabilité de Y. Les modifications introduites n'ont porté pour l'instant que sur la réduction de la variabilité en figeant tous les facteurs qui pouvaient l'être.

Le temps est venu d'apporter des modifications en profondeur au processus afin d'atteindre l'objectif fixé au début du projet. Cette étape peut se scinder en trois phases :

- une phase de génération des solutions ;
- une phase d'expérimentation (Les Plans d'expériences) ;
- une phase d'analyse de risques (AMDEC).

1. Générer des solutions

La génération des solutions est le fruit d'un travail de groupe. De très nombreux outils ont été développés pour assister les groupes de travail dans ce domaine.

1.1 Le déballage d'idées (Brainstorming)

Le travail de groupe coûte cher, il faut donc qu'il soit efficace pour être rentable. Un déballage d'idées bien animé permet de gagner un temps précieux. Le principe de base en est de réunir un groupe pluridisciplinaire afin de provoquer une créativité par émulation. Dans un déballage d'idées on peut distinguer trois phases importantes :

- **Définir un objet**

Le déballage d'idées doit toujours commencer par une formulation claire et écrite de l'objectif de l'étude, ce dernier devant être accepté de façon consensuelle.

- **Déballage**

Pendant le déballage d'idées, chaque membre du groupe évoque tous les éléments concernant le sujet qui lui passent par la tête. la critique des idées est interdite pendant le déballage, elle viendra en son temps. Pour être efficace, un animateur doit inscrire sur les bouts de papier les éléments au fur et à mesure qu'ils sortent et les afficher sur un mur à l'aide d'un adhésif repositionnable.

Dans un premier temps, les papiers sont collés en désordres sur le mur et énoncés clairement afin de donner des idées aux autres membres du groupe.

En général, il n'est pas très utile de poursuivre très longtemps le déballage.

Souvent une demi-heure à une heure bien conduite suffit largement.

- **Classification**

Un fois le déballage est terminé, il convient de classer les données écrites en utilisant des outils tels que le diagramme d'Ishikawa autour des cinq M. C'est au cours de ce classement que l'utilisation d'adhésif repositionnables est appréciée. On élimine les redondances, parfois on démultiplie une idée qui est comprise différemment par deux personnes et, enfin, on regroupe sous la forme de macro idées les éléments les plus proches.

1.2 Le vote pondéré

Le vote pondéré permet d'effectuer un tri parmi les différents éléments qui apparaissent après un déballage d'idées.

La figure 4.4.1 montre le résultat d'un vote dans lequel on a demandé à chaque membre de noter les idées de 1 à 5 selon trois critères on affectant à chacun de ses trois critères un poids différent en fonction de son importance :

- L'efficacité (poids 5),
- Le coût (poids 3),
- Le délai de réalisation (poids 1).

Figure 4.4.1 – Résultat d'un vote pondéré

Solutions	Efficacité (poids 5)	Coût (poids 3)	Délai (poids 1)	Note globale
Changer le type de joint	4,2	1,2	2,5	27,1
Diminuer la rugosité	2,1	1,7	3,6	19,2
Changer le type de fluide	1,3	1,3	1,2	11,6
Rajouter une gorge	3,5	2,5	2,1	27,1
Modifier le diamètre de gorge	2,8	4,6	4,6	32,4

Les notes qui apparaissent dans le tableau, sont les moyennes des notes données par chaque individu.

La note globale est obtenue en additionnant chaque note pondérée selon le poids du critère correspondant. Exemple : « Modifier le diamètre de gorge » :

- La note globale = $(2,8 \times 5) + (4,6 \times 3) + (4,6 \times 1) = 32,4$.

Ce vote montre que le meilleur compromis entre l'efficacité, le coût et le délai de mise en œuvre de la solution est réalisé par la solution « Modifier le diamètre de gorge ». Bien sûr, dans ce type de vote, le choix des poids affectés à chaque critère demeure un point délicat, qui doit être bien évalué.

Une fois que l'on a choisi les solutions, il faut maintenant être capable de tester ces dernières et d'optimiser les configurations au moyen d'expériences.

2. Les Plans d'expériences et les graphes de TAGUCHI

La méthode des plans d'expériences date en fait du début du siècle avec les travaux de FISHER (1952). Les premiers utilisateurs de ces méthodes furent des agronomes qui ont vite compris l'intérêt des plans d'expériences et notamment la réduction du nombre d'essais lorsqu'on étudie de nombreux paramètres. En effet, les essais en agronomie sont consommateurs de paramètres et très longs, l'étude du rendement d'un blé nécessite la prise en compte du type de terrain, des différents traitements, de l'ensoleillement, etc... Il était donc indispensable de réduire le nombre d'essais sans perdre en précision. Mais cette technique est restée relativement confidentielle.

Il a fallu les travaux du docteur **Taguchi** dans les années soixante au Japon pour que les plans d'expériences pénètrent nos usines. Taguchi a su simplifier et clarifier l'utilisation des plans d'expériences. Son apport est considérable et la diffusion à grande échelle de ses travaux aux Etats-Unis date de la fin des années soixante-dix. Aujourd'hui, les plans d'expériences représentent un outil indispensable à tout industriel, du plus petit au plus grand, soucieux d'améliorer la qualité de ses produits.

2.1 Les plans d'expériences complets

2.1.1 Etude d'un phénomène

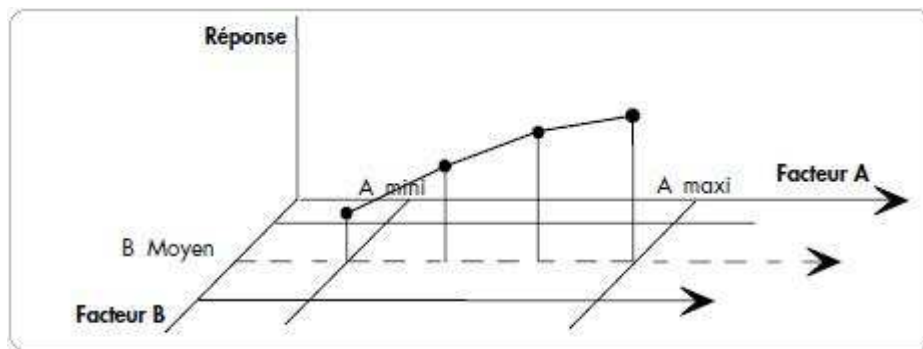
a – La démarche d'acquisition des connaissances

La démarche industrielle d'acquisition des connaissances reposant souvent sur l'expérimentation, il est important de considérer les trois critères suivants dans la mise en œuvre des essais :

- Elle doit faciliter l'acquisition progressive des connaissances ;
- Elle doit minimiser le nombre d'expérience ;
- Elle doit fournir la meilleure précision possible.

La première difficulté que rencontre le technicien qui souhaite réaliser des essais est de trouver les expériences à réaliser qui lui apporteront le plus d'informations. Cependant, les difficultés de l'expérimentateur ne s'arrêtent pas là, car, une fois les essais réalisés, il faut interpréter les résultats, ce qui n'est pas toujours le plus simple !

Figure 4.4.2 – Méthode traditionnelle

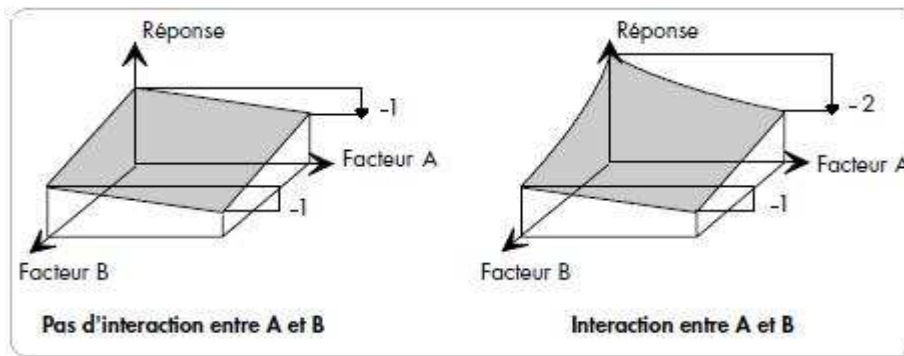


La démarche traditionnellement retenue pour faire des essais consiste à faire varier un seul facteur à la fois. Ainsi, dans le cas de cette figure, pour étudier deux facteurs, on fixe successivement A et B au niveau moyen pour faire varier l'autre facteur du mini au maxi. Cette méthode, est-elle la méthode optimale ? En effet, le problème se complique lorsque le phénomène étudié comporte des interactions.

b – Etude des interactions

Une interaction existe lorsque le système ne réagit pas à un facteur de façon identique selon la configuration d'un autre facteur. Il existe un lien entre les deux facteurs.

Figure 4.4.3 – Notion d'interaction



Cette figure représente le phénomène des interactions. Le premier schéma montre un phénomène sans interaction. On constate que l'effet sur la réponse lorsque le facteur A passe du mini au maxi est de (-1). Et ceci indépendamment de l'état du facteur B.

Le deuxième schéma montre un phénomène avec interaction. Dans ce cas, l'effet du facteur A sur la réponse n'est pas le même selon que le facteur B est au mini ou au maxi. En effet, lorsque A passe du mini au maxi alors que B est au mini, la variation de la réponse est de (-2). Par contre la même variation de A alors que B est au maxi ne provoque qu'une variation de réponse de (-1). Donc il y a interaction entre les facteurs A et B.

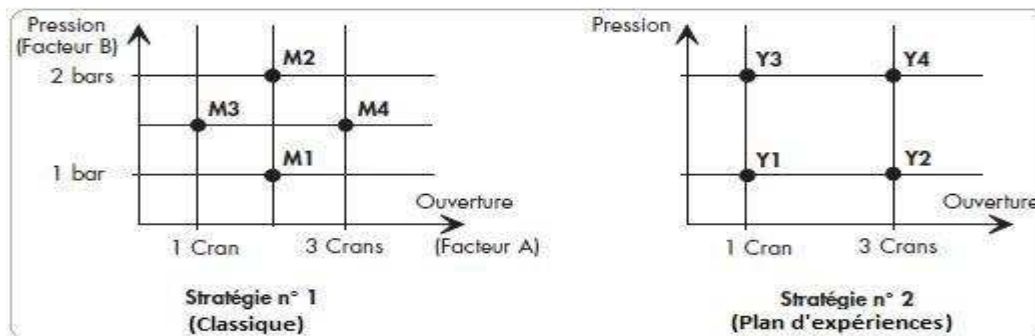
Evidemment, en faisant varier qu'un facteur à la fois de façon classique, l'étude des interactions est impossible.

c – Précision sur les résultats

La seconde limite de la démarche traditionnelle concerne la précision sur les résultats d'une campagne d'essai.

Pour comprendre l'amélioration de la précision apportée par les plans d'expériences, on va reprendre le cas de l'étude de deux facteurs A et B.

Figure 4.4.4 – Les deux stratégies



Dans ce plan, la stratégie classique (n°1) consiste à étudier un facteur à la fois, le second étant placé au niveau moyen. La stratégie des plans d'expérience (n°2) consiste à se placer aux quatre coins du domaine d'étude.

Dans la stratégie classique l'effet du facteur A sera évalué en faisant la différence entre le maximum et le minimum : $E_A = M_4 - M_3$

Dans la stratégie des plans d'expériences, l'effet du facteur A sera évalué en faisant la différence entre le résultat moyen lorsque A est au maxi et le résultat moyen lorsque A est au mini. On a donc : $E_A = \frac{1}{2}(Y_2 + Y_4) - \frac{1}{2}(Y_1 + Y_3)$

La stratégie des plans d'expériences calcule l'effet moyen à partir de moyennes alors que la stratégie classique le calcule se fait à partir d'une seule valeur. Or la théorie de l'échantillonnage nous dit que lorsqu'une population est distribuée avec un écart type σ la moyenne d'un échantillon de n valeurs est distribuée selon un estimateur de l'écart type $\sigma/\sqrt{n}$.

d - Application sur un plan d'expérience complet

Réaliser un plan d'expérience complet consiste à réaliser tous les essais à chaque nœud du maillage. Prenons le cas où le nombre de niveaux par facteur est différent d'un facteur à l'autre. Pour illustrer ceci, nous allons étudier un problème d'amélioration d'une rugosité sur une rectifieuse.

Les facteurs étudiés sont les suivants :

Symbole	Facteur	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
A	Type de meule	Meule 1	Meule 2	
B	Rotation pièce	Vitesse 1	Vitesse 2	Vitesse 3
C	Vitesse meule	Vitesse 1	Vitesse 2	

La réponse mesurée est le critère de rugosité Ra.

Le plan complet comporte donc $2 \times 3 \times 2 = 12$ essais. On vérifie facilement que le plan ci-dessous comporte tous les essais du maillage.

Essais	A	B	C	Y
1	1	1	1	0,36
2	1	2	1	0,39
3	1	3	1	0,46
4	1	1	2	0,47
5	1	2	2	0,53
6	1	3	2	0,74
7	2	1	1	0,37
8	2	2	1	0,41
9	2	3	1	0,48
10	2	1	2	0,49
11	2	2	2	0,55
12	2	3	2	0,76

La moyenne générale
des 12 essais

 $M = 0,50 \mu\text{m}$

Pour faciliter l'interprétation, on représente l'ensemble des effets et des interactions de façon graphique. Ce graphe (figure 4.4.5) permet de visualiser l'effet des facteurs et l'influence des interactions.

- Effet des facteurs étudiés

Pour illustrer cet effet, on établit le tableau des moyennes :

Niv/fact	A	B	C
1	0,49	0,42	0,41
2	0,51	0,47	0,59
3		0,61	

Moyenne des essais
1, 2, 3, 7, 8, 9 où le facteur C est à 1

- Influence des interactions

Pour les interactions on réalise pour chaque interaction un tableau qui précise la valeur moyenne obtenue dans chaque configuration.

Interaction AB			
A/B	B = 1	B = 2	B = 3
A = 1	0,415	0,46	0,6
A = 2	0,43	0,48	0,62

Moyenne des essais 3 et 6 où
le facteur A est à 1
le facteur B est à 3

Interaction BC			
C/B	B = 1	B = 2	B = 3
C = 1	0,36	0,40	0,47
C = 2	0,48	0,54	0,75

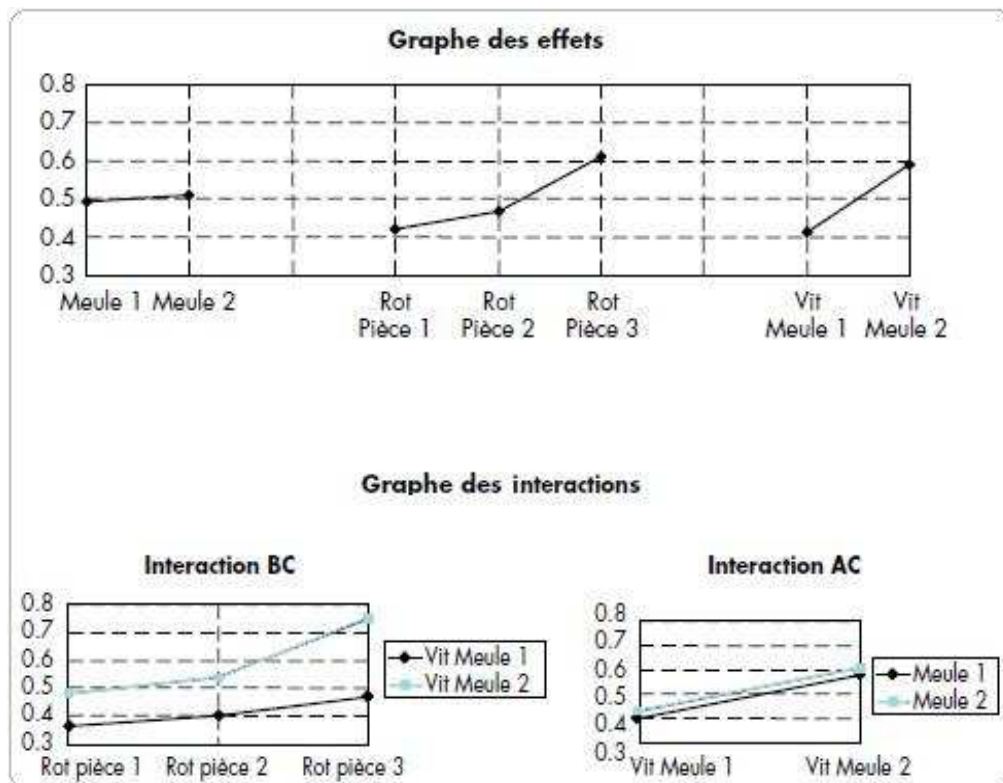
Moyenne des essais 3 et 9 où
le facteur C est à 1
le facteur B est à 3

Interaction AC		
C/A	A = 1	A = 2
C = 1	0,40	0,42
C = 2	0,58	0,60

Moyenne des essais 7, 8 et 9 où
le facteur C est à 1
le facteur A est à 2

L'ensemble des effets/Interactions se mettent sous forme graphique :

Figure 4.4.5 – Graphe des effets et des interactions



Cette figure représente pour les trois premières courbes les effets moyens des facteurs A, B et C. Le quatrième graphique visualise l'interaction significative BC. Le cinquième graphique visualise l'interaction nulle AC : Les segments de droites sont parallèles.

Pour représenter l'interaction BC, nous avons placé en abscisse le facteur « Rotation pièces », et en ordonnée la réponse du système. Les deux courbes représentent les effets pour les deux configurations de vitesse de meule.

Sur ce graphe, on note clairement que l'effet de la « Rotation de la pièce » est faible lorsque la vitesse de la meule est au niveau 1. Il est par contre très important lorsque celle-ci est égale à 2.

On note le point qui minimise la rugosité (Configuration optimale) :

- Type de meule : indifférent.
- Rotation pièce : rotation 1.
- Vitesse de meule : vitesse 1.

2.1.2 Le problème des plans complets

La stratégie « plan d'expériences » proposée dans la figure 4.4.4 (stratégie n°2) nécessite 4 essais (2^2) car on étudie deux facteurs à deux niveaux (mini et maxi).

Si on veut étudier trois facteurs avec cette stratégie, il faudrait 8 essais (2^3). Ces 8 essais nous permettraient d'étudier les 4 interactions possibles entre les trois facteurs (AB, AC, BC, ABC).

Si on veut étudier huit facteurs avec cette stratégie, il faudrait 256 essais (2^8). Ces 256 essais nous permettraient d'étudier les 247 interactions possibles entre les 8 facteurs (AB, ...GH, ABC, ...FGH, ..., ABCDEFGH). C'est bien mais c'est un peu cher de réaliser 256 essais. De plus les interactions d'ordre supérieur à 2 sont pratiquement toujours nulles.

Aussi, plutôt que de faire les 256 essais, ne peut-on pas se contenter que de 16 essais par exemple et sélectionner quelques intéressantes à étudier parmi les 247 possibles. C'est ce que proposent les plans d'expériences grâce à l'utilisation de plans spéciaux.

