



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

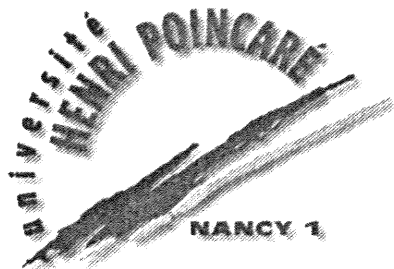
LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



C.N.R.S. URA 821

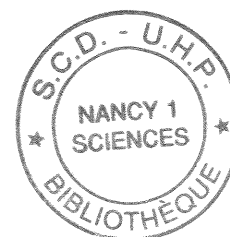
UFR Sciences Techniques Mathématiques Informatique Automatique

Ecole Doctorale IAE+M

DFD Automatique et Production Automatisée

THESE

présentée en vue de l'obtention du



DOCTORAT DE L'UNIVERSITE HENRI POINCARÉ-NANCY I

Spécialité Production Automatisée

par

Roland COLLIGNON

**Gestion Temps Réel de la Qualité d'une Ligne d'Embouteillage,
Apport de la Méthode de Maîtrise Statistique des Procédés**

soutenue publiquement le 12 Mai 1997 devant la Commission d'Examen :

- Président : R. HUSSON, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Lorraine
- Rapporteurs : D. GIEN, Professeur à l'Institut Français de Mécanique Avancée de Clermont-Ferrand
S. JACQUEY, Professeur à l'Université de Mulhouse
- Examineurs : E. BAJIC, Maître de Conférences HDR à l'Université H. Poincaré-Nancy I,
Directeur de thèse associé
Ch. VOLTZ, Directeur Général de la Société GEBO AUTOMATIQUE
- Directeur de thèse : J. RICHARD, Professeur à l'Université H. Poincaré-Nancy I

AVANT-PROPOS

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé dans le cadre d'une convention C.I.F.R.E. (Convention Industrielle de Formation par la Recherche) associant la Société GEBO AUTOMATIQUE, sise à Reichstett en Alsace, société de services en automatique dans le domaine de l'embouteillage, et le Centre de Recherche en Automatique de Nancy (C.R.A.N.-U.R.A. 821 du C.N.R.S.), Groupe Génie de la Production, équipe Ingénierie de la Qualité.

A son terme, je tiens particulièrement à remercier :

- Monsieur René HUSSON, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Lorraine, pour l'honneur qu'il me fait en présidant la Commission d'Examen de ce travail.

- Monsieur Denis GIEN, Professeur à l'Institut Français de Mécanique Avancée de Clermont-Ferrand, et Monsieur Serge JACQUEY, Professeur à l'Université de Mulhouse, pour avoir accepté de juger ce travail en qualité de rapporteurs.

- Monsieur Charles VOLTZ, Directeur Général de la Société GEBO AUTOMATIQUE, pour m'avoir accueilli dans sa Société et m'avoir accordé sa confiance pour la réalisation du projet de recherche et développement décrit dans ce mémoire.

- Monsieur Eddy BAJIC, Maître de Conférences HDR à l'Université H. Poincaré-Nancy I, pour les nombreux conseils qu'il m'a prodigués et la disponibilité qu'il m'a accordé. Son soutien sur le plan scientifique, et sa rigueur, ont largement contribué à l'aboutissement de ces travaux.

- Monsieur Jacques RICHARD, Professeur à l'Université H. Poincaré-Nancy I, pour m'avoir accueilli dans son équipe. Son expérience et ses conseils ont permis d'orienter mes travaux dans des directions judicieuses.

Je souhaite également associer à mes remerciements :

- L'ensemble de mes collègues de la Société GEBO AUTOMATIQUE pour la sympathie qu'ils m'ont toujours témoignée.

Je remercie tout particulièrement Monsieur Jean-Luc MUCKENSTURM, Responsable du Service Contrôle, pour le soutien qu'il m'a accordé, et Monsieur Laurent GALLO,

Responsable de Projets du Service Contrôle, pour son étroite collaboration dans la réalisation de ce projet.

- L'ensemble des membres du CRAN, Groupe Génie de la Production, pour la sympathique ambiance de travail qu'ils entretiennent au laboratoire.