2.2 Les plans d'expériences fractionnaires orthogonaux

La méthode des plans d'expériences apporte une solution à ces problèmes. Elle permet :

- de déterminer de façon optimale la liste des essais à réaliser ;
- d'interpréter de façon très rapide les résultats des expériences ;
- de fournir un modèle prédictif permettant de trouver les configurations optimales ;

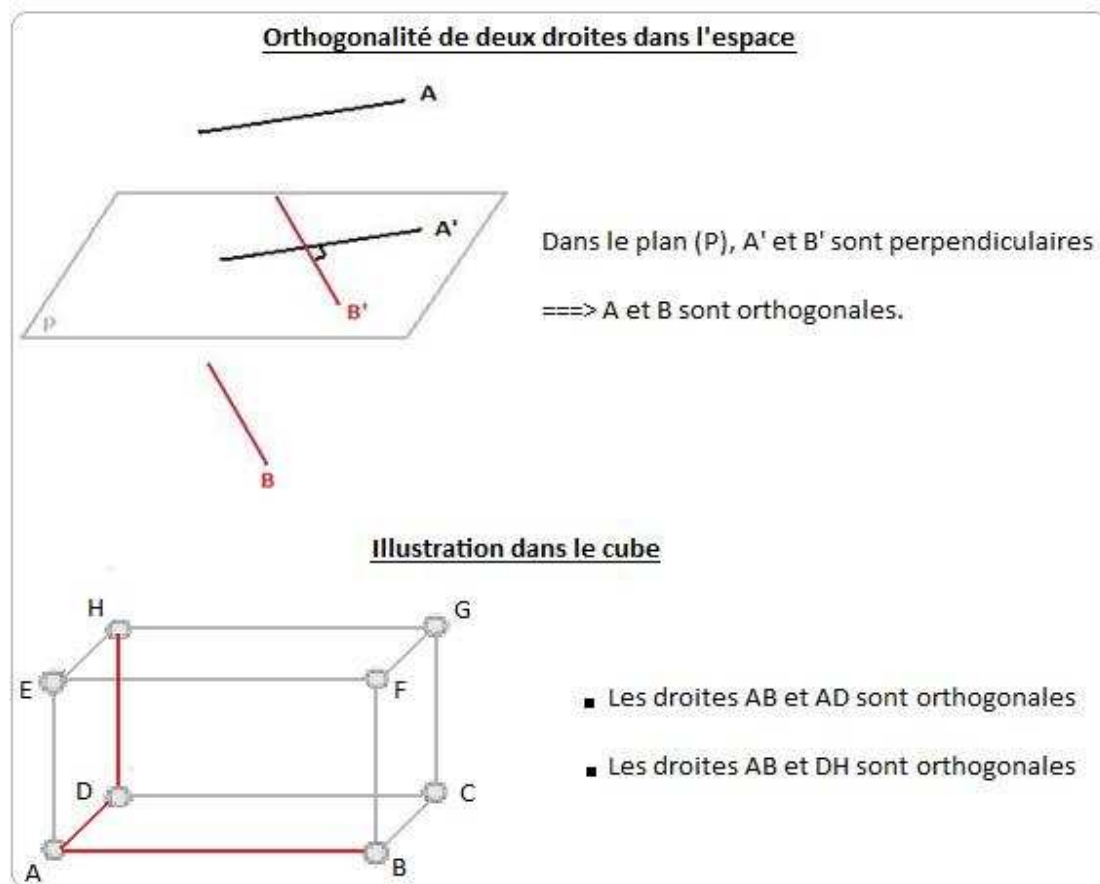
Ces plans d'expériences sont :

- Fractionnaires, car on ne fait qu'une fraction de l'ensemble des essais possibles.
- Orthogonaux, car ils ne sont pas quelconques, mais choisis en fonction de la propriété d'orthogonalité.

Propriété d'orthogonalité :

Définition : Dire que deux droites dans l'espace sont orthogonales signifie que :
Une parallèle de l'une est perpendiculaire de l'autre.

Figure 4.4.6 – Propriété d'orthogonalité

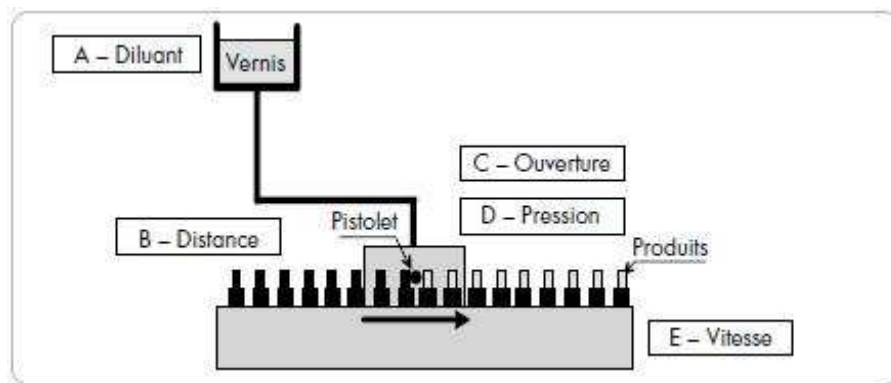


2.2.1 Etude sur l'exemple d'un « Pistolet à peinture »

Le problème que nous cherchons à résoudre concerne une installation de vernissage. Les produits défilent devant un pistolet à peinture alimenté par un pot.

Nous désirons comprendre le fonctionnement de ce système et connaître l'influence des différents facteurs sur la qualité de vernis déposé ; Pour mesurer l'épaisseur de la couche de vernis, il suffit de mesurer la couleur obtenue à l'aide d'un appareil qui nous donne une valeur numérique pouvant aller de 0 à 60 sur l'échelle de couleur jaune.

Figure 4.4.7 Schématisation du système étudié



a – Synthèse du savoir faire

La première étape à conduire dans une étude « plan d'expériences » consiste à faire la synthèse du savoir-faire de l'entreprise sur le domaine étudié. Pour cela, on réunit l'ensemble des acteurs concernés par le problème, afin de connaître :

- les facteurs agissants sur le système ;
- le domaine de variation de ces facteurs ;
- les interactions supposées entre les facteurs.

Nous passerons assez vite sur cette phase dans notre étude. Il faut cependant bien garder à l'esprit que cette étape est une étape-clé pour la réussite de la méthode. Après cette étape de synthèse, les experts ont pu établir le tableau figure 4.4.8 résumant leurs connaissances sur l'installation de vernissage. On choisit de faire varier chaque facteur sur deux niveaux. Nous noterons le minimum raisonnable de la variation du facteur le niveau 1, le maximum raisonnable du facteur le niveau 2.

Figure 4.4.8 - Recensement des facteurs

Facteurs influant sur la quantité de vernis	Mini raisonnable (Niveau 1)	Maxi raisonnable (Niveau 2)
A Pourcentage de diluant	10 %	20 %
B Distance pistolet/objet	20 cm	40 cm
C Ouverture de la buse	1 cran	3 crans
D Pression du pistolet	2 bars	3 bars
E Vitesse d'avancement des produits	0,2 m/s	0,3 m/s

Les interactions supposées par les experts sont les suivantes :

- interaction entre la pression et l'ouverture (CD) ;
- interaction entre le diluant et l'ouverture (AC).

De plus, parmi les facteurs, certains se modifient facilement, d'autres plus difficilement. Ainsi, le diluant est difficile à modifier car il nécessite une vidange complète de l'installation. Les autres facteurs sont faciles à passer du mini au maxi.

b – Modélisation par les graphes de TAGUCHI

Pour résoudre ce problème, le docteur TAGUCHI propose de le mettre sous forme de graphe en suivant certaines règles de représentation.

- **Les facteurs**

Ils sont représentés par des ronds différents selon la difficulté de modification d'un niveau à un autre. TAGUCHI distingue parmi les facteurs quatre groupes qui seront représentés de façon différente.

- Groupe 1 : Groupe des facteurs les plus difficiles à modifier. Ils seront notés par un cercle blanc ○

- Groupe 4 : groupe des facteurs les plus faciles à modifier. Ils seront notés par un cercle noir ●

Entre ces deux groupes, TAGUCHI insère deux niveau intermédiaires de difficultés de modification, le groupe 2 noté (◐) et le groupe 3 noté (◑).

• Les interactions

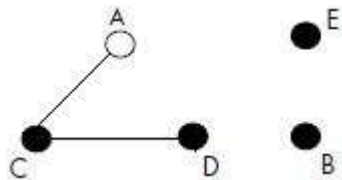
Les interactions entre deux facteurs seront représentées par un trait entre deux facteurs. Ainsi, si on souhaite représenter une interaction entre un facteur A du groupe 1 et un facteur B du groupe 4, nous dessinerons :



• Application à notre cas

Le facteur A étant difficile à modifier, on va le modéliser par un rond blanc. Les autres facteurs, faciles à modifier, seront du groupe 4 et modélisés par un rond noir.

Les deux interactions supposées par les spécialistes seront modélisées par un trait, ce qui nous donne le graphe suivant :



c – Recherche du plan d'expériences correspondant

Nous recherchons maintenant les expériences nécessaires pour mesurer l'effet de chacun des facteurs et de chacune des interactions. Nous souhaitons faire le moins d'expériences possibles et avoir la meilleure précision possible sur les résultats.

Pour cela, on va utiliser les tables orthogonales de Taguchi. Celui-ci a proposé des tables d'expérimentations associées à des graphes facilitant la mise en œuvre des tables. Les tables existaient depuis le début du siècle, mais les graphes linéaires représentent un apport original de Taguchi.

Figure 4.4.9 – Table $L_8 (2^7)$

N°	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2
Groupe	1	2		3			

Examinons à titre d'exemple la table $L_8 (2^7)$. Rappelons que L_8 signifie que cette table comporte 8 lignes, c'est-à-dire 8 expériences. 2^7 signifie que cette table est tirée d'un plan complet de 7 facteurs à 2 niveaux. Cette table ne pourra pas être utilisée pour étudier plus de 7 facteurs, ceux-ci étant à deux niveaux.

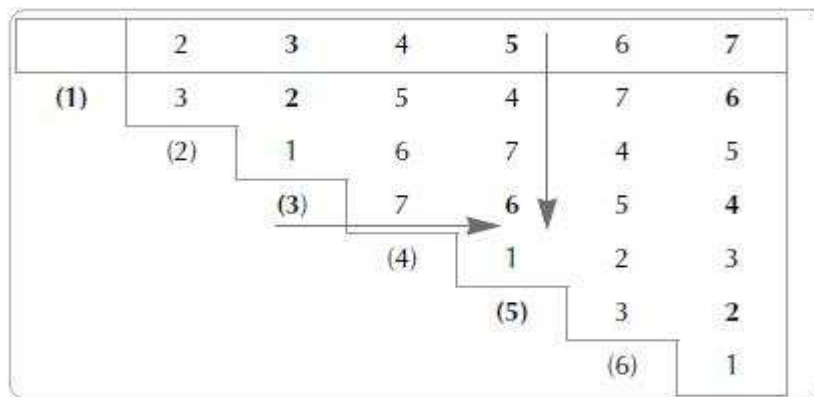
Chaque ligne de la table représente une expérience et chaque colonne permet de mettre un facteur :

- 1 : Lorsque le facteur est placé au mini ;
- 2 : Lorsque le facteur est placé au maxi.

On remarque que la colonne 1 est du groupe 1, le niveau ne change qu'une seule fois dans la table. Les colonnes 2 et 3 (groupe 2) changent de niveaux respectivement 3, et 2 fois. Les colonnes suivantes changent pratiquement à chaque essai.

Cette table est associée au triangle des interactions

Figure 4.4.10 Triangle des interactions entre tous les colonnes



L'interaction entre la colonne 3 et la colonne 5 donne la colonne 6.

Pour retrouver la colonne d'interaction avec la notation 1/2 on utilise la règle mnémonique suivante :

- (1)×(1) ➤ 1
- (1)×(2) ➤ 2
- (2)×(1) ➤ 2
- (2)×(2) ➤ 1

	A	B	AB
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

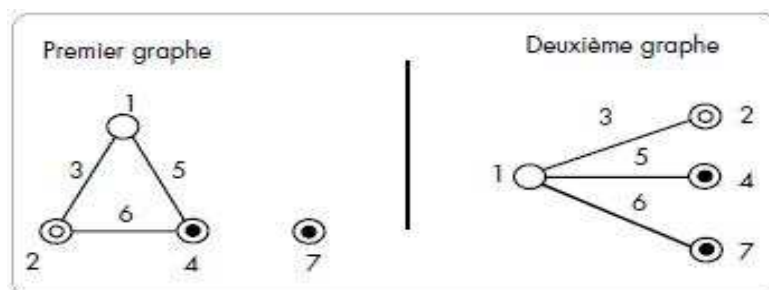
Ces tables ne sont pas quelconques, elles ont la propriété d'orthogonalité.

Cette propriété est à la base de leur construction.

- **Graphe linéaire de la table L_8**

Deux graphes linéaires accompagnent la table L_8 .

Figure 4.4.11 - Graphes linéaires de la table L_8

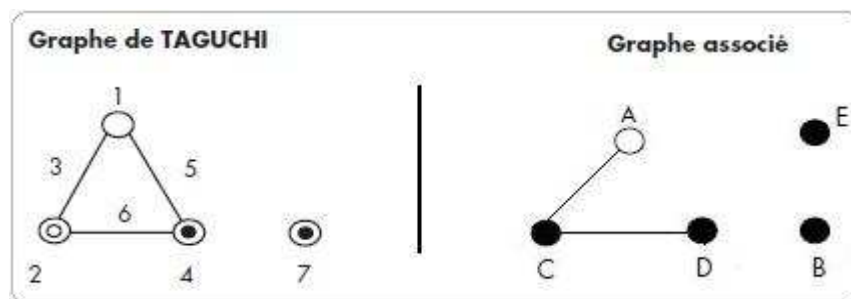


Ces deux graphes indiquent, sous forme graphique, les modèles que l'on peut étudier à partir de la table $L_8(2^7)$.

- **Utilisation de cette table**

Pour utiliser cette table, il faut rapprocher le graphe de notre application d'un des graphes de TAGUCHI. Ainsi, si nous comparons le premier graphe de TAGUCHI et le graphe de notre application (figure 4.4.12), on va constater une certaine similitude.

Figure 4.4.12 – Rapprochement des deux graphes



Le rapprochement des deux graphes nous permet de placer les facteurs dans les colonnes adaptées. Ainsi, le placement des facteurs A, B, C, D, est immédiat, il suffit de placer A en colonne 1, C en colonne 2, D en colonne 4 et B en colonne 7. Ce choix n'est pas unique, on aurait pu également inverser C et D. Comme on souhaite étudier l'interaction AC, la colonne 3 est réservée pour cette interaction. Nous dirons pour une première approche que nous ne pouvons pas placer de facteur dans cette colonne. Il en est de même pour la colonne 6 (interaction CD). Par contre, la colonne 5 est disponible, les spécialistes ont considéré que l'interaction AD était nulle ou presque. Nous en profiterons pour placer le facteur restant E.

Une remarque doit être faite à ce propos : Nous avons placé le facteur E en colonne 5 parce que nous supposons l'interaction AD est nulle. Mais si ce n'est pas le cas, nous ferons une erreur dans l'estimation de l'effet de E. On dit que E est « alias » de l'interaction AD. Le résultat que nous affecterons à E sera en fait la somme de l'effet de E et de l'interaction AD.

Le plan d'expériences à réaliser est obtenu en ne retenant que les colonnes 1,2, 4, 5 et 7 ce qui nous donne le plan suivant.

Figure 4.4.13 – Réalisation du plan d'expérience

N°	A (1) Diluant	B (7) Distance	C (2) Ouvert	D (4) Pression	E (5) Vitesse	Réponse Couleur
1	1	1	1	1	1	26,8
2	1	2	1	2	2	11,8
3	1	2	2	1	1	31,0
4	1	1	2	2	2	30,9
5	2	2	1	1	2	23,8
6	2	1	1	2	1	20,4
7	2	1	2	1	2	27,1
8	2	2	2	2	1	28,9

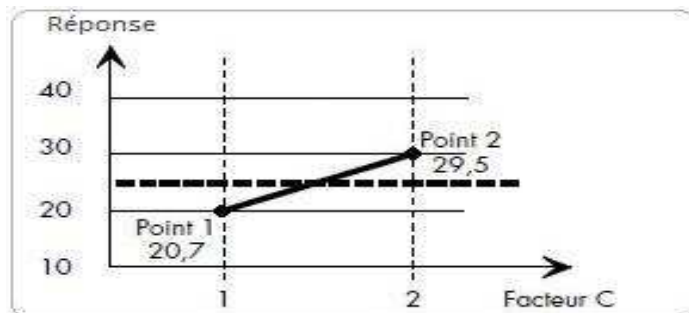
Le plan d'expérience établie, il suffit de réaliser les expériences et de mesurer les résultats de chacun des essais.

d – Interprétation des résultats

L'interprétation des résultats est fondée sur représentation graphique des effets de chaque facteur, et des interactions.

- **Graphe des effets**

Etudions l'effet du facteur C :

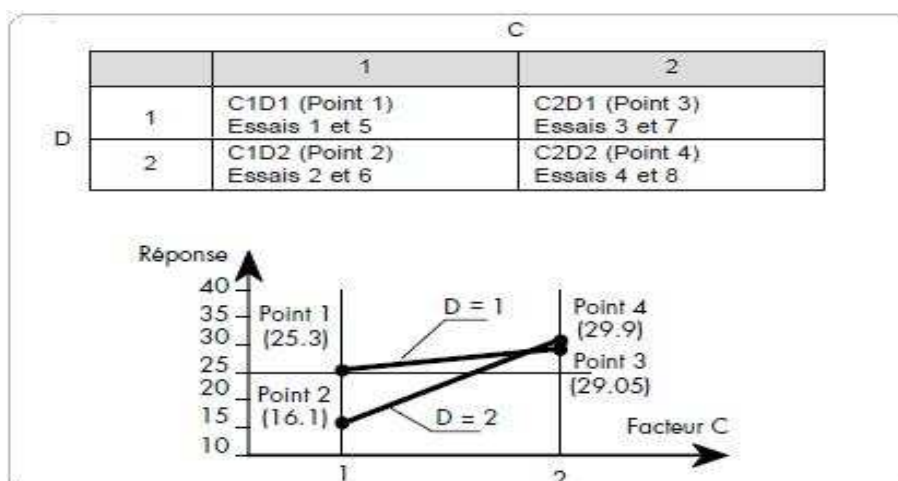


Le point 1 représente la moyenne des essais 1, 2, 5, 6 ($M_{C1}=20,7$), et le point 2 la moyenne des essais 3, 4, 7, 8 ($M_{C2}=29,5$). Ainsi la différence, entre la moyenne des quatre premiers essais et les quatre suivants, représente l'effet du facteur C (ouverture de la buse), traduit par la droite reliant les deux points. Le tracé en pointillé représente la moyenne générale des huit essais ($M=25,08$).

Ce graphe indique clairement que lorsque l'ouverture augmente, la quantité de vernis augmente également.

- **Graphe des interactions**

Etudions l'interaction CD :

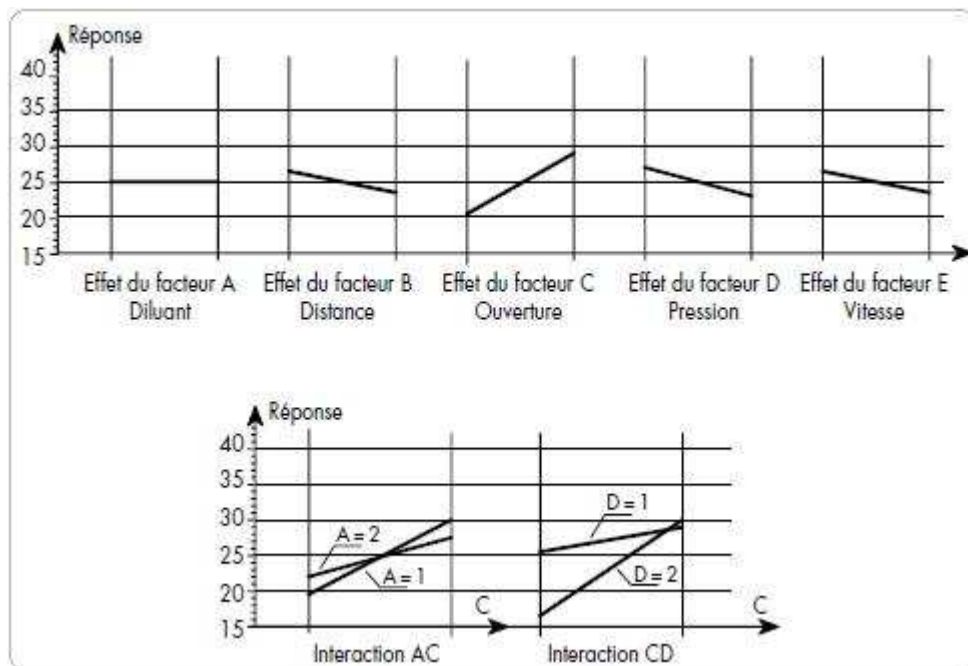


Pour représenter une interaction il faut deux droites reliant les quatre configurations possibles. Cela évite de dessiner en perspective (3 dimensions). Le point 1 est obtenu en faisant la moyenne des essais lorsque $C = 1$ et $D = 1$, soit la moyenne des essais 1 et 5.

On constate sur ce graphe sur lorsque D (pression) est au niveau 1, l'effet du facteur C (ouverture de la buse) est faible, par contre, une pression élevée ($D=2$) favorise l'effet de l'ouverture).

L'ensemble des effets et des interactions présents dans notre système sont représentés de la façon suivante :

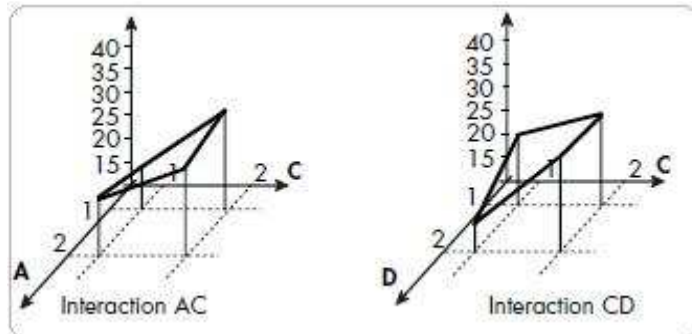
Figure 4.4.14 – Graphe des effets et des interactions du système étudié



L'interprétation de ces graphes est assez facile, on constate par exemple que le diluant (facteur A) n'a pas d'effet principal, mais par contre il intervient par le biais d'une interaction avec le facteur C (ouverture).

Une autre représentation tridimensionnelle des interactions peut être donnée comme le montre la figure 4.4.14.

Figure 4.4.14 – Représentation tridimensionnelle



- **Recherche des extremums**

A partir des graphes obtenus, la recherche des extremums est assez aisée, il suffit de retenir les points les plus hauts ou les points les plus bas en fonction de l'extremum recherché.

Le maximum sera obtenu avec la configuration suivante :

- B placé au niveau 1 (Graphe de l'effet de B) ;
- E placé au niveau 1 (Graphe de l'effet de E) ;
- C niveau 2 et D niveau 2 (Graphe des interactions CD) ;
- C niveau 2 et A niveau 1 (Graphe des interactions AC).

Le minimum sera obtenu avec la configuration suivante :

- B placé au niveau 2 (Graphe de l'effet de B) ;
- E placé au niveau 2 (Graphe de l'effet de E) ;
- C niveau 1 et D niveau 2 (Graphe des interactions CD) ;
- C niveau 1 et A niveau 1 (Graphe des interactions AC).

Bien sûr il faut confirmer ces résultats par des essais sur le site. Pour le minimum, il se trouve que la configuration a déjà été testée dans le plan d'expériences (essai n°2), or cet essai avait donné un résultat particulièrement faible. Mais on ne peut pas vérifier un modèle sur un des essais qui a permis d'établir ce modèle !

Pour le maximum, il faut réaliser un essai complémentaire, ce qui a été fait pour trouver comme maximum **34,4**. Cette valeur maximale n'a jamais été atteinte au cours des essais. Le plan d'expériences a donc permis de trouver très rapidement le résultat recherché.

Il arrive parfois de trouver un écart entre la réalité et la prévision par les plans d'expériences. Dans ce cas deux explications principales peuvent être retenues :

- il y a présence d'un ou d'autres facteurs importants non pris en compte dans le plan qui perturbent les résultats ;
- il y a présence d'interactions fortes non étudiées dans le plan.

En effet, lorsque les spécialistes de l'entreprise ne sont pas capables de prévoir un effet d'un facteur ou d'une interaction au départ de l'étude, c'est que leur connaissance du sujet n'est pas suffisante. Le plan d'expériences révélera alors ce manque de connaissance et permettra aux spécialistes de faire progresser leurs compétences.

Quel que soit le secteur d'activité d'une entreprise, elle est toujours amenée à réaliser des essais. L'heure n'est plus au « bricolage », à la « bidouille » mais à une démarche rigoureuse et efficace pour mieux maîtriser les processus.

3. Analyse des risques – AMDEC

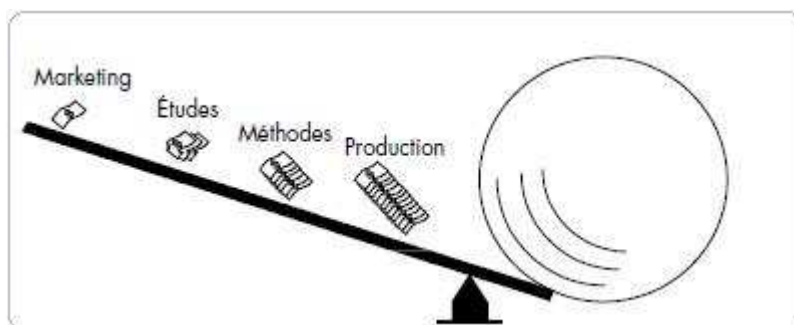
Chaque fois qu'une nouvelle solution est choisie, qu'une modification est apportée à un processus, que ce soit du point de vue organisationnel ou technologique, cela implique toujours un risque potentiel qui doit être détecté de façon préventive.

Dans cette étape « Innover/améliorer », le groupe de travail innove en modifiant les procédures, les processus et le niveau des facteurs. Il y a donc un risque que ces modifications aient des conséquences qui n'apparaissent pas de premier abord. Si on veut limiter les risques, il faut réaliser une analyse formelle des défaillances potentielles du nouveau système que l'on vient de concevoir. L'AMDEC est un outil qui permet de procéder à ce type d'analyse. L'AMDEC (« Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité ») est quelquefois présentée sous le sigle anglais FMECA (Failure Mode, Effect and Criticality Analysis).

3.1 Le principe de base

L'AMDEC est une méthode qui permet d'obtenir la qualité par une action préventive plutôt que curative.

Figure 4.4.15 – L'importance de la prévention



Comme le montre cette figure, plus les décisions concernant la qualité sont prises tôt, moins elles seront coûteuses.

Le principe de base de l'AMDEC est de réaliser une étude fondée sur le travail de groupe, destinée à mettre en évidence le plus tôt possible les défaillances potentielles sous-jacentes d'une étude. La notion d'étude dans une AMDEC peut être très large, ce peut être la conception d'un produit, un processus de production ou l'organisation d'un service.

En s'appuyant sur les compétences de l'entreprise, l'AMDEC propose de réaliser une revue de projet dont le but est de déterminer sur le papier les risques de défaillances encourus si on lance le projet dans l'état.

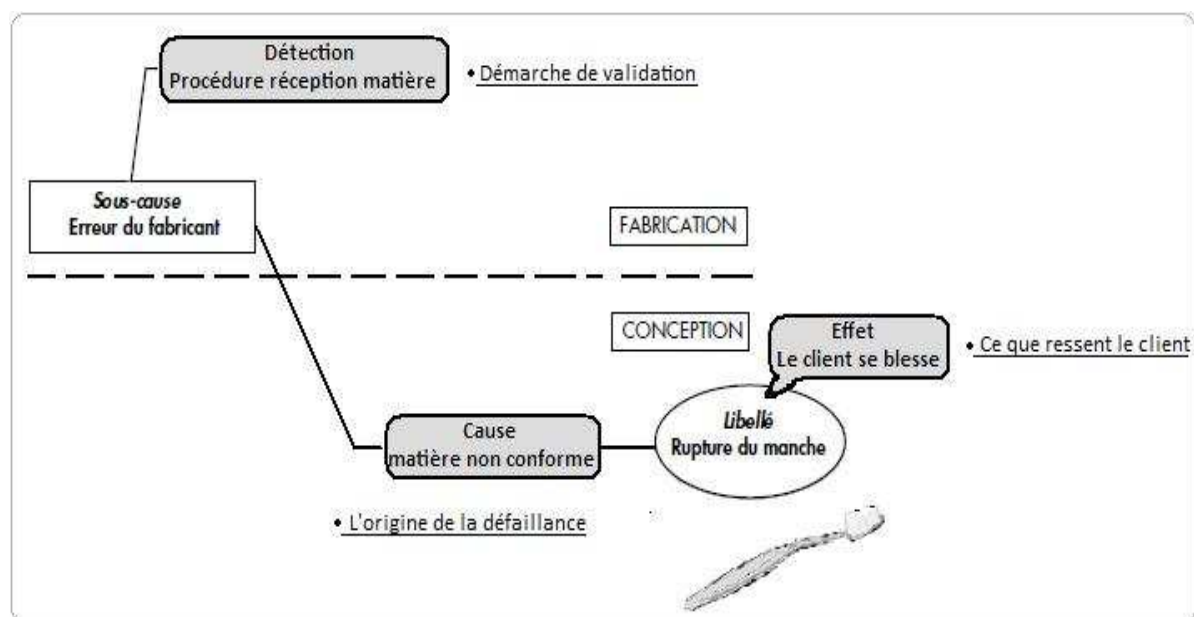
Pour cela, on cherchera à :

- identifier les causes de défaillances ;
- identifier leurs effets ;
- hiérarchiser les défaillances par une notation ;
- apporter des actions correctives en prévention.

3.2 Notion de mode de défaillance

Le concept de « mode de défaillance » est particulièrement important dans l'AMDEC. Il s'agit de la manière dont un système peut être conduit à mal fonctionner. Pour illustrer cette notion, prenons l'exemple d'une brosse à dents.

Figure 4.4.16 – Mode de défaillance



Le libellé de défaillance « Rupture du manche » peut avoir plusieurs causes (entre autres : matière non conforme). Chaque cause peut également avoir une sous-cause dont la détection peut être réalisée soit en conception, soit en fabrication.

Pour assurer le blocage de cette défaillance, il faut que le produit soit bien conçu (AMDEC Produit) et que les spécifications soient respectées (AMDEC Processus).

La défaillance « casse du manche » peut avoir plusieurs modes de défaillances. Dans le tableau suivant on résume trois modes différents :

Libellé : Casse du manche				
Mode de défaillance	N°	Effet	Cause	Détection
	1	Le client se blesse	Mauvais choix de matière	Essais préliminaires
	2	Le client se blesse	Section insuffisante, Forme de la section (moment quadratique)	Calculs en résistance Essais en fiabilité
	3	Le client se blesse	Erreur de matière du fabricant	Procédure réception des matières premières

Comme on le constate sur cet exemple, la même défaillance pour le client peut être déclinée en plusieurs modes de défaillance. Pour que cette défaillance atteigne le client, il faut une combinaison des trois éléments :

- l'apparition de la cause ;
- l'insuffisance de la détection chez le fournisseur ;
- l'importance de l'effet.

On notera la nuance entre l'effet potentiel de défaillance qui considère la conséquence pour le client (aval ou final) et le mode de défaillance potentiel qui s'intéresse à la manière dont le système vient à ne pas satisfaire le client.

3.3 Notation d'un mode de défaillance

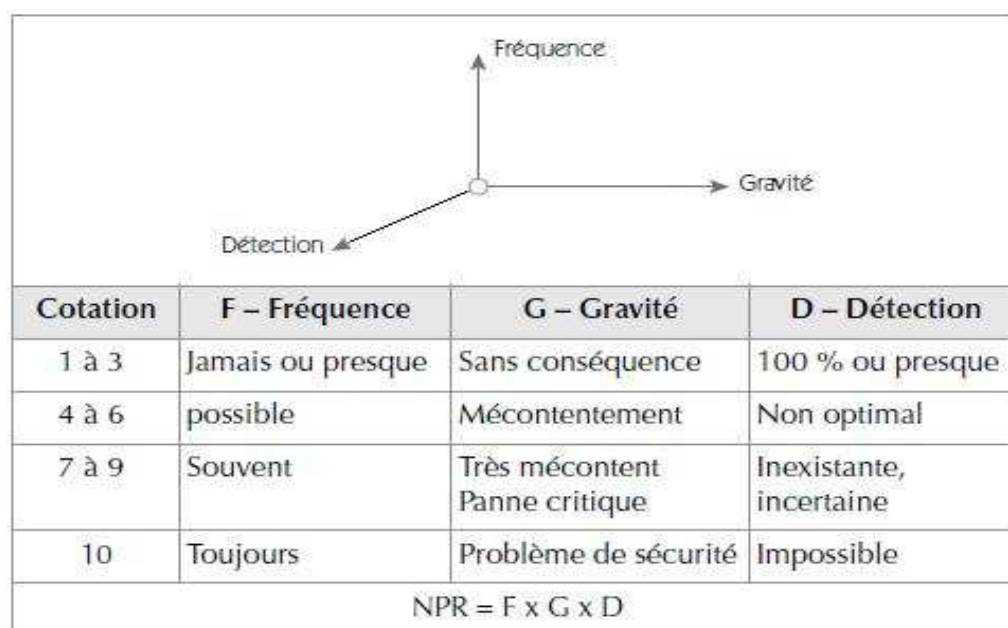
L'originalité de la méthode AMDEC tient en ceci que l'on note chaque mode de défaillance identifié selon trois axes de notation :

- **La fréquence d'apparition (F)**, c'est-à-dire la probabilité que la cause existe multipliée par la probabilité que cette cause crée une défaillance ;
- **La gravité (G)**, c'est-à-dire l'évaluation de l'effet non-qualité ressenti par le client ;
- **La détection (D)**, c'est-à-dire la probabilité de ne pas livrer une défaillance potentielle quand la cause existe.

Pour chacun de ces axes, on fixe une note de 1 à 10 en fonction d'une grille de notation, comme le montre la figure 4.4.16. Le « Niveau de Priorité de Risque » (NPR)⁷ est le produit de ces trois notes.

7. Le NPR se nomme différemment selon les sociétés. On trouve par exemple les termes IPR (Indice de Priorité de Risque) ou plus simplement S (Sévérité).

Figure 4.4.17 – Evaluation des défaillances et calcul du NPR



Pour illustrer la notation d'un mode de défaillance, reprenons l'exemple de la figure 4.4.16 :

« Le client se blesse / Matière non-conforme / Erreur du fabricant »

- fréquence d'apparition très rare $F = 3$.
- gravité de l'effet très importante car très mécontent $G = 9$.
- détection de l'erreur incertaine $D = 9$.

On calcule alors facilement le Niveau de Priorité de Risque :

$$NPR = 3 \times 9 \times 9 = 243.$$

Dès que le niveau de priorité de risque dépasse 100 ($NPR > 100$), il faut déclencher une action corrective afin de ramener le NPR en dessous de la limite. Comme il est souvent difficile de modifier la gravité de l'effet sans une modification de la conception, on cherchera à agir sur les deux autres notes en diminuant la fréquence d'apparition de la cause et en améliorant les possibilités de détection.

Chaque action corrective doit préciser :

- quel type d'action envisagée ;
- qui a les responsabilités de l'action ;
- les notes espérées à l'issue de cette action.

3.4 Le support graphique de l'AMDEC

Pour résoudre le problème du suivi, souvent rencontré dans l'application des outils méthodologiques comme l'AMDEC. L'ensemble de l'étude est synthétisé sur une feuille d'analyse qui jouera le rôle de guide pour les participants de l'AMDEC. Ce modèle graphique, dans le cas d'une AMDEC processus, est souvent celui représenté dans la figure suivante (Cas de notre exemple 4.4.16).

Figure 4.4.18 – Feuille d'analyse pour une AMDEC Process

OP	Produit		Processus	Prévu/existant					Actions			Résultat			
	Défaut potentiel	Effet défaut	Cause défaut	plan de surveillance	Note				Responsable	Délai	Mesures	Note			
					D	F	G	NPR				D'	F'	G	NPR
30	Résistance du manche faible	Casse	Erreur matière	Néant	9	3	9	243	M. Aubel	547	création procédure magasin	3	3	9	81

On retrouve pour chaque défaut potentiel : les trois éléments d'un mode de défaillance, la notation, les éléments d'une action corrective éventuelle ainsi que la nouvelle notation résultante.

Concernant le cas de notre exemple, le groupe a remarqué que si la résistance du manche était faible à cause d'une erreur de matière, rien n'était prévu pour éviter que la défaillance n'atteigne pas le client. Le NPR s'élève à 243, ce qui est inacceptable. Il ya donc une action corrective prévue qui consiste à mettre en place une démarche de validation « Création d'une procédure magasin ».

Le responsable chargé de l'action corrective devra rendre ses conclusions pour la semaine 47.

Le groupe a également évalué le niveau de priorité de risque (NPR) résultant de cette action corrective :

- la gravité reste inchangée (9) ;
- la probabilité d'apparition reste inchangée (3) ;
- la détection a diminué (3) : la procédure magasin a permis une détection d'environ 100 %.