Enfin, j'adresse une pensée toute particulière à mon épouse, sa compréhension et son soutien moral permanent, surtout dans ces derniers mois les plus difficiles, m'ont été d'une grande aide.

Je voudrais terminer en exprimant ma profonde reconnaissance envers mes parents qui m'ont toujours encouragé et soutenu tout au long de mon parcours d'étudiant. C'est en grande partie grâce à eux que mes études ont pu être menées avec succès jusqu'à cet aboutissement.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : LA PROBLEMATIQUE QUALITE EN EMBOUTEILLAGE	4
CHAPITRE II : OUTILS STATISTIQUES POUR LA MAITRISE DES PROCEDES DISCONTINUS A HAUTE CADENCE, CAS DU PROCEDE D'EMBOUTEILLAGE	26
CHAPITRE III : ANALYSE FONCTIONNELLE D'UN SYSTEME DE MAITRISE DE LA QUALITE DU PROCEDE D'EMBOUTEILLAGE	73
CHAPITRE IV : REALISATION INDUSTRIELLE DU SYSTEME	108
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	142
BIBLIOGRAPHIE	145

Introduction Générale	1
<hr/>	
Chapitre I : La Problématique Qualité en Embouteillage	4
<hr/>	
1 - Introduction	4
2 - La maîtrise de la qualité en production	4
2.1 - De la qualité en production à la Qualité Totale	4
2.2 - La qualité basée sur l'inspection	6
2.2.1 - Inspection par échantillonnage	7
2.2.2 - Inspection à 100%	8
2.2.3 - Conclusion concernant la qualité basée sur l'inspection	9
2.3 - La qualité basée sur la gestion du processus de fabrication	9
2.4 - La nécessaire complémentarité entre inspection et maîtrise du procédé	10
3 - Le procédé d'embouteillage et la problématique de maîtrise de sa qualité	11
3.1 - Introduction	11
3.2 - Composition du procédé d'embouteillage	11
3.3 - Les critères de qualité des produits	13
3.4 - Le procédé d'embouteillage et les causes de sa variabilité	15
3.4.1 - Les moyens et méthodes de production	16
3.4.2 - La main d'oeuvre	19
3.4.3 - Les matières premières	20
3.4.4 - Le milieu	20
3.5 - Les contraintes engendrées par les cadences élevées de production	20
3.6 - La gestion actuelle de la qualité en embouteillage et ses lacunes	21
3.6.1 - Gestion en temps réel	22
3.6.2 - Gestion à court terme	22
3.6.3 - Gestion à moyen et long terme	23
3.6.4 - Constat sur la gestion actuelle	24
4 - Conclusion	24
Chapitre II : Outils Statistiques pour la Maîtrise des Procédés	
Discontinus à Haute Cadence, Cas du Procédé d'Embouteillage	26
<hr/>	
1 - Introduction	26
2 - La Maîtrise Statistique des Procédés	27
2.1 - La variabilité du procédé	27
2.1.1 - Les causes aléatoires ou causes communes	27
2.1.2 - Les causes spéciales ou causes assignables	27
2.1.3 - Loi de référence du procédé	28
2.2 - La démarche de maîtrise du procédé de fabrication	29