NPR = 81, donc le niveau de priorité de risque est acceptable.

Etape 5 - Contrôler

L'ensemble des étapes précédentes « Définir, Mesurer, Analyser, Innover/améliorer » a permis de fournir une solution afin d'améliorer le z du processus. Cette cinquième étape a pour objectif de se donner les moyens de mettre sous contrôle le processus afin de s'assurer de la stabilité de la solution trouvée.

Le point essentiel dans cette étape est la mise sous contrôle du procédé. Pour cela, il faut :

- valider les spécifications ;
- surveiller que le processus ne dérive pas en appliquant les méthodes de la maîtrise statistique des processus (MSP).

Dans ce chapitre on va détailler ces opérations qui seront appuyées par la dernière étape « Standardiser », laquelle permettra de garantir que le maintien du niveau de qualité atteint se fera à énergie minimale, donnant ainsi aux progrès accomplis un caractère pérenne.

1. Valider les spécifications

A ce stade du projet Six Sigma, les relations entre les X et les Y sont bien établies. Avant de mettre sous contrôle les caractéristiques, il faut valider les spécifications.

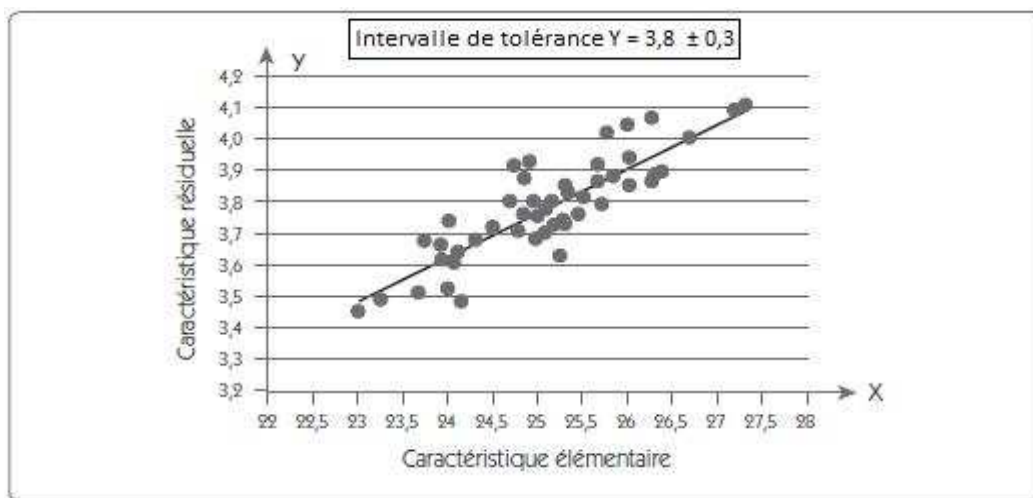
Une spécification se compose d'une cible et de limites de tolérance. Il faut donc déterminer la cible de telle sorte que les tolérances permises soient maximales tout en garantissant le respect des spécifications sur les caractéristiques critiques pour le client (Les Y).

1.1 Détermination des tolérances par corrélation

1.1.1 Méthode graphique - Utilisation du parallélogramme des tolérances

Le tolérancement doit garantir le bon fonctionnement des produits à la fin du processus. Pour y pouvoir, lorsque l'on a identifié une relation entre une caractéristique élémentaire et une caractéristique finale, on doit déterminer les tolérances sur la caractéristique élémentaire de telle sorte que l'on s'assure de la satisfaction du client.

Figure 4.5.1 – Relation de corrélation entre X et Y



La variable Y a pour cible 3,8 et pour tolérance $\pm 0,3$. Comment déterminer les tolérances sur la variable X compte tenu de la relation qui existe entre ces deux variables ?

Première étape : tracer la droite de régression (Voir étape 3 – Analyser).

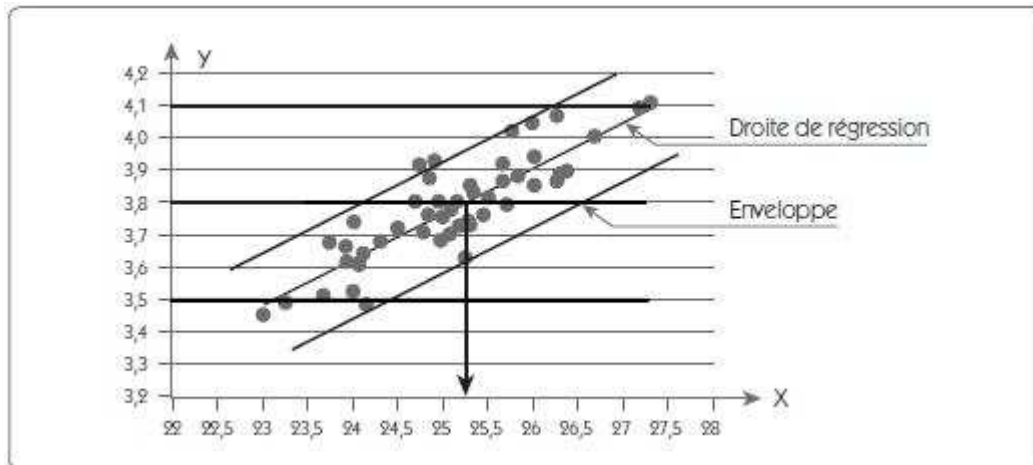
Deuxième étape : déterminer la cible sur X

- En partant de la cible visée sur Y et en la projetant sur la droite de régression, on détermine aisément la cible sur X. Dans l'exemple, on trouve comme cible 25,3 (figure 4.5.2).

Troisième étape : déterminer les tolérances sur X

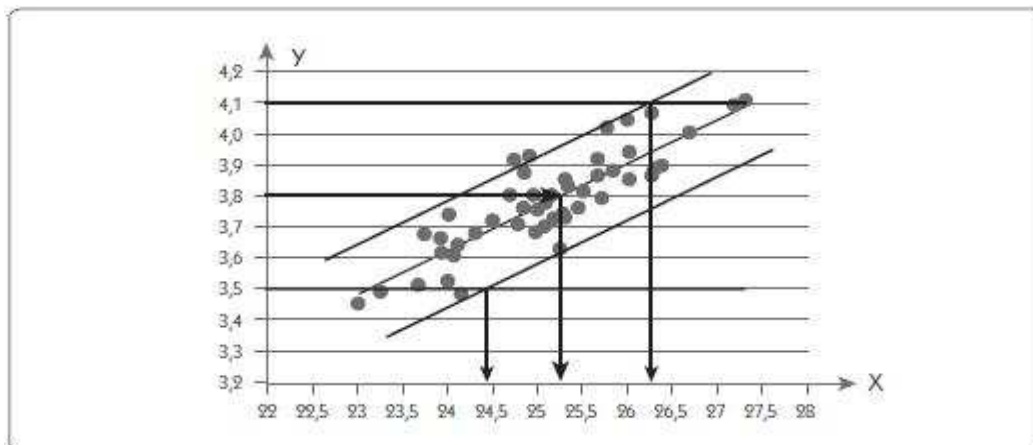
1. On trace les tolérances sur la variable résultante.
2. On trace l'enveloppe de la corrélation, parallèle à la droite de régression.

Figure 4.5.2 Enveloppe de la corrélation



3. On fixe les tolérances sur X en complétant le parallélogramme des tolérances (figure 4.5.3). Dans l'exemple, on fixe les tolérances à $25,33 \pm 0,9$.

Figure 4.5.3 – Parallélogramme des tolérances



1.1.2 – Méthode statistique

La méthode statistique vise à déterminer les tolérances en utilisant les relations de corrélation. La première chose à faire est de calculer l'écart type cible que l'on souhaite sur la variable résultante. On suppose que l'on souhaite un Pp de 1 sur Y (avec $Y = 3,8 \pm 0,3$). Dans ce cas :

$$\sigma_Y = IT/6 = 0,6/6 = 0,1$$

Soit une variance cible sur Y = $0,1^2 = 0,01$.

En utilisant la régression linéaire, on établit la relation entre X et Y.

Statistiques de la régression				
R ²		0,74		
Écart type résiduel (σ_r)		0,07834584		
	Coef.	Écart type	t	Probabilité
X	0,15	0,000440	341,8	2 E-84

- Détermination de la cible

On en déduit la relation pour établir la cible : $Y_{\text{cible}} = 0,15 X_{\text{cible}}$

Soit : $X_{\text{cible}} = Y_{\text{cible}} / 0,15 = 3,8 / 0,15$

$$X_{\text{cible}} = 25,33.$$

- Détermination des tolérances ($\sigma_X = IT/6$)

Pour les limites, on utilise l'additivité des variances :

$$V(Y) = 0,15^2 V(X) + V_{\text{résiduelle}}$$

Pour établir la relation, on est obligé de tenir compte de la variance résiduelle, c'est-à-dire des variations sur Y qui ne sont pas expliquées par les variations de X. Cette variance est déterminée par l'étude de régression linéaire, c'est le carré de l'écart type résiduel.

On a donc :

$$V(X) = \frac{V(Y) - V_{\text{résiduelle}}}{0,15^2} = \frac{0,01 - 0,0783^2}{0,15^2} = 0,17$$

$$\text{Soit } \sigma_{\text{cible}(X)} = \sqrt{0,17} = 0,41$$

En fixant un objectif de Ppk de 1, on trouve comme intervalle de tolérance (IT) :

$$IT = 6 \times 0,41 = 2,4$$

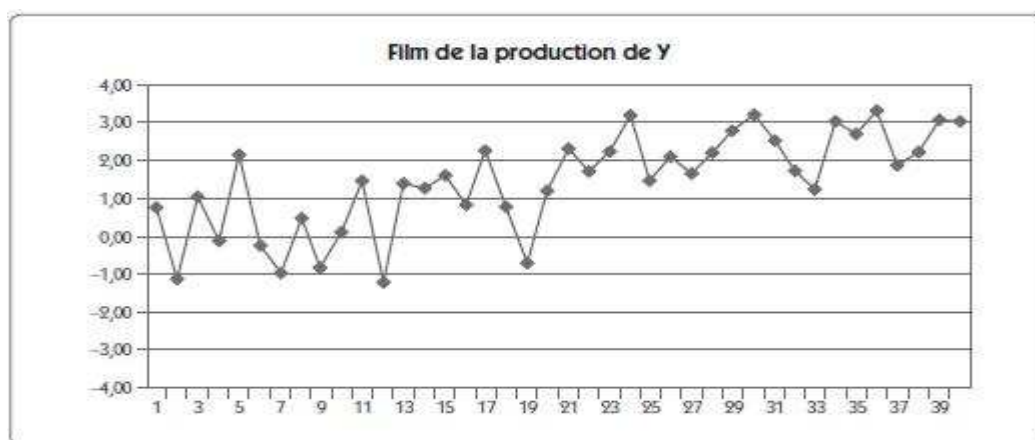
La tolérance sur X est donc fixée à $25,33 \pm 1,2$

2. Processus « sous contrôle »

2.1 Les causes communes et les causes spéciales

Lorsque l'on suit un processus de production, il y a toujours des variations dues à de nombreuses causes ; on se pose la question suivante : à partir de quel écart faut-il intervenir sur le processus ?

Figure 4.5.4 – Procédé avec dérive



L'exemple de cette figure donne le film d'une production sur laquelle on a mesuré la totalité des unités produites. Le processus est visiblement en train de dériver et il faudrait sans doute intervenir pour le ramener sur sa cible (0).

Mais quel critère va nous donner la preuve statistique que le processus a dérivé et qu'il est nécessaire d'intervenir ?

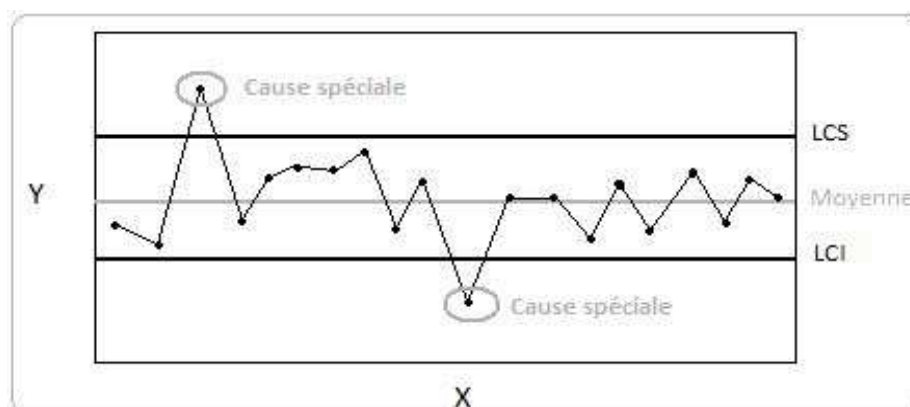
En 1931, **W.SHEWHART** proposa une approche permettant de répondre à ces questions, en dissociant les causes de dispersion en deux catégories :

- Les dispersions dues aux causes communes ;
- Les dispersions dues aux causes spéciales.

Cette dichotomie entre les causes de dispersion est une des bases fondamentales de la méthode MSP « Maîtrise statistique des procédés ». Il convient donc de les expliciter davantage.

Les causes communes : ce sont les nombreuses sources de variations difficilement maîtrisables qui sont toujours présentes à des degrés divers dans différents procédés. Ces causes étant toujours présentes et, de plus, en grand nombre, il faudra « vivre avec ». L'ensemble de ces causes communes forme la variabilité intrinsèque du procédé. Cette variabilité suit généralement une loi de Gauss. L'exemple parfait est le salarié qui est interrompu par un coup de fil ou de l'opérateur qui met plus ou moins de temps pour effectuer une opération manuelle en absence de justification évidente.

Figure 4.5.5 – Causes communes et causes spéciales



Les causes spéciales : ce sont les causes de dispersion identifiables, souvent irrégulières et instables, et par conséquent difficiles à prévoir. L'apparition d'une cause spéciale nécessite une intervention sur le procédé. Contrairement aux causes communes, les causes spéciales sont en général peu nombreuses. L'exemple classique est celui de l'usure d'un outil de coupe entraîne la production de pièces défectueuses ou l'arrêt de la machine.

2.2 Le principe d'une carte de contrôle

La démarche vise donc à identifier la dispersion due aux causes communes afin de détecter les limites de variations admissibles.

Figure 4.5.6 – Calcul de l'étendue glissante

N°	Y	R	N°	Y	R	N°	Y	R	N°	Y	R
1	0,77		11	1,47	1,36	21	2,29	1,08	31	2,53	0,64
2	-1,13	1,9	12	-1,2	2,67	22	1,71	0,58	32	1,72	0,81
3	1,02	2,15	13	1,38	2,58	23	2,23	0,52	33	1,25	0,47
4	-0,14	1,16	14	1,27	0,11	24	3,15	0,92	34	3	1,75
5	2,13	2,27	15	1,61	0,34	25	1,44	1,71	35	2,66	0,34
6	-0,25	2,38	16	0,83	0,78	26	2,08	0,64	36	3,31	0,65
7	-0,99	0,74	17	2,24	1,41	27	1,62	0,46	37	1,85	1,46
8	0,47	1,46	18	0,74	1,5	28	2,21	0,59	38	2,19	0,34
9	-0,82	1,29	19	-0,7	1,44	29	2,78	0,57	39	3,03	0,84
10	0,11	0,93	20	1,21	1,91	30	3,17	0,39	40	3,02	0,01

Dans l'exemple de la figure 4.5.4, on peut faire l'hypothèse que les variations d'une unité à l'autre sont la manifestation des causes communes ; la dérive que l'on constate représente une cause spéciale.

Pour identifier l'écart type des causes communes, nous pouvons utiliser la méthode des étendues glissantes entre 2 valeurs consécutives.

$R = \text{valeur absolue } (X_i - X_{i-1})$

Exemple : $R_2 = \text{Abs } (-1,13 - 0,77) = 1,9$

On calcule la moyenne des étendues et on calcule l'écart type par la relation :

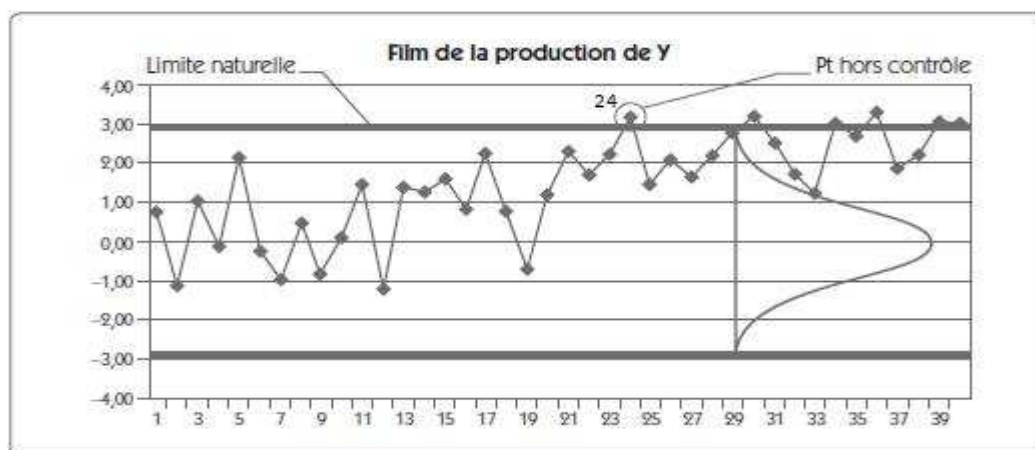
$$\sigma = \frac{\bar{R}}{1,128} = \frac{1,11}{1,128} = 0,98$$

Il est donc aisé de placer les limites des fluctuations naturelles du processus à **cible $\pm 3\sigma$** , soit $0 \pm 3 \times (0,98) = \pm 2,94$.

N.B :

La valeur de la cible (0) est la valeur sur la quelle on veut centrer la carte.

Figure 4.5.7 – Limites naturelles du processus



Ayant déterminé les limites naturelles du processus, il est facile de déterminer une règle claire d'intervention. Ainsi, dès le 24^e point, on est sortie des limites naturelles ; il y a une forte probabilité qu'il y ait la présence d'une cause spéciale. Il faut donc intervenir sur le procédé.

Ce principe relativement simple est à la base des cartes de contrôle. Dans cet exemple on a surveillé la position du procédé mais, pour mettre sous contrôle un procédé, il faudra surveiller également sa dispersion. Ainsi, il faudra en général suivre deux cartes :

- Une pour garantir l'absence de cause spéciale sur la position ;
- L'autre pour garantir la stabilité de la dispersion naturelle du procédé.

Dans ce chapitre, on va s'intéresser aux cartes de contrôle les plus souvent rencontrés.

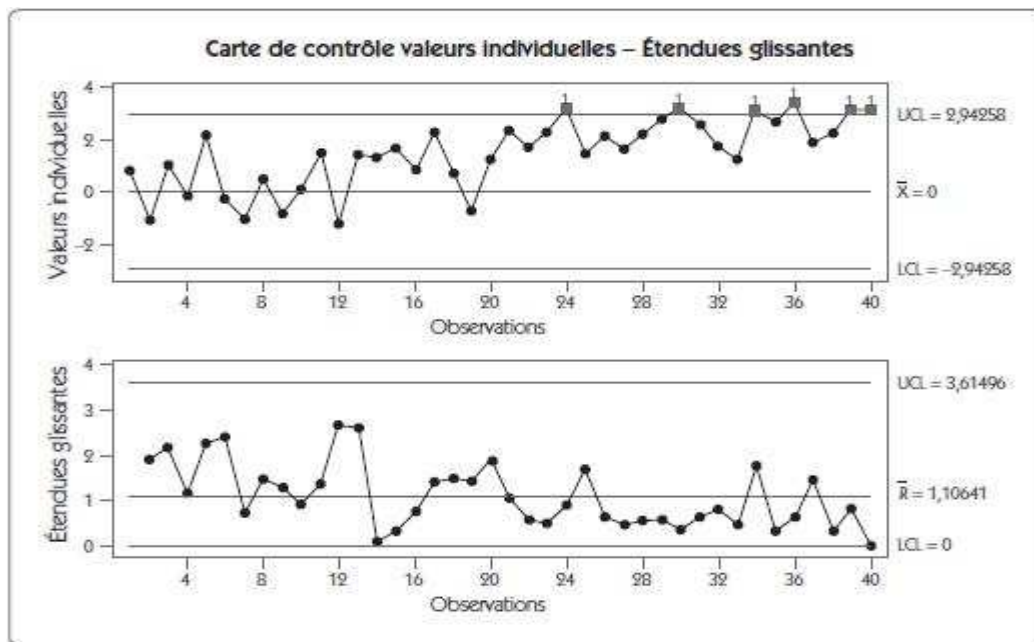
3. Cartes de contrôle

3.1 Carte aux valeurs individuelles/étendues glissantes

La carte aux valeurs individuelles/étendues glissantes permet de représenter sur un graphique l'ensemble des mesures réalisées. On utilise cette carte principalement dans deux situations :

- Le suivi de processus en petites séries, pour lesquels on a peu de données et où la notion de lot n'a pas de sens ;
- Le suivi de caractéristiques process telles que la température, la pression.

Figure 4.5.8- Cartes aux valeurs individuelles/étendues glissantes



Elle est constituée de deux graphiques : les valeurs mesurées et les étendues glissantes calculées sur deux (ou plus) valeurs consécutives. L'exemple de cette figure reprend les données du tableau présenté en figure 4.5.6. Elle montre que le processus subit une dérive sur la position avec de nombreux points hors contrôle sur la carte des valeurs individuelles. En revanche, la dispersion est sous contrôle avec une carte des étendues qui ne possède pas de point hors contrôle.

Pour les valeurs individuelles, les limites sont fixées à « Cible $\pm 3\sigma$ ». Voici les formules que l'on utilise pour calculer les limites :

$$\begin{aligned} LIC_X &= Cible - 3\sigma = Cible - 3(\bar{R}/d_2) = Cible - A_4 \times \bar{R} \\ LSC_X &= Cible + 3\sigma = Cible + 3(\bar{R}/d_2) = Cible + A_4 \times \bar{R} \end{aligned}$$

Pour les étendues, les limites sont fixées à « $\bar{R} \pm 3\sigma_R$ ». Ce qui, après simplification, donne les équations :

$$\begin{aligned} LIC_R &= D_3 \times \bar{R} \\ LSC_R &= D_4 \times \bar{R} \end{aligned}$$

Figure 4.5.9 –Tableau des coefficients : carte valeurs individuelles/étendues

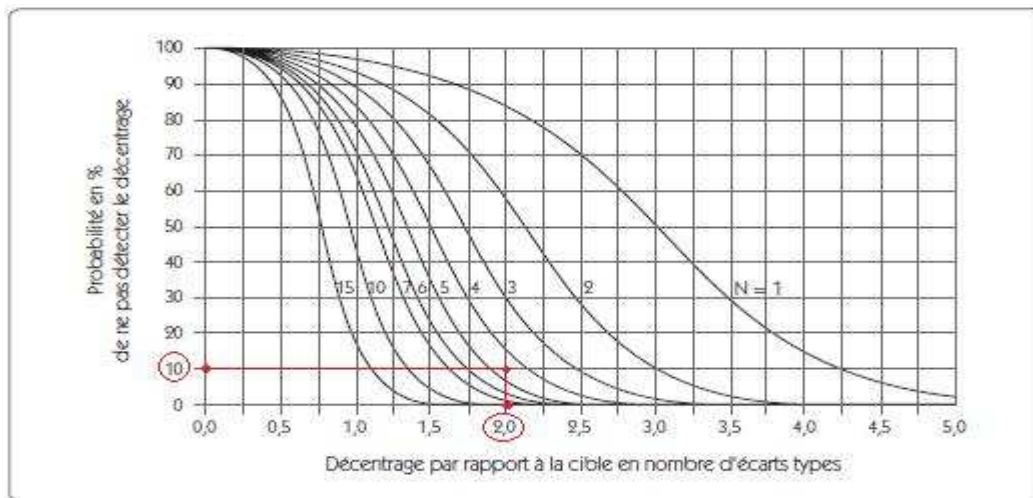
n	2	3	4	5
A ₄	2,660	1,772	1,457	1,290
D ₃	-	-	-	-
D ₄	3,267	2,574	2,282	2,114

Les coefficients sont choisis en fonction de la taille retenue du sous-groupe pour calculer l'étendue glissante. Dans notre exemple, nous avons choisi n=2. La cible est soit la valeur sur laquelle on veut se centrer dans le cas de processus réglables, soit la moyenne historique du processus sur laquelle on souhaite rester centré.

3.2 Carte de contrôle moyennes/étendues

La carte de contrôle moyennes/étendues est celle que l'on rencontre le plus souvent. Plutôt que de représenter les valeurs individuelles, on va représenter sur la carte de position la moyenne d'un échantillon de plusieurs unités réalisées consécutivement, sans intervention, et représentatif de la dispersion court terme. L'étendue est calculée sur les n valeurs de l'échantillon. La taille n sera déterminante quant à l'efficacité de la carte à détecter un décentrage.

Figure 4.5.10 – Courbe d'efficacité des cartes de contrôle



La courbe présentée ci-après, donne la courbe de l'efficacité du contrôle en fonction de la taille de l'échantillon. En abscisse, on trouve le décentrage en nombre d'écarts types, et en ordonnée la probabilité de ne pas détecter ce décentrage.

Exemple d'utilisation :

Une production a un écart type historique de 2. On veut détecter dans 90 % des cas un décentrage de 4 (2 écarts types).

Quelle taille de l'échantillon faut-il choisir ?

Sur la courbe de la figure 4.5.10, on prend la première courbe qui passe sous le point d'abscisse 2 et d'ordonnée 10 qui est la courbe $n=5$.

On note sur ce graphique tout l'intérêt qu'il y a à travailler avec une carte de contrôle plutôt que de procéder de façon traditionnelle en raisonnant sur la dernière pièce. Le raisonnement traditionnel a pour point d'efficacité la courbe $n=1$. Dès que le raisonnement a lieu sur deux pièces plutôt que sur une pièce, la courbe d'efficacité s'incline de façon importante.

Calcul des limites de contrôle

Les limites de contrôle sont fixées à $\pm 3\sigma$ de la préparation des moyennes et des étendues. Elles se calculent en utilisant les formules suivantes :

- Pour la carte de moyennes
 - Limite de contrôle supérieure: $LSC_{\bar{X}} = Cible + A_2 \times \bar{R}$
 - Limite de contrôle inférieure: $LIC_{\bar{X}} = Cible - A_2 \times \bar{R}$
- Pour la carte des étendues
 - Limite de contrôle supérieure: $LSC_R = D_4 \times \bar{R}$
 - Limite de contrôle inférieure: $LIC_R = D_3 \times \bar{R}$

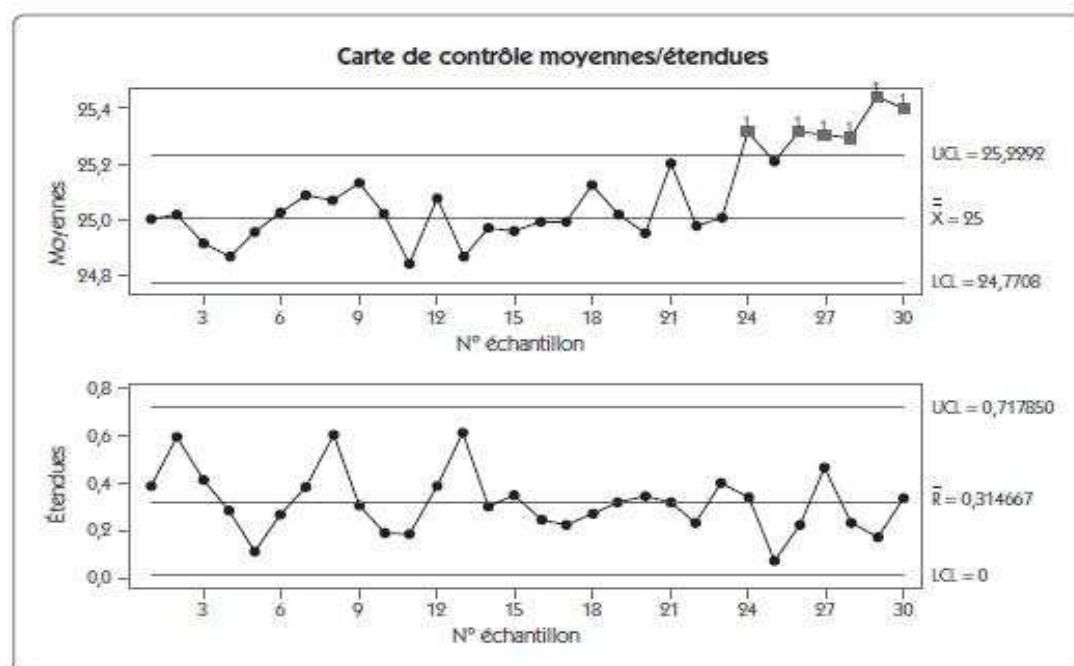
La valeur cible est la valeur sur laquelle il faut se centrer. Elle est souvent fixée sur le milieu de l'intervalle de tolérance. Pour les procédés qui ne peuvent être centrés sur la cible idéale, on fixe la cible sur la moyenne des moyennes ($\bar{\bar{X}}$) de la carte d'observation. Les coefficients A_2 , D_3 , D_4 , sont fonction de la taille des échantillons.

Figure 4.5.11 – Tableau des coefficients : cartes moyennes/étendues

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A_2	1,88	1,02	0,73	0,58	0,48	0,42	0,37	0,34	0,31
D_3	–	–	–	–	–	0,07	0,14	0,18	0,22
D_4	3,27	2,57	2,28	2,11	2,00	1,92	1,86	1,82	1,78

Figure 4.5.12 – Carte moyennes - Etendues

N°	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Y1	24,82	25,33	25,00	24,73	25,33	25,17	25,22	25,50	25,31	25,42	25,35
Y2	24,77	25,22	25,07	25,12	25,15	25,18	25,43	25,04	25,20	25,37	25,39
Y3	25,11	25,20	25,00	25,07	25,49	25,24	25,38	25,38	25,22	25,40	25,58
Y4	25,10	25,02	24,84	25,09	25,25	25,23	25,21	25,28	25,43	25,54	25,25
Moyennes	24,95	25,19	24,98	25,00	25,31	25,21	25,31	25,30	25,29	25,43	25,39
Étendues	0,34	0,31	0,23	0,39	0,34	0,07	0,22	0,46	0,23	0,17	0,33



Exemple de calcul d'une carte de contrôle

Prenons le cas d'une caractéristique de valeur cible 25. Les échantillons prélevés sont des groupes de 4 pièces.

A l'issue de la phase d'observation du procédé, nous avons calculé la moyenne des étendues de chaque sous-groupe $\bar{R}=0,315$.

La cible est le milieu de l'intervalle de tolérance soit 25,00.

*Choix des coefficients :

Les groupes étant de 4 pièces, nous prenons les coefficients A_2 , D_3 , D_4 , dans la colonne 4 : $A_2 = 0,73$; $D_3 = 0$; $D_4 = 2,28$.

En appliquant les formules, nous trouvons :

Limite supérieure de contrôle des moyennes :

$$LSC_{\bar{X}} = 25,00 + 0,73 \times 0,315 = 25,23$$

Limite inférieure de contrôle des moyennes :

$$LIC_{\bar{X}} = 25,00 - 0,73 \times 0,315 = 24,77$$

Limite supérieure de contrôle des étendues :

$$LSC_R = 2,28 \times 0,315 = 0,718$$

Il n'y a pas de limite inférieure pour des groupes de 4 pièces.

3.3 Carte de contrôle moyennes et écarts types

Lorsque la taille des échantillons augmente ($n > 6$), l'étendue n'est plus vraiment pertinente. En effet, cette dernière est calculée à partir des deux valeurs extrêmes et ne prend pas en compte l'information contenue dans les valeurs intermédiaires. Il est alors préférable de remplacer la carte des étendues par la carte des écarts types S .

On dessine alors sur la carte l'estimateur S de l'écart type de l'échantillon

$$\sigma_{n-1} = S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

Calcul des limites de contrôle :

$$\text{Limite de contrôle supérieure: } LSC_S = B_4 \times \bar{S}$$

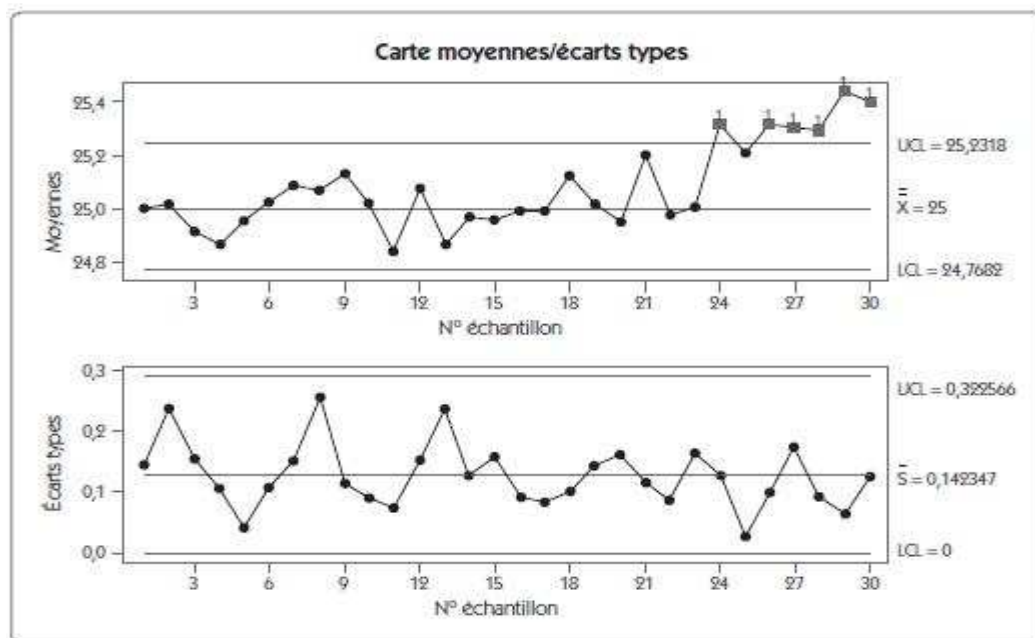
$$\text{Limite de contrôle inférieure: } LIC_S = B_3 \times \bar{S}$$

Figure 4.5.13 – tableau des coefficients : carte des écarts types

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B_3	–	–	–	–	0,030	0,118	0,185	0,239	0,284
B_4	3,267	2,568	2,266	2,089	1,970	1,882	1,815	1,761	1,716

L'exemple suivant (figure 4.5.14) montre le tracé d'une carte moyennes/écarts types à partir des données de l'exemple précédent (figure 4.5.12). On constate que, pour une taille d'échantillon faible, la carte des écarts types est semblable à la carte des étendues.

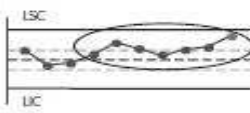
Figure 4.5.15 – Carte moyennes/écarts types



3.4 Interprétation des cartes de contrôle

Pour interpréter les cartes de contrôle, il faut appliquer les règles de pilotage (figure 4.5.16). Ces règles sont différentes pour les cartes de position et de dispersion. La première chose à faire est de valider la carte de dispersion. En effet, si la dispersion du procédé augmente, il faut arrêter tout de suite le processus, car la capacité court terme est en train de chuter. De plus, les limites de contrôle en position étant calculées à partir de l'étendue moyenne, elles ne sont plus valables. En revanche, on résoudra souvent une variation sur la carte en position par un simple réglage.

Figure 4.5.16 – Les règles de pilotage des carte de contrôle

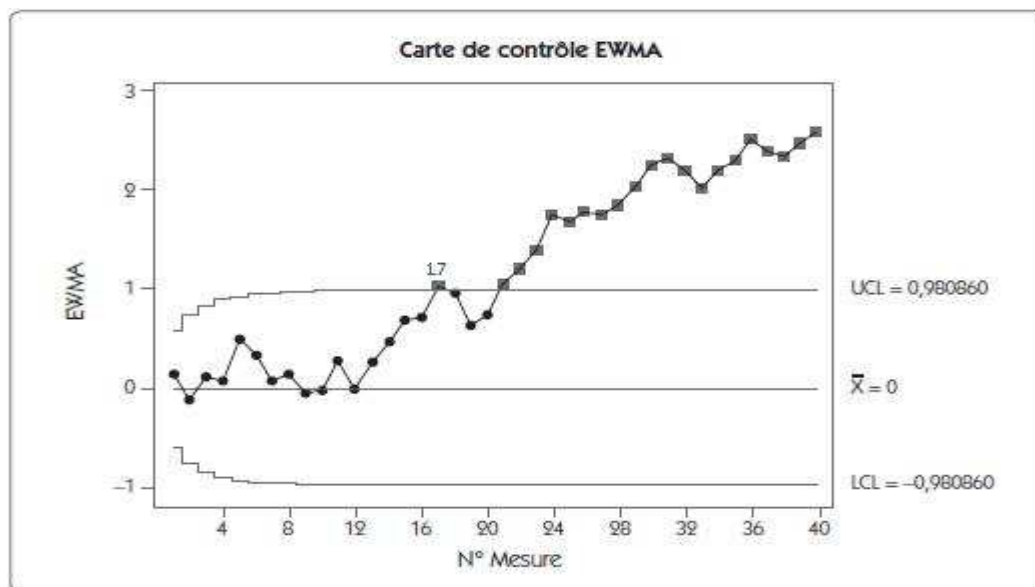
Graphique	Description	Décision carte position	Décision carte dispersion
	Procédé sous contrôle - Les courbes $\bar{X}$ et R oscillent de chaque côté de la moyenne. 2/3 des points sont dans le tiers central de la carte.	Production	Production
	Point hors limites Le dernier point tracé a franchi une limite de contrôle.	Régler le procédé de la valeur de l'écart qui sépare le point de la valeur cible.	Cas limite supérieure - La capacité court terme se détériore. Il faut trouver l'origine de cette détérioration et intervenir. - Il y a une erreur de mesure. Cas limite inférieure - La capacité court terme s'améliore. - Le système de mesure est bloqué.
	Tendance supérieure ou inférieure 7 points consécutifs sont supérieurs ou inférieurs à la moyenne.	Régler le procédé de l'écart moyen qui sépare la tendance à la valeur cible.	Cas tendance supérieure - La capacité court terme se détériore. Il faut trouver l'origine de cette détérioration et intervenir. Cas tendance inférieure - La capacité court terme s'améliore. Il faut trouver l'origine de cette amélioration pour la maintenir.
	Tendance croissante ou décroissante 7 points consécutifs sont en augmentation régulière ou en diminution régulière.	Régler le procédé si le dernier point approche les limites de contrôle de l'écart qui sépare le dernier point à la valeur cible.	Cas série croissante - La capacité court terme se détériore. Il faut trouver l'origine de cette détérioration et intervenir. Cas série décroissante - La capacité court terme s'améliore. Il faut trouver l'origine de cette amélioration pour la maintenir.
	1 point proche des limites Le dernier point tracé se situe dans le cadre 1/6, au bord de la carte de contrôle.	Confirmer 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 la valeur moyenne des deux points.	Cas limite supérieure Surveiller la capacité 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.
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.			