2.2.1 - Etude préliminaire, approfondissement des connaissances	30
2.2.2 - Mise sous contrôle	32
2.2.3 - Surveillance et amélioration	33
2.3 - Maîtrise directe ou indirecte	34
3 - La problématique d'application de la MSP aux procédés discontinus à haute cadence et au procédé d'embouteillage	35
3.1 - Le suivi des procédés continus	35
3.2 - Le suivi des procédés discontinus à cadence peu élevée	36
3.3 - Cas des procédés discontinus à haute cadence et du procédé d'embouteillage	37
3.3.1 - Un caractère à la fois discontinu et continu	37
3.3.2 - Nécessité de détection des dérives lentes et rapides	37
3.3.3 - Critère de capabilité	38
3.4 - Conclusion	38
4 - Typologie des cartes de contrôle de suivi de la moyenne	39
4.1 - Introduction	39
4.2 - Les cartes de Shewhart	40
4.2.1 - Les limites de contrôle classiques	40
4.2.2 - Détermination de l'effectif des échantillons et définition de l'efficacité	41
4.2.3 - Les limites de contrôle modifiées	42
4.2.4 - Détection de tendances	43
4.2.5 - Efficacité en fonction du type de variation	44
4.2.6 - Exploitation pour la phase de diagnostic	45
4.3 - Les cartes à moyenne mobile	45
4.4 - Les cartes CUSUM	47
4.4.1 - La carte CUSUM à masque en V	47
4.4.2 - La carte CUSUM à limites de contrôle parallèles	49
4.4.3 - Efficacité en fonction du type de variation	49
4.5 - Les cartes EWMA	51
4.5.1 - Description de la carte EWMA	51
4.5.2 - Efficacité en fonction du type de variation	52
4.6 - Synthèse des cartes de suivi de la moyenne	54
5 - Cartes de contrôle de suivi de la dispersion	55
6 - Cartes de contrôle aux attributs	56
7 - Expérimentation des cartes de contrôle sur une machine d'embouteillage	57
7.1 - Etude préliminaire	58
7.1.1 - Capabilité du procédé d'inspection	58
7.1.2 - Etude de normalité du procédé	59
7.1.3 - Capabilité machine	60
7.2 - Expérimentation	61

7.2.1 - Récupération des données	61
7.2.2 - Tracé de la carte de Shewhart	61
7.2.3 - Tracé de la carte CUSUM	63
7.2.4 - Tracé de la carte EWMA	63
7.3 - Conclusion	64
8 - Stratégie de maîtrise d'une machine d'embouteillage	65
8.1 - Stratégie de suivi de la moyenne	65
8.1.1 - Suivi individuel des organes de fabrication	65
8.1.2 - Suivi de la qualité de la production globale	66
8.2 - Stratégie de suivi de la dispersion	67
8.3 - Stratégie de suivi des attributs	67
8.3.1 - Suivi individuel des organes de fabrication	67
8.3.2 - Suivi de la production globale	68
8.4 - Réduction des coûts de production	71
9 - Conclusion	71
Chapitre III : Analyse fonctionnelle d'un système de maîtrise de la qualité du procédé d'embouteillage	73

1 - Introduction	73
2 - Analyse fonctionnelle	74
2.1 - Décomposition fonctionnelle	74
2.2 - Qualifier les produits	76
2.2.1 - L'inspection des produits	77
2.2.2 - La qualification des produits	79
2.3 - Analyser la qualité	80
2.3.1 - Pré-traiter les données	81
2.3.2 - Surveiller la qualité en temps réel	81
2.3.3 - Stocker/diffuser les informations de qualité	81
2.4 - Diagnostiquer	82
2.4.1 - Description d'un système expert	82
2.4.2 - Composition de la base de connaissances	84
2.5 - Réagir sur le procédé	87
2.5.1 - Les réactions préventives	88
2.5.2 - Les réactions de type réflexe	90
2.5.3 - Les réactions curatives	90
2.5.4 - Détermination des réactions	91
3 - Interactions du système avec son environnement	91
3.1 - La communication du système avec les différents sites de l'entreprise	91
3.2 - Communication entre le système et l'opérateur	93
3.2.1 - Echanges nécessaires aux phases de diagnostic et de réaction	94

3.2.2 - Echanges pour l'amélioration de la performance du procédé	95
3.2.3 - Echanges nécessaires à la surveillance du système	95
3.3 - Communication entre le système et le procédé	96
3.4 - Communication entre le système et le service maintenance	97
3.5 - Communication entre le système et le service assurance qualité	98
3.6 - Communication entre le système et la supervision	100
4 - Architecture fonctionnelle	101
5 - Apports du système pour la gestion d'une ligne d'embouteillage	102
5.1 - Réduction du nombre de produits défectueux livrés	103
5.2 - Amélioration de la qualité fabriquée et de la traçabilité	104
5.2.1 - Amélioration de la qualité fabriquée	104
5.2.2 - Amélioration de la traçabilité	105
5.3 - Augmentation de la disponibilité du procédé	106
6 - Conclusion	106
Chapitre IV : Réalisation Industrielle du Système	108
<hr/>	
1 - Introduction	108
2 - Présentation générale du système réalisé	109
2.1 - Architecture physique et informatique	109
2.2 - Intégration dans la ligne de production	111
3 - L'inspection des produits	111
3.1 - L'acquisition des images	112
3.2 - Le traitement des images	114
3.2.1 - La configuration de l'analyse d'images	114
3.2.2 - Détermination de la conformité du produit	116
3.2.3 - Modèle d'acceptabilité des produits	116
3.3 - La communication de la carte de traitement d'images	117
4 - Le système de traitements temps réel	118
4.1 - La gestion du système d'éjection	118
4.1.1 - Le principe mécanique de l'éjecteur	119
4.1.2 - La synchronisation de l'action d'éjection	120
4.1.3 - Auto-détection des défauts d'éjection	122
4.2 - Réactions réflexes sur le procédé	123
4.3 - Identification des organes de fabrication	123
4.4 - Développement informatique	125
5 - Interface opérateur et traitements statistiques	128

5.1 - Description de l'interface et des traitements statistiques	128
5.2 - Adaptabilité de l'interface	133
5.3 - Développement informatique	135
6 - Mise en oeuvre industrielle	137
7 - Conclusion	140
Conclusion Générale et Perspectives	142

Bibliographie	145
1 - Bibliographie Scientifique	144
2 - Bibliographie Technique	150

Introduction Générale

- **Objet et contexte des travaux de recherche**

Ce mémoire présente nos travaux de recherche réalisés dans le cadre d'une convention C.I.F.R.E. associant la Société GEBO AUTOMATIQUE, société de services en automatique dans le domaine de l'embouteillage, et le Centre de Recherche en Automatique de Nancy (C.R.A.N.- U.R.A. 821 du C.N.R.S.), équipe Ingénierie de la Qualité.

Ces travaux ont pour objet l'amélioration de la qualité d'un processus d'embouteillage.

Ces vingt dernières années, la qualité est devenue dans un marché fortement concurrentiel un des objectifs principaux des entreprises.

Jusque dans les années 75, le marché était dans une situation de pénurie, il suffisait alors de fabriquer pour vendre [PEU92]. L'objectif de toute industrie était de produire en quantité maximale, la qualité était une préoccupation secondaire.

Avec l'apparition de la crise entraînant une stagnation ou même une récession de la demande, la concurrence est devenue de plus en plus pressante, notamment avec l'ouverture des marchés internationaux.

Aussi, pour s'imposer les entreprises sont amenées maintenant à :

- Améliorer la qualité de leurs produits, afin de satisfaire au mieux les souhaits des clients potentiels, de fidéliser leur clientèle, et de développer leur marché.
- Diminuer les coûts engendrés par la non-qualité, afin d'être plus compétitives.

La quantité a alors trouvé un censeur : la qualité.

Dans le domaine de l'agro-alimentaire, et notamment dans le cas de grande consommation, le conditionnement est devenu un point clé de l'amélioration de la qualité des produits. En effet, la qualité du conditionnement tient une place importante pour la satisfaction du client, par la forte valeur ajoutée qu'il apporte à la qualité intrinsèque du produit de base.

P. Millet de l'Institut Français de la Boisson et de la Malterie [MIL93] souligne à ce titre que les centres d'intérêts des industries de la boisson se situaient, en 1993, à 55% sur la qualité, dont 35% en augmentation, sur la phase de conditionnement.

D'autre part, les coûts de la non qualité sont souvent vertigineux dans la majorité des industries, ils atteignent jusqu'à 10% du chiffre d'affaires comme le reconnaissent spontanément de nombreuses entreprises [GUY92]. Pour toute société il est alors vital de réduire ces coûts.

On distingue les coûts internes à l'entreprise, dus aux défauts fabriqués, de ceux dus aux défauts livrés parvenus aux clients.

Les coûts de loin les plus importants sont ceux dus aux défauts livrés, leur majeure partie est difficilement chiffrable car ils correspondent à la perte de confiance du client pour le fournisseur qui s'accompagne inévitablement d'une perte de commandes.

Les coûts les moins élevés sont ceux dus aux défauts fabriqués, ils correspondent aux efforts et dépenses entraînés en moyens d'inspection, de tri, en traitement de non conformités, et en matière première.