3.5 Carte EWMA (Exponentially Weighted Moving Average)

La carte EWMA permet de détecter des petites dérives plus rapidement que ce n'est possible avec la carte de Shewhart. Le calcul EWMA réalise un filtre des variations aléatoires en faisant la moyenne pondérée des dernières valeurs en donnant un poids plus important aux valeurs récentes.

En observant la carte EWMA (figure 4.5.17) réalisée à partir des données du paragraphe 2, on constate que, dès la 17^e valeur, on détectait une dérive du processus. Cette dérive n'était détectée qu'à partir de la 24^e valeur avec la carte de Shewhart. La carte EWMA montre également que la dérive du processus se poursuit jusqu'à la 40^e valeur alors qu'on pouvait avoir l'impression que l'écart s'était stabilisé avec la carte de Shewhart.

Figure 4.5.17 – Carte de contrôle EWMA



Dans la carte EWMA, pour chaque point, on va tenir compte de l'historique des valeurs mesurées. Pour chaque échantillon, on calcule une moyenne pondérée par un coefficient λ , telle que :

$$M_i = \lambda x_i + (1 - \lambda)M_{i-1}$$

C'est cette valeur M_i qui apparaît sur la carte EWMA, avec :

- $\lambda \leq 1$ une constante (on prend souvent $\lambda = 0,2$)
- M_0 , valeur initiale = cible

N°	1	2	3	4	5	6
Y	0,77	-1,13	1,02	-0,14	2,13	...
M	0,1543	-0,102	0,1226	0,0695	0,4822	...

Par exemple ($M_0 = 0$; $\lambda = 0,2$)

- Pour le point 1 : $M_1 = 0,2 \times 0,77 + (1 - 0,2) M_0 = 0,1543$
- Pour le point 2 : $M_2 = 0,2 \times (-1,33) + (1 - 0,2) M_1 = -0,102$
- ...

On détectera la présence d'une cause spéciale lorsque M_i franchira une limite supérieure ou inférieure de contrôle.

Calcul des limites d'une carte EWMA

Les limites sont calculées à ± 3 écarts types de la valeur M_i . On utilisant les relations suivantes :

$$LSC_{M_i} = Cible + 3\sigma \sqrt{\frac{\lambda[1 - (1 - \lambda)^{2i}]}{n(2 - \lambda)}}$$

$$LIC_{M_i} = Cible - 3\sigma \sqrt{\frac{\lambda[1 - (1 - \lambda)^{2i}]}{n(2 - \lambda)}}$$

Avec :

- i : le numéro de l'échantillon
- σ : l'écart type de la population
- n : la taille de l'échantillon
- λ : le coefficient de pondération
- Cible : la valeur sur laquelle on veut centrer la carte

Les limites dépendent donc du numéro d'échantillon, mais elles convergent très vite vers une droite comme le montre le graphique de la figure 4.5.17. Lorsque i augmente, le terme $[1 - (1 - \lambda)^{2i}]$ tend vers 1, les limites deviennent donc :

$$\begin{aligned} LSC_{M_i} &= Cible + 3\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{n(2-\lambda)}} \\ LIC_{M_i} &= Cible - 3\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{n(2-\lambda)}} \end{aligned}$$

Ces limites sont deux droites qui dépendent du coefficient λ , de la taille des échantillons n et bien sûr de l'écart type σ .

Exemple de calcul des limites de contrôle

Dans le cas de l'exemple de la figure 4.5.17, il s'agit de valeurs individuelles ; la taille de l'échantillon est donc $n = 1$. On prend $\lambda = 0,2$ et $Cible = 0$.

On estime l'écart type à partir de la loi des étendues réduites :

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{1,128} = \frac{1,11}{1,128} = 0,98$$

$$LSC_{M_i} = Cible + 3\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{n(2-\lambda)}} = 0 + 3 \times 0,98 \sqrt{\frac{0,2}{(2-0,2)}} = 0,98$$

$$LIC_{M_i} = Cible - 3\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{n(2-\lambda)}} = 0 - 3 \times 0,98 \sqrt{\frac{0,2}{(2-0,2)}} = -0,98$$

Interprétation des cartes EWMA

Les règles d'interprétation des cartes EWMA ne sont pas les mêmes que celles des cartes de contrôle de SHEWHART. Ainsi, les règles des tendances à partir des 7 points ne s'appliquent pas. Seul le franchissement des limites déclenche un signal de dérive du processus.

En cas de réglage, la valeur M_i apparaît comme une estimation de la valeur moyenne du processus ; il convient donc de régler le processus de l'écart entre la valeur M_i et la cible.

Enfin, si la carte EWMA est très performante pour détecter des dérives lentes, elle l'est en revanche moins que la carte de SHEWHART pour détecter des dérives rapides. L'idéal consiste donc à utiliser l'ensemble des trois cartes : EWMA, moyenne (ou valeurs individuelles), étendues.

Etape 6 - Standardiser/pérenniser

Dans cette sixième et dernière étape, l'objectif prioritaire sera de mettre en place tous les moyens permettant de garantir la pérennité des progrès accomplis et la démultiplication des solutions apportées, lorsque cela est possible.

Cette étape permettra la standardisation du projet, aussi de clore le projet dans les délais les plus serrés possible. Il n'est pas bon qu'un projet traîne en longueur. La clôture du projet sera l'occasion de faire le bilan des améliorations apportées et des gains induits. Elle permettra également de faire le point sur les difficultés rencontrées afin d'enrichir la démarche Six Sigma dans l'entreprise et de communiquer sur les résultats obtenus.

1. Les principes de base de la pérennisation d'une action

1.1 Principe n°1 – L'état organique

Un des principes importants de cette étape, c'est le principe de « l'état organique ». Si la mise en application d'un progrès demande un effort particulier de la part du personnel, il y a fort à parier que l'on ne saura pas maintenir cet effort dans le temps lorsque la pression sur le sujet diminuera. Si l'on veut que la solution soit pérenne sans avoir besoin de maintenir une pression permanente, il faut atteindre l'état organique

L'état organique est défini comme l'état du processus vers lequel il retournera naturellement. Dans la nature, un pré qui n'est plus entretenu retournera naturellement à l'état de bois. En revanche, un bois non entretenu aura certes un rendement plus faible, mais sa situation n'évoluera pas fondamentalement.

Pour un processus, plus la solution choisie sera proche de l'état organique et moins les efforts nécessaires pour le maintenir seront importants. Lorsqu'on atteint cet état, la mise en œuvre de la solution se fait naturellement sans effort ni contrainte.

La notion d'effort et de contrainte doit être détaillée, car il ne s'agit pas de ne rien faire. Par exemple, si on demande à un opérateur de faire un suivi d'une caractéristique sur carte de contrôle alors que la culture de l'entreprise consiste à ne jamais demander aux opérateurs de prendre un stylo, il est absolument indispensable de prévoir les formations et les suivis nécessaires. Dans le cas d'entreprises qui ont déjà intégré la culture du suivi de production sur feuille de relevés par les opérateurs, l'action passera sans la moindre contrainte si la formation est correctement réalisée. Cette notion d' « état organique » est donc intimement liée à la culture de l'entreprise et la pérennité d'une même action peut être assurée d'une manière très différente dans deux entreprises aux cultures opposées. Atteindre l'état organique consiste à :

- Simplifier les procédures mises en place afin qu'elles soient appliquées naturellement ;
- Standardiser les procédures afin qu'elles soient naturellement intégrées dans la culture de l'entreprise ;
- Organiser des formations pour garantir que la rotation du personnel ne remette pas en cause les progrès réalisés ;
- Démultiplier les bonnes pratiques sur d'autres processus ;
- Intégrer les méthodes et processus standards dans le développement de nouveaux produits.

1.2 Principe n°2 – La contrepartie

La recherche d'un état organique élevé doit être une priorité car, dans cet état, le maintien de l'action ne demande pas d'effort. La question qui se pose : Pourquoi chaque individu a-t-il intérêt à maintenir ses efforts pendant de nombreuses années ? Parce qu'il y trouve un intérêt, une « contrepartie ». Dans le cas contraire, il veut bien faire plaisir au chef de projet pendant un certain temps, mais très vite, dès que la pression sur le sujet retombe, il cessera peu à peu de faire des efforts.

Si l'on veut appliquer ce principe, il faut savoir reconnaître les efforts que l'on demande aux acteurs du processus et évaluer les contreparties qu'ils reçoivent en échange. Si l'on reprend l'exemple d'une action dont la pérennité dépend de la bonne application d'une carte de contrôle, on doit se poser la question d'intérêt qu'aura l'opérateur à suivre cette carte et à modifier sa façon de piloter le processus.

1.3 Principe n°3 – La facilitation

Le troisième et dernier axe fait quant à lui référence à ce qui permet d'alléger l'effort supplémentaire qu'une pérennisation amène à fournir. Qu'est-ce qui permet de soulager l'effort ou comment faire en sorte que cet effort lui paraisse plus surmontable ?

Pour y parvenir, plusieurs types d'actions contribuant à « faciliter » l'effort à produire sont possibles.

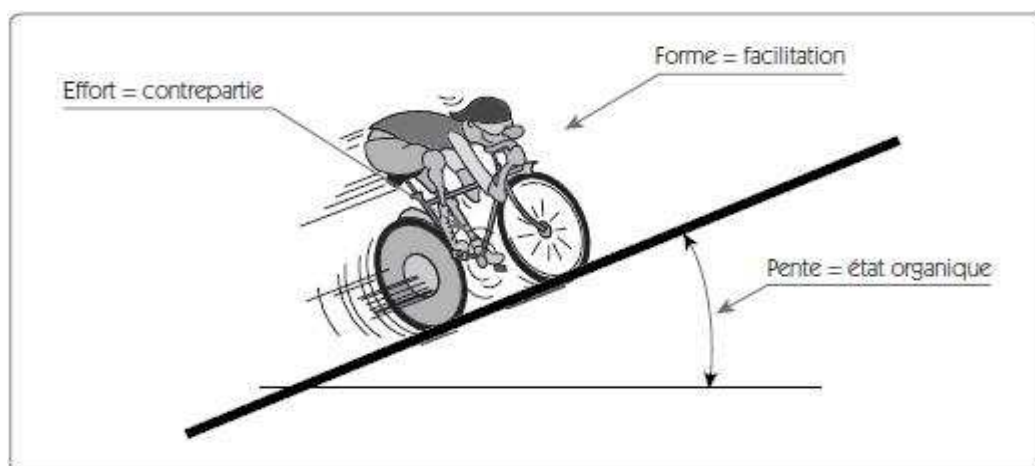
Celles-ci peuvent se structurer en trois grandes directions :

- Développer l'habileté technique des acteurs du système : Le même effort n'apparaîtra pas aussi important pour l'ensemble des collaborateurs

selon la qualification et l'habilité technique. Plus on a l'habitude de réaliser une tâche, et moins sa réalisation demandera de réflexion, d'analyse. Elle apparaîtra plus facile, et donc le niveau d'effort à fournir sans contre partie sera important.

- Développer le phénomène de groupe : Si tout le monde accepte de réaliser la tâche, la perception de la tâche apparaît moins fastidieuse. Si on prend l'exemple du rangement et de propreté, il est plus facile de maintenir un lieu propre et rangé si tout le monde participe au rangement que si cette action est isolée dans l'entreprise.
- Simplifier les tâches : Réaliser une tâche compliquée demande un effort. Si on simplifie cette tâche, par exemple en recourant à des outils informatiques, méthodologiques, mécaniques, etc., l'opérateur acceptera plus facilement de la réaliser de façon pérenne.

Figure 4.6.1 – Les trois principes de pérennisation



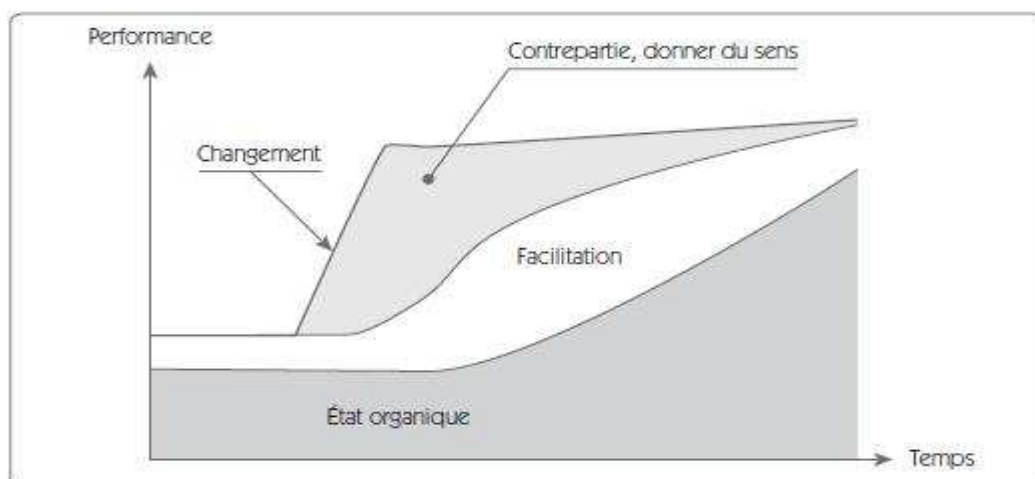
Pour illustrer les trois principes de base de la pérennisation des actions, nous allons nous appuyer sur l'illustration d'un cycliste qui doit rouler, le plus facilement possible. L'avancement du cycliste représentera le maintien de l'action.

- La pente à monter représente ce que nous appelons l'état organique qui définit l'effort nécessaire à fournir pour avancer. Cet état dépend de ce qu'on demande de faire, mais aussi de la culture de l'entreprise et de son historique.
- Si le cycliste accepte de fournir un effort, c'est qu'il a une contrepartie. Cela peut être le besoin de se déplacer, ou le plaisir de faire du sport.
- Enfin, selon la forme et l'entraînement de notre cycliste, la même pente n'apparaîtra pas avec un niveau de difficulté équivalent. C'est la facilitation. De même, rouler en peloton permettra à notre cycliste de monter plus facilement et avec plus de plaisir.

2. Le changement vers la pérennisation

La figure suivante illustre le passage vers un état organique pérenne.

Figure 4.6.2 – L'évolution vers l'état organique



Dans un premier temps, le changement réussi apporte des gains significatifs sur la performance, mais l'état organique n'a pas encore évolué. Ces gains résultant directement des efforts réalisés par les acteurs du changement, des contreparties doivent être rapidement mises en place.

Si on s'arrête là, très vite les contreparties se révéleront insuffisantes et le système retournera vers son état organique initial. Il s'agit donc que les actions de facilitation prennent rapidement le relais pour maintenir l'acquis, ces facilitations pouvant prendre la forme de formations, d'actions simplificatrices, ou de développement d'habilités techniques.

Dans le même temps, il s'agit également d'identifier et d'affirmer les nouvelles valeurs de l'entreprise qui permettront de faire évoluer l'état organique.

Au terme de cette transformation de l'état organique, une action pérenne ne doit plus exiger de contreparties. Les facilitations mises en place doivent faire partie de la culture de l'entreprise et l'état organique doit assurer à lui tout seul cette pérennisation.

3. L'audit de pérennité

3.1 Objectif de l'audit

L'audit de processus a pour objectif de s'assurer que les *CTQ (Critical To Quality)* sont bien mesurées et suivies, qu'un minimum de formalisation existe et qu'on applique bien les procédures décidées. On doit vérifier :

- que les nouvelles méthodes, les procédures, sont suffisamment documentées pour pouvoir faire l'objet d'un audit par une personne étrangère au projet Six Sigma ;

- que les modifications décidées sur le processus sont effectivement en place ;
- que les procédures définies sont effectivement appliquées ;
- s'il existe des difficultés à faire fonctionner au quotidien les nouveaux processus ;
- que les capacités atteintes à la fin de l'étape « Contrôler » sont maintenues.

Le questionnaire d'audit (figure 4.6.3) permet de détecter s'il y a des risques quant à la pérennité de l'action ou si elle va nécessiter un suivi constant. Il reprend les principales causes de dégradation dans l'application des actions. Lorsqu'au moins une alerte est active, on considère qu'il y a un risque, et on doit mettre en place une action garantissant la pérennité.

3.2 Grille d'audit

Pour valider l'application des points qui ont été décidés, on utilise un questionnaire d'audit semblable à celui qui est donné en exemple ci-après. On applique la méthode IEMSE pour procéder à l'évaluation.

Figure 4.6.3 – Grille d’audit

Audit d’un processus Six Sigma						
Points d’audit		I	E	M	S	E
Mesure	Les caractéristiques critiques pour le client (CTQ) font l’objet d’une mesure.					
	Les moyens de contrôle présents sur le poste sont à jour du point de vue vérification.					
	Les fréquences de contrôles sont respectées.					
	Les CTQ sont suivis dans le temps.					
	Les capacités mesurées sont conformes avec l’objectif du projet Six Sigma.					
Processus	Les procédures, méthodes à appliquer, ont été documentées.					
	Les modifications décidées dans le projet Six Sigma sont effectivement en place.					
	Les procédures, méthodes appliquées, sont conformes à ce qui a été défini.					
	Les compétences et les formations nécessaires ont été définies et sont en accord avec les faits.					