Par ailleurs, le soucis de qualité a été renforcé ces dix dernières années par l'émergence de nouvelles relations clients-fournisseurs avec un nombre en forte croissance de sociétés certifiées aux normes de la famille ISO 9000 de l'Assurance Qualité.

Dans le domaine de l'embouteillage, la plupart des gros producteurs de boissons comme Kronenbourg, Volvic, Ricard, ont été certifiés ISO 9002, ce qui implique la mise en place de procédures et moyens visant à garantir la qualité de la phase de production.

Ainsi, la volonté de réduction des coûts dus aux défauts fabriqués et livrés, la nécessité de répondre à un marché de plus en plus exigeant en terme de qualité, et les contraintes de normalisation ISO 9000, génèrent le besoin d'améliorer la qualité notamment à l'étape de fabrication des produits.

Dans cette optique, nos travaux ont pour objectif de définir et de mettre en oeuvre des méthodes et outils permettant l'amélioration de la qualité dans le domaine de l'embouteillage par l'inspection des produits et la maîtrise du procédé de fabrication.

Ces travaux trouvent leur concrétisation dans la réalisation d'un système automatisé de maîtrise temps réel de la qualité du procédé d'embouteillage.

- **Plan du mémoire**

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres. Dans le premier, nous posons le problème d'amélioration de la qualité dans le domaine de l'embouteillage. Nous abordons tout d'abord les différentes méthodes et moyens de gestion de la qualité dans l'industrie en général, et en particulier dans la phase de production. Nous exposons ensuite les contraintes que présente le procédé d'embouteillage pour l'application de ces derniers, et montrons les lacunes de la gestion actuelle de la qualité dans les usines de production de boissons.

Pour pallier aux insuffisances de cette gestion, nous proposons d'employer la méthode de Maîtrise Statistique des Procédés (M.S.P.). Après une présentation de cette méthode dans le second chapitre, nous exposons la problématique de son application au procédé d'embouteillage. Nous réalisons alors une analyse comparée des performances des différentes cartes de contrôles existantes que nous expérimentons sur une ligne de conditionnement réelle. Cette analyse nous conduira à proposer une stratégie de mise en œuvre des outils de la MSP pour l'amélioration de la qualité du procédé d'embouteillage.

Devant les contraintes engendrées par les cadences importantes de production, nous proposons un système automatisé pour la réalisation de la maîtrise du procédé d'embouteillage. Nous présentons au chapitre III tout d'abord l'analyse fonctionnelle de ce système, qui effectue d'une part l'inspection et le tri des produits, et réalise d'autre part une boucle de réaction sur le procédé. Cette boucle de réaction met en œuvre les outils de la MSP définis au chapitre II, ainsi que des fonctions évoluées de diagnostic et de réaction. Ensuite, devant la nécessité d'un haut niveau d'intégration du système dans l'environnement de production alliant à la fois automatismes et opérateurs humains, nous proposons un modèle de communication de ce dernier avec les divers services intervenant sur la ligne de conditionnement. Enfin, nous présentons les apports que peut amener le système proposé pour la gestion d'un procédé d'embouteillage.

La réalisation industrielle du système est exposée au chapitre IV. Nous présentons les différents algorithmes employés, l'architecture informatique et matérielle mise en œuvre, ainsi que la résolution des principales difficultés rencontrées lors des mises en service du système dans plusieurs usines d'embouteillage.

Enfin, la conclusion générale effectue la synthèse des travaux réalisés, des résultats obtenus, et présente les perspectives de recherche et de développement futurs.

Chapitre I : La Problématique Qualité en Embouteillage

1 - Introduction

Nos travaux de recherche ont pour objet l'obtention de la qualité dans le domaine de l'embouteillage en s'attachant à l'activité de production.

Mais avant de décrire les méthodes et moyens que nous allons mettre en oeuvre pour y parvenir, il nous a paru essentiel de préciser que pour minimiser au maximum les coûts de non qualité dus aux défauts fabriqués et livrés présentés en introduction générale, les efforts de qualité doivent être orientés vers toutes les phases du cycle de vie du produit, et ne pas se restreindre à l'étape de production [VAN85].