- **I (Inexistence)** : ce point n’est pas traité sur le poste audité.
- **E (Existence)** : il existe une réponse montrant que le poste a pris en compte le point.
- **M (Méthode)** : la réponse à la question est traitée selon une méthode susceptible d’être généralisée.
- **S (Systématique)** : la réponse est traitée avec méthode, et l’application sur le terrain est effective et systématique (pérennité dans le temps).
- **E (Exemplarité)** : la méthode, son application et ses résultats méritent d’être communiqués à l’extérieur parce qu’efficaces, efficaces, simples...

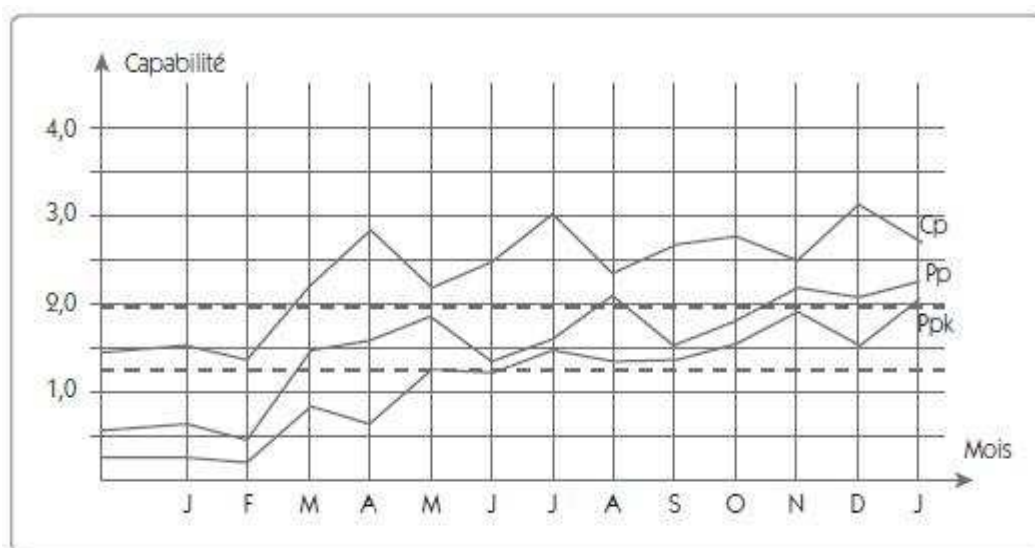
- **4. Mettre en place le cliquet anti-retour**

De nombreuses actions ont été menées dans l'étape « Standardiser » pour pérenniser la solution adoptée. Toutefois, sans mesure, il n'est pas possible de garantir le maintien dans le temps du niveau de performance.

C'est pour cela que l'on doit mettre en place un tableau de bord formé d'indicateurs de performance : Cp, Pp et Ppk. Ces trois indicateurs permettent de connaître les performances du processus (Voir étape 2 – Mesurer).

L'efficacité du processus est étroitement dépendante du niveau atteint sur le CTQ ou sur toutes les caractéristiques élémentaires dont on a montré qu'elles avaient un lien avec le CTQ. Les indicateurs de performance doivent faire apparaître l'évolution de toutes ces caractéristiques par rapport aux cibles et aux spécifications qui ont été fixées dans le cadre du projet Six Sigma.

Figure 4.6.4 – Suivi des capacités



Un suivi graphique de ces trois indicateurs permet de s'assurer du maintien de la performance et de la réaction rapide en cas de perte de capacité. On fait apparaître sur ce graphique les deux limites :

- Le niveau limite de **2.0** pour le Cp qui correspond à l'objectif 6 σ sur la dispersion court terme.
- Le niveau limite de **1.33** qui est souvent admis pour l'indicateur de capacité long terme Ppk.

5. Communiquer

C'est le dernier coup de rein à donner, mais il est important.

5.1 Préparer un bilan du projet

Le bilan du projet doit être le plus complet possible ; il doit comporter les volets technique, financier, humain et méthodologique.

Bilan technique

- synthèse des améliorations techniques apportées ;
- modification de procédures, de méthodes ;
- amélioration des capacités...

Bilan financier

- synthèse des coûts mesurables et non mesurables ;
- synthèse des gains mesurables et non mesurables.

Bilan humain

- fonctionnement du groupe de travail ;
- identification des manques en matière de formation, de compétences...

Bilan méthodologique

- si c'était à refaire, adopterions-nous la même démarche ?
- qu'avons-nous oublié de faire qu'il ne faudra plus oublier ?
- en quoi ce projet peut-il enrichir la démarche Six Sigma dans notre société ?

5.2 Présenter le bilan

Les *Black Belts* tirent certainement leurs connaissances de leurs propres expériences de conduite de projets, mais ils peuvent également profiter de celles de leurs collègues BB en partageant le bilan d'un projet qui vient de se terminer.

Mais cette présentation doit également intéresser un plus large public, notamment les *Champions* qui trouveront sans doute dans ce type d'exposé des idées pour de nouveaux chantiers Six Sigma.

Enfin, tout en conservant une nécessaire confidentialité, il ne faut pas hésiter à sortir de l'entreprise pour présenter ces bilans devant la communauté scientifique. L'élévation de niveau qui en résulte profite à tout le monde.

Conclusion

La méthodologie Six Sigma est devenue très populaire dans le monde entier.

Elle est considérée comme étant une approche systématique, scientifique et statistique, c'est cette globalité qui permet à Six Sigma de donner à l'entreprise la possibilité de réaliser des percées.

Six Sigma a tout d'abord consisté en l'application des concepts de l'MSP et s'est ensuite largement étoffée en intégrant tous les aspects de la maîtrise de la variabilité. Au fur et à mesure de sa diffusion dans les autres entreprises, Six Sigma s'est également structuré en associant davantage à sa démarche les éléments managériaux et stratégiques. C'est aujourd'hui une approche globale de l'amélioration de la satisfaction des clients.

Au cours de la dernière décennie, le rythme et la vitesse du changement a été sans précédent. Plus particulièrement, le pouvoir s'est déplacé du producteur au consommateur.

Se fondant sur cette meilleure satisfaction du client « Objectif primordial », la démarche Six Sigma est sans doute, source d'accroissement de la rentabilité économique, ce qui rend difficile pour une entreprise de l'ignorer.

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 différents chantiers.

RESUME

- Auteur : RAYADI Youssef
- Titre : SIX SIGMA outil de la performance industrielle
- Mots clés : Six Sigma (DMAICS), Processus, Analyse statistique

La période de crise aujourd'hui cristallise les besoins de changement nécessaires à la survie de toute entreprise. C'est le moment d'adopter Six sigma, approche « made in USA » qui a déjà fait ses preuves outre-Atlantique, et qui permet de décupler l'efficacité de toute organisation.

A l'origine outil de la qualité, conçu en vue d'améliorer les processus, la méthodologie Six sigma devient un véritable levier pour réaliser des percées.

Cette thèse propose une vision globale de la démarche Six Sigma (DMAICS) qui est structuré en six étapes:

- **Définir** : L'amélioration par percée demande un investissement important ; on doit être capable de justifier la rentabilité d'une telle étude.
- **Mesurer** : On cherchera à caractériser le problème par une mesure et par des relevés de données.
- **Analyser** : Rechercher la cause racine, faire apparaître les relations entre les entrées et les sorties du processus.
- **Améliorer** : Mettre en œuvre les actions d'amélioration et prouver que ces actions ont été efficaces.
- **Contrôler** : Formaliser le processus, et mettre sous contrôle la solution retenue.
- **Standardiser** : Pérenniser la solution, déployer les bonnes pratiques et clôture du projet.

Pour obtenir les niveaux de capacités exigés par Six Sigma, il est absolument nécessaire d'utiliser des outils et plus particulièrement des outils statistiques. Dans l'approche Six Sigma, tous les outils utilisés sont connus. C'est la structuration dans l'utilisation des différents outils qui est intéressante dans l'approche Six Sigma, qui fournit un guide méthodologique pour permettre au plus grand nombre de réduire la variabilité des processus avec moins de défauts.

SUMMARY

- Author : RAYADI Youssef
- Title : SIX SIGMA tool of industrial performance
- Keywords : Six Sigma (DMAICS), Process, Statistical Analysis

The Crisis now crystallized the need for changes necessary for the survival of any business. It's time to adopt Six Sigma approach "Made in USA" which has already proven itself across the Atlantic, and which can multiply the effectiveness of any organization. Originally a tool for quality, designed to improve the process. The methodology Six Sigma becomes a lever to achieve breakthroughs.

This thesis provides an overview of Six Sigma (DMAICS) which is divided into six steps:

- **Define:** The breakthroughs improvement requires a significant investment; we must be able to justify the cost of such a study.
- **Measure:** We seek to characterize the problem by measuring and data records.
- **Analyze:** Find the root cause, to show the relationships between inputs and outputs of the process
- **Improve:** Implement improvement actions and prove that these actions were effective.
- **Control:** Formalize the process, and bring under control the solution.
- **Standardize:** Sustaining the solution, deploy best practices and project closure.

To get levels of capabilities required by Six Sigma, it is absolutely necessary to use tools and especially statistical tools. In the Six sigma approach, the tools used are known. This is the structure in the use of different tools that is interesting in the Six Sigma approach, which provided a methodological guide to enable the greatest number of reducing process variability with fewer defects.

ملخص

- الكاتب: رياضي يوسف
- العنوان: سيغما ستة أداة الأداء الصناعي
- الكلمات الأساسية: سيغما ستة (دمايكس)، عملية، التحليل الإحصائي

الأزمة تُبلور الآن على الحاجة لإجراء التغييرات الضرورية لبقاء أي شركة. لقد حان الوقت لتبني نهج سيغما ستة "صنع في أميركا" الذي أثبت بالفعل نفسه عبر المحيط الأطلسي والذي يُمكن من مضاعفة فعالية أي منظمة. في الأصل أداة للجودة صممت من أجل تحسين العمليات. منهجية سيغما ستة أصبحت وسيلة للضغط من أجل تحقيق اختراقات.

- هذه الرسالة تقدم صورة عامة عن سيغما ستة (دمايكس) والتي تنقسم إلى ست خطوات:
- تعريف: القيام باختراقات يتطلب استثمارات كبيرة، يجب أن نكون قادرين على تبرير تكلفة هذه الدراسة.
- قياس: نسعى لتمييز هذه المشكلة من خلال سجلات وبيانات القياس.
- تحليل: البحث عن السبب الجذري، لإظهار العلاقة بين مدخلات ومخرجات هذه العملية.
- تحسين: تنفيذ إجراءات التحسين وإثبات أن هذه الإجراءات كانت فعالة.
- سيطرة: إضفاء الطابع الرسمي على العملية، وجعل الحل المعتمد تحت السيطرة.
- توحيد: المحافظة على الحل ونشر أفضل الممارسات وإغلاق المشروع.

للحصول على مستويات من القدرات المطلوبة من قبل سيغما ستة، فمن الضروري للغاية استخدام الأدوات وخصوصا الأدوات الإحصائية. في نهج ستة سيغما، جميع الأدوات المستخدمة معروفة. و المثير للاهتمام هو هيكل هذه الأدوات المستخدمة، التي قدمت دليلا منهجيا للحدّ من تقلبات العمليات مع عدد أقل من العيوب.

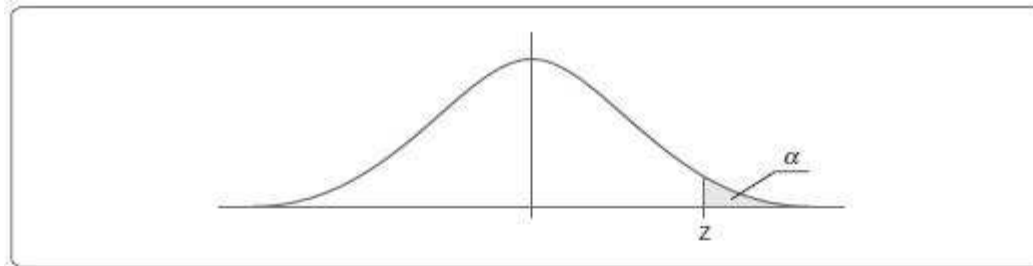
ANNEXE

5 Tables de statistique

T1 – Tableau des ppm en fonction du z du processus

z	ppm centré dans les tolérances	ppm avec un décalage de 1,5
1	317310,52	697672,15
1,2	230139,46	621378,38
1,4	161513,42	541693,78
1,6	109598,58	461139,78
1,8	71860,53	382572,13
2	45500,12	308770,21
2,2	27806,80	242071,41
2,4	16395,06	184108,21
2,6	9322,44	135686,77
2,8	5110,38	96809,10
3	2699,93	66810,63
3,2	1374,40	44566,73
3,4	673,96	28716,97
3,6	318,29	17864,53
3,8	144,74	10724,14
4	63,37	6209,70
4,2	26,71	3467,03
4,4	10,83	1865,88
4,6	4,23	967,67
4,8	1,59	483,48
5	0,57	232,67
5,2	0,20	107,83
5,4	0,07	48,12
5,6	0,02	20,67
5,8	0,01	8,55
6	0,00	3,40
6,2	0,00	1,30
6,4	0,00	0,48
6,6	0,00	0,17
6,8	0,00	0,06
7	0,00	0,02

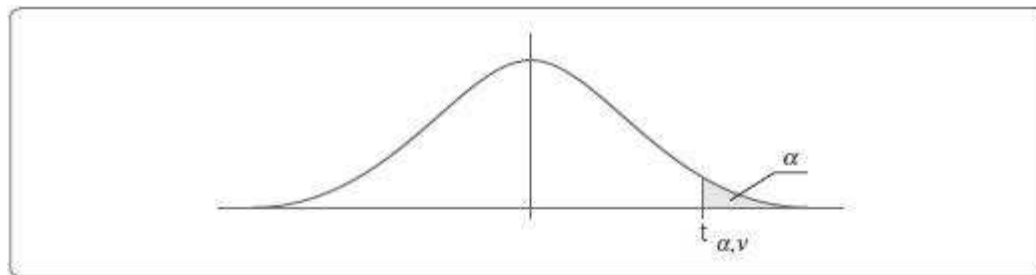
T2 – Table de la loi normale



z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,5000	0,4960	0,4920	0,4880	0,4840	0,4801	0,4761	0,4721	0,4681	0,4641
0,1	0,4602	0,4562	0,4522	0,4483	0,4443	0,4404	0,4364	0,4325	0,4286	0,4247
0,2	0,4207	0,4168	0,4129	0,4090	0,4052	0,4013	0,3974	0,3936	0,3897	0,3859
0,3	0,3821	0,3783	0,3745	0,3707	0,3669	0,3632	0,3594	0,3557	0,3520	0,3483
0,4	0,3446	0,3409	0,3372	0,3336	0,3300	0,3264	0,3228	0,3192	0,3156	0,3121
0,5	0,3085	0,3050	0,3015	0,2981	0,2946	0,2912	0,2877	0,2843	0,2810	0,1776
0,6	0,2743	0,2709	0,2676	0,2643	0,2611	0,2578	0,2546	0,2514	0,2483	0,2451
0,7	0,2420	0,2389	0,2358	0,2327	0,2296	0,2266	0,2236	0,2206	0,2177	0,2148
0,8	0,2119	0,2090	0,2061	0,2033	0,2005	0,1977	0,1949	0,1922	0,1894	0,1867
0,9	0,1841	0,1814	0,1788	0,1762	0,1736	0,1711	0,1685	0,1660	0,1635	0,1611
1,0	0,1587	0,1562	0,1539	0,1515	0,1492	0,1469	0,1446	0,1423	0,1401	0,1379
1,1	0,1357	0,1335	0,1314	0,1292	0,1271	0,1251	0,1230	0,1210	0,1190	0,1170
1,2	0,1151	0,1131	0,1112	0,1093	0,1075	0,1056	0,1038	0,1020	0,1003	0,0985
1,3	0,0968	0,0951	0,0934	0,0918	0,0901	0,0885	0,0869	0,0853	0,0838	0,0823
1,4	0,0808	0,0793	0,0778	0,0764	0,0749	0,0735	0,0721	0,0708	0,0694	0,0681
1,5	0,0668	0,0655	0,0643	0,0630	0,0618	0,0606	0,0594	0,0582	0,0571	0,0559
1,6	0,0548	0,0537	0,0526	0,0516	0,0505	0,0495	0,0485	0,0475	0,0465	0,0455
1,7	0,0446	0,0436	0,0427	0,0418	0,0409	0,0401	0,0392	0,0384	0,0375	0,0367
1,8	0,0359	0,0351	0,0344	0,0336	0,0329	0,0322	0,0314	0,0307	0,0301	0,0294

z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
1,9	0,0287	0,0281	0,0274	0,0268	0,0262	0,0256	0,0250	0,0244	0,0239	0,0233
2,0	0,0228	0,0222	0,0217	0,0212	0,0207	0,0202	0,0197	0,0192	0,0188	0,0183
2,1	0,0179	0,0174	0,0170	0,0166	0,0162	0,0158	0,0154	0,0150	0,0146	0,0143
2,2	0,0139	0,0136	0,0132	0,0129	0,0125	0,0122	0,0119	0,0116	0,0113	0,0110
2,3	0,0107	0,0104	0,0102	0,0099	0,00964	0,00939	0,00914	0,00889	0,00866	0,00842
2,4	0,00820	0,00798	0,00776	0,00755	0,00734	0,00714	0,00695	0,00676	0,00657	0,00639
2,5	0,00621	0,00604	0,00587	0,00570	0,00554	0,00539	0,00523	0,00508	0,00494	0,00480
2,6	0,00466	0,00453	0,00440	0,00427	0,00415	0,00402	0,00391	0,00379	0,00368	0,00357
2,7	0,00347	0,00336	0,00326	0,00317	0,00307	0,00298	0,00289	0,00280	0,00272	0,00264
2,8	0,00256	0,00248	0,00240	0,00233	0,00226	0,00219	0,00212	0,00205	0,00199	0,00193
2,9	0,00187	0,00181	0,00175	0,00169	0,00164	0,00159	0,00154	0,00149	0,00144	0,00139
3,0	0,00135	0,00131	0,00126	0,00122	0,00118	0,00114	0,00111	0,00107	0,00104	0,00100
3,1	0,00097	0,00094	0,00090	0,00087	0,00085	0,00082	0,00079	0,00076	0,00074	0,00071
3,2	0,00069	0,00066	0,00064	0,00062	0,00060	0,00058	0,00056	0,00054	0,00052	0,00050
3,3	0,00048	0,00047	0,00045	0,00043	0,00042	0,00040	0,00039	0,00038	0,00036	0,00035
3,4	0,00034	0,00033	0,00031	0,00030	0,00029	0,00028	0,00027	0,00026	0,00025	0,00024
3,5	0,00023	0,00022	0,00022	0,00021	0,00020	0,00019	0,00019	0,00018	0,00017	0,00017
3,6	0,00016	0,00015	0,00015	0,00014	0,00014	0,00013	0,00013	0,00012	0,00012	0,00011
3,7	0,00011	0,00010	0,00010	9,6 E-5	9,2 E-5	8,8 E-5	8,5 E-5	8,2 E-5	7,8 E-5	7,5 E-5
3,8	7,2 E-5	6,9 E-5	6,7 E-5	6,4 E-5	6,2 E-5	5,9 E-5	5,7 E-5	5,4 E-5	5,2 E-5	5,0 E-5
3,9	4,8 E-5	4,6 E-5	4,4 E-5	4,2 E-5	4,1 E-5	3,9 E-5	3,7 E-5	3,6 E-5	3,4 E-5	3,3 E-5
z	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
4	3,17 E-5	2,07 E-5	1,33 E-5	8,54 E-6	5,41 E-6	3,40 E-6	2,11 E-6	1,30 E-6	7,93 E-7	4,79 E-7
5	2,87 E-7	1,70 E-7	9,96 E-8	5,79 E-8	3,33 E-8	1,90 E-8	1,07 E-8	5,99 E-9	3,32 E-9	1,82 E-9
6	9,87 E-10	5,30 E-10	2,82 E-10	1,49 E-10	7,77 E-11	4,02 E-11	2,06 E-11	1,04 E-11	5,23 E-12	2,60 E-12

T3 – Table de Student



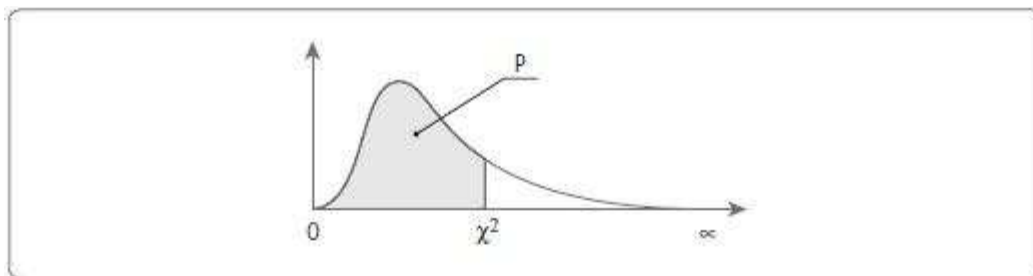
$\alpha \rightarrow$ $v \downarrow$	0,40	0,25	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0025	0,001	0,0005
1	0,325	1,000	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	127,32	318,31	636,62
2	0,289	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	14,089	23,326	31,598
3	0,277	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	7,453	10,213	12,924
4	0,271	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	5,598	7,173	8,610
5	0,267	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	4,773	5,893	6,869
6	0,265	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	4,317	5,208	5,959
7	0,263	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,019	4,785	5,408
8	0,262	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	3,833	4,501	5,041
9	0,261	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	3,690	4,297	4,781
10	0,260	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	3,581	4,144	4,587
11	0,260	0,697	1,373	1,796	2,201	2,718	3,106	3,497	4,025	4,437
12	0,259	0,695	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,428	3,930	4,318
13	0,259	0,694	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,372	3,852	4,221
14	0,258	0,692	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,326	3,787	4,140
15	0,258	0,691	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,286	3,733	4,073
16	0,258	0,690	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,252	3,686	4,015
17	0,257	0,689	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,222	3,646	3,965

$\alpha \rightarrow$ $\nu \downarrow$	0,40	0,25	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0025	0,001	0,0005
18	0,257	0,688	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,197	3,610	3,922
19	0,257	0,688	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,174	3,579	3,883
20	0,257	0,687	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,153	3,552	3,850
21	0,257	0,686	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,135	3,527	3,819
22	0,256	0,686	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,119	3,505	3,792
23	0,256	0,685	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,104	3,485	3,767
24	0,256	0,685	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,091	3,467	3,745
25	0,256	0,684	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,078	3,450	3,725
26	0,256	0,684	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,067	3,435	3,707
27	0,256	0,684	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,057	3,421	3,690
28	0,256	0,683	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,047	3,408	3,674
29	0,256	0,683	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,038	3,396	3,659
30	0,256	0,683	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,030	3,385	3,646
40	0,255	0,681	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	2,971	3,307	3,551
60	0,254	0,679	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	2,915	3,232	3,460
120	0,254	0,677	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	2,860	3,160	3,373
•	0,253	0,674	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	2,807	3,090	3,291

T5 – Table de Snedecor (Test F) pour $p=0,95$

		v_1 (degré de liberté du numérateur)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
v_2 – Degré de liberté du dénominateur	1	161,45	199,50	215,71	224,58	230,16	233,99	236,77	238,88	240,54	241,88
	2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40
	3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79
	4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96
	5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74
	6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06
	7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64
	8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35
	9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14
	10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98
	11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85
	12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75
	13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67
	14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60
	15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54
	16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49
	18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41
	20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35
	25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24
	30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16
	40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08
	80	3,96	3,11	2,72	2,49	2,33	2,21	2,13	2,06	2,00	1,95
	150	3,90	3,06	2,66	2,43	2,27	2,16	2,07	2,00	1,94	1,89
	300	3,87	3,03	2,63	2,40	2,24	2,13	2,04	1,97	1,91	1,86

T6 – Table de la loi du χ^2



νP	0,005	0,010	0,025	0,050	0,100	0,250	0,500	0,750	0,900	0,950	0,975	0,990	0,995
1	0,000	0,000	0,001	0,004	0,016	0,102	0,455	1,32	2,71	3,84	5,02	6,63	7,88
2	0,010	0,020	0,051	0,103	0,201	0,575	1,39	2,77	4,61	5,99	7,38	9,21	10,6
3	0,072	0,115	0,216	0,352	0,584	1,21	2,37	4,11	6,25	7,81	9,35	11,3	12,8
4	0,207	0,297	0,484	0,711	1,06	1,92	3,36	5,39	7,78	9,49	11,1	13,3	14,9
5	0,412	0,554	0,831	1,15	1,61	2,67	4,35	6,63	9,24	11,1	12,8	15,1	16,7
6	0,676	0,872	1,24	1,64	2,20	3,45	5,35	7,84	10,6	12,6	14,4	16,8	18,5
7	0,989	1,24	1,69	2,17	2,83	4,25	6,35	9,04	12,0	14,1	16,0	18,5	20,3
8	1,34	1,65	2,18	2,73	3,49	5,07	7,34	10,2	13,4	15,5	17,5	20,1	22,0
9	1,73	2,09	2,70	3,33	4,17	5,90	8,34	11,4	14,7	16,9	19,0	21,7	23,6
10	2,16	2,56	3,25	3,94	4,87	6,74	9,34	12,5	16,0	18,3	20,5	23,2	25,2
11	2,60	3,05	3,82	4,57	5,58	7,58	10,3	13,7	17,3	19,7	21,9	24,7	26,8
12	3,07	3,57	4,40	5,23	6,30	8,44	11,3	14,8	18,5	21,0	23,3	26,2	28,3
13	3,57	4,11	5,01	5,89	7,04	9,30	12,3	16,0	19,8	22,4	24,7	27,7	29,8
14	4,07	4,66	5,63	6,57	7,79	10,2	13,3	17,1	21,1	23,7	26,1	29,1	31,3
15	4,60	5,23	6,26	7,26	8,55	11,0	14,3	18,2	22,3	25,0	27,5	30,6	32,8
16	5,14	5,81	6,91	7,96	9,31	11,9	15,3	19,4	23,5	26,3	28,8	32,0	34,3
17	5,70	6,41	7,56	8,67	10,1	12,8	16,3	20,5	24,8	27,6	30,2	33,4	35,7
18	6,26	7,01	8,23	9,39	10,9	13,7	17,3	21,6	26,0	28,9	31,5	34,8	37,2
19	6,84	7,63	8,91	10,1	11,7	14,6	18,3	22,7	27,2	30,1	32,9	36,2	38,6

v P	0,005	0,010	0,025	0,050	0,100	0,250	0,500	0,750	0,900	0,950	0,975	0,990	0,995
20	7,43	8,26	9,59	10,9	12,4	15,5	19,3	23,8	28,4	31,4	34,2	37,6	40,0
21	8,03	8,90	10,3	11,6	13,2	16,3	20,3	24,9	29,6	32,7	35,5	38,9	41,4
22	8,64	9,54	11,0	12,3	14,0	17,2	21,3	26,0	30,8	33,9	36,8	40,3	42,8
23	9,26	10,2	11,7	13,1	14,8	18,1	22,3	27,1	32,0	35,2	38,1	41,6	44,2
24	9,89	10,9	12,4	13,8	15,7	19,0	23,3	28,2	33,2	36,4	39,4	43,0	45,6
25	10,5	11,5	13,1	14,6	16,5	19,9	24,3	29,3	34,4	37,7	40,6	44,3	46,9
26	11,2	12,2	13,8	15,4	17,3	20,8	25,3	30,4	35,6	38,9	41,9	45,6	48,3
27	11,8	12,9	14,6	16,2	18,1	21,7	26,3	31,5	36,7	40,1	43,2	47,0	49,6
28	12,5	13,6	15,3	16,9	18,9	22,7	27,3	32,6	37,9	41,3	44,5	48,3	51,0
29	13,1	14,3	16,0	17,7	19,8	23,6	28,3	33,7	39,1	42,6	45,7	49,6	52,3
30	13,8	15,0	16,8	18,5	20,6	24,5	29,3	34,8	40,3	43,8	47,0	50,9	53,7
40	20,7	22,2	24,4	26,5	29,1	33,7	39,3	45,6	51,8	55,8	59,3	63,7	66,8
50	28,0	29,7	32,4	34,8	37,7	42,9	49,3	56,3	63,2	67,5	71,4	76,2	79,5
80	51,2	53,5	57,2	60,4	64,3	71,1	79,3	88,1	96,6	101,9	106,6	112,4	116,3
100	67,3	70,1	74,2	77,9	82,4	90,1	99,3	109,1	118,5	124,3	129,6	135,8	140,2

T7 – Test de Hartley – Valeurs limites de r

Risque $\alpha = 0,05$

[illegible]

Risque $\alpha = 0,01$

[illegible]

T8 – Tableau des coefficients

- Coefficients pour le calcul des limites de contrôle

n	Estimation de σ			Pour le calcul de la carte $\bar{X}$			Carte médiane		Pour le calcul de la carte des S				Pour le calcul de la carte des R			
	c_4	d_2	d_3	A	A_2	A_3	$\bar{A}_2$	$\bar{A}$	B_3	B_4	B_5	B_6	D_3	D_4	D_5	D_6
2	0,7979	1,128	0,853	2,121	1,880	2,659	1,880	2,121	-	3,267	-	2,606	-	3,267	-	3,686
3	0,8862	1,693	0,888	1,732	1,023	1,954	1,187	2,010	-	2,568	-	2,276	-	2,574	-	4,358
4	0,9213	2,059	0,880	1,500	0,729	1,628	0,796	1,639	-	2,266	-	2,088	-	2,282	-	4,698
5	0,9400	2,326	0,864	1,342	0,577	1,427	0,691	1,607	-	2,089	-	1,964	-	2,114	-	4,918
6	0,9515	2,534	0,848	1,225	0,483	1,287	0,548	1,389	0,030	1,970	0,029	1,874	-	2,004	-	5,078
7	0,9594	2,704	0,833	1,134	0,419	1,182	0,508	1,374	0,118	1,882	0,113	1,806	0,076	1,924	0,205	5,203
8	0,9650	2,847	0,820	1,061	0,373	1,099	0,433	1,233	0,185	1,815	0,178	1,752	0,136	1,864	0,387	5,307
9	0,9693	2,970	0,808	1,000	0,337	1,032	0,412	1,224	0,239	1,761	0,232	1,707	0,184	1,816	0,546	5,394
10	0,9727	3,078	0,797	0,949	0,308	0,975	0,362	1,114	0,284	1,716	0,277	1,669	0,223	1,777	0,687	5,469
11	0,9754	3,173	0,787	0,905	0,285	0,927			0,321	1,679	0,314	1,637	0,256	1,744	0,812	5,534
12	0,9776	3,258	0,778	0,866	0,266	0,886			0,354	1,646	0,346	1,609	0,283	1,717	0,924	5,592
13	0,9794	3,336	0,770	0,832	0,249	0,850			0,382	1,618	0,374	1,585	0,307	1,693	1,026	5,646
14	0,9810	3,407	0,762	0,802	0,235	0,817			0,406	1,594	0,399	1,563	0,328	1,672	1,121	5,693
15	0,9823	3,472	0,755	0,775	0,223	0,789			0,428	1,572	0,420	1,544	0,347	1,653	1,207	5,937
20	0,9869	3,735	0,729	0,671	0,180	0,680			0,510	1,490	0,503	1,471	0,415	1,585	1,548	5,922

- Coefficient d_2 pour l'estimation de σ à partir de $\bar{R}$

		Nombre d'échantillons															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	>15
Nombre de mesures par échantillon	2	1,414	1,279	1,231	1,206	1,191	1,181	1,173	1,168	1,163	1,160	1,157	1,154	1,153	1,151	1,149	1,128
	3	1,912	1,806	1,769	1,750	1,739	1,731	1,726	1,722	1,719	1,716	1,714	1,712	1,711	1,710	1,708	1,693
	4	2,239	2,151	2,121	2,105	2,096	2,090	2,086	2,082	2,08	2,078	2,076	2,075	2,073	2,072	2,071	2,071
	5	2,481	2,405	2,379	2,366	2,358	2,353	2,349	2,346	2,344	2,342	2,34	2,339	2,338	2,337	2,337	2,326

T9 – Table de TAGUCHI

Table $L_4 (2^3)$

	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

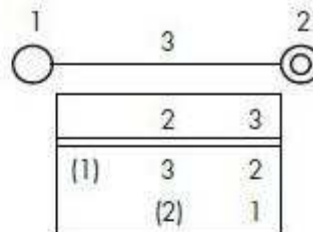


Table $L_8 (2^7)$

N°	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Triangle des interactions entre deux colonnes

	2	3	4	5	6	7
(1)	3	2	5	4	7	6
(2)		1	6	7	4	5
(3)			7	6	5	4
(4)				1	2	3
(5)					3	2
(6)						1

Graphe des effets



BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages

Maurice PILLET, Daniel DURET,

« Qualité en production De l'ISO 9000 à Six Sigma », 3^e édition 2005.

Michael C.THOMSETT,

« Getting Started in SIX SIGMA », 2005.

Maurice PILLET,

« SIX SIGMA comment l'appliquer », Edition d'organisation 2004, (Deuxième tirage 2005).

Yvon MOUGIN,

« Les outils d'optimisation de la performance », Edition d'organisation 2004.

Alain COURTOIS, Maurice PILLET, Chantal MARTIN-BONNEFOUS,

« Gestion de production », 4^e édition 2003.

Anand M.JOGLEKAR,

« Statistical Methods for Six Sigma in R&D and Manufacturing », 2003.

George ECKES,

« SIX SIGMA FOR EVERY ONE », 2003.

Thomas PYZDEK,

« The Six Sigma Project Planner », 2003.

Sung H.PARK

« Six Sigma for Quality and Productivity Promotion », 2003.

Jaap van den HEUVEL,

« The Effectiveness of ISO 9001 and Six Sigma in Healthcare », 2001.

Articles

Jaideep MOTWANI, Ashok KUMAR and Jiju ANTONY,

« A business process change framework for examining the implementation of six sigma », 2004.

Didier CAPORALI,

« DMAIC Méthodologie », 2000.

Jeanne FINE,

« Plans d'expériences par la méthode de TAGUCHI », IUFM de Toulouse Février 1994.

Thèses

David GARNIER,

« LA VALUE STREAM MAPPING: Un outil de présentation des procédés et de réflexion pour l'amélioration LEAN appliqué à l'industrie pharmaceutique », Faculté de pharmacie de GRENOBLE 2010.

Maria JERNELID, Steven ROAN,

« Six Sigma strategy applied to the pharmaceutical industry », Blekinge Institute Of Technologie Sweden 2009.

Vincent BRONET,

« Amélioration de la performance industrielle à partir d'un processus Référent », Université de SAVOIE, 2006.

Obaidullah HAKEEM Khan,

« A Study of Critical Success Factors for Six Sigma Implementation in UK Organizations », School of Management, 2005.

Serment de Galien

Je jure en présence des maîtres de cette faculté :

- *D'honorer ceux qui m'ont instruit dans les préceptes de mon art et de leur témoigner ma reconnaissance en restant fidèle à leur enseignement.*
- *D'exercer ma profession avec conscience, dans l'intérêt de la santé publique, sans jamais oublier ma responsabilité et mes devoirs envers le malade et sa dignité humaine.*
- *D'être fidèle dans l'exercice de la pharmacie à la législation en vigueur, aux règles de l'honneur, de la probité et du désintéressement.*
- *De ne dévoiler à personne les secrets qui m'auraient été confiés ou dont j'aurais eu connaissance dans l'exercice de ma profession, de ne jamais consentir à utiliser mes connaissances et mon état pour corrompre les mœurs et favoriser les actes criminels.*
- *Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses, que je sois méprisé de mes confrères si je manquais à mes engagements.*

جامعة محمد الخامس
كلية الطب والصيدلة
- الرباط -

قسم الصيدلي

بسم الله الرحمن الرحيم

وأقسم بالله العظيم

- أن أراقب الله في مهنتي
- أن أبجل أساتذتي الذين تعلمت على أيديهم مبادئ مهنتي وأعترف لهم بالجميل وأبقى دوما وفيا لتعاليمهم.
- أن أزاو مهنتي بوازع من ضميري لما فيه صالح الصحة العمومية، وأن لا أقصر أبدا في مسؤوليتي وواجباتي تجاه المريض وكرامته الإنسانية.
- أن ألتزم أثناء ممارستي للصيدلة بالقوانين المعمول بها وبأدب السلوك والشرف، وكذا بالاستقامة والترفع.
- أن لا أفشي الأسرار التي قد تعهد إلى أو التي قد أطلع عليها أثناء القيام بمهامي، وأن لا أوافق على استعمال معلوماتي لإفساد الأخلاق أو تشجيع الأعمال الإجرامية.
- لأحضى بتقدير الناس إن أنا تقيدت بعهودي، أو أحتقر من طرف زملائي إن أنا لم أف بالتزاماتي.

" والله على ما أقول شهيد "

جامعة محمد الخامس

كلية الطب والصيدلة بالرباط

أطروحة رقم : 29

سنة: 2012

سيغما ستة

أداة الفعالية الصناعية

أطروحة

قدمت ونوقشت علانية يوم :

.....

من طرف

السيد : يوسف رياضي

المزاد في : 17-04-1986 باليومية

لنيل شهادة الدكتوراه في الصيدلة

الكلمات الأساسية: سيغما ستة (دمايكس)، عملية، التحليل الإحصائي.

تحت إشراف اللجنة المكونة من الأساتذة

السيد: رضوان أبوقال أستاذ في الإنعاش الطب رئيس

السيد: يحيى بنسودة أستاذ في المستحضرات الدوائية مشرف

السيدة: مليكة الصاوي أستاذة في الفيزياء الإحيائية
السيد: بدر الدين المومني أستاذ في علم الطفيليات { أعضاء