Nous allons ainsi tout d'abord décrire les étapes successives de gestion de la qualité en situant notre problématique d'obtention de la qualité à la phase de production. Nous exposerons ensuite les différents moyens mis en oeuvre dans l'industrie en général pour répondre à cette problématique, qui sont l'inspection des produits, et la maîtrise du procédé de fabrication.

Puis, nous présenterons le procédé d'embouteillage et les difficultés qu'il présente pour la maîtrise de sa qualité. Nous terminerons en décrivant les moyens et méthodes mis en oeuvre actuellement pour la réalisation de cette maîtrise et leurs lacunes.

2 - La maîtrise de la qualité en production

2.1 - De la qualité en production à la Qualité Totale

Les possibilités d'amélioration de la performance du procédé de fabrication seront très vite limitées si à la base, la conception du procédé a été mal réalisée. De même, il devient caduque de chercher à améliorer la qualité des produits livrés en essayant de respecter au mieux les spécifications, si ces spécifications ont été mal étudiées et ne correspondent pas aux besoins des clients.

Le souci de la qualité doit donc être intégré à toutes les phases du cycle de vie, comme le montre la figure I.1. Cet objectif correspond au concept de Qualité Totale.

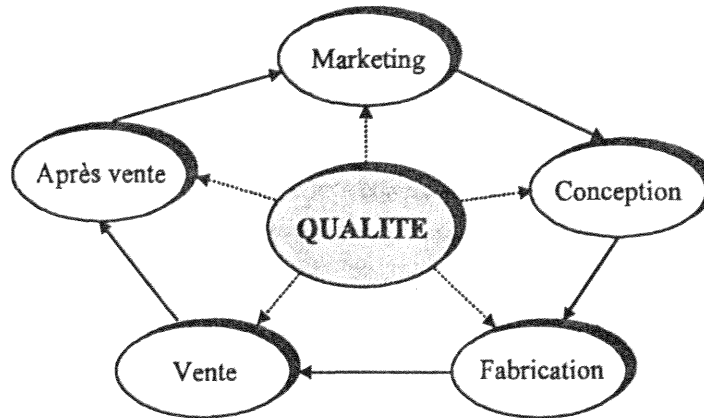


Figure I.1 : La Qualité Intégrée

Pour réaliser cette intégration, il est indispensable que la qualité soit présente dans tous les services de l'entreprise et à tous ses niveaux hiérarchiques. Chaque service et donc chaque personne le composant doit alors prendre en charge la qualité du résultat de son action et en être responsable, chacun travaille ainsi en Auto-Contrôle. Ainsi, la qualité sera "l'affaire de tous", mais aussi et surtout "l'affaire de chacun" [LAM89].

Deming définit par le cycle P.D.C.A. (Plan-Do-Check-Action) la méthode de gestion de la qualité dans chacun des services permettant une intégration réussie de la qualité.

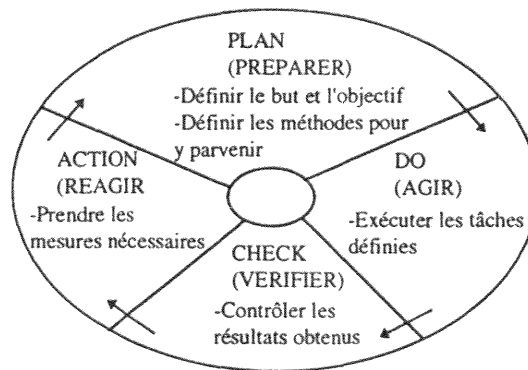


Figure I.2 : Le cycle de gestion de la Qualité Totale

Cette intégration de la qualité se fait en général de manière progressive au fur et à mesure de la prise de conscience de l'importance grandissante de la qualité.

Tout d'abord, les efforts sont concentrés sur la phase de production, en commençant par une inspection des produits réalisés, puis en recherchant à maîtriser le procédé de fabrication.

Ensuite, les entreprises prennent rapidement conscience que la qualité à l'étape de conception et de développement de produits nouveaux est un facteur essentiel pour la qualité de l'ensemble des produits futurs fabriqués suivant le modèle conçu. Et l'importance de la qualité à cette étape croît avec la taille des séries de fabrication. Par exemple, dans le domaine de l'embouteillage où les séries de fabrication sont très importantes, il est nécessaire de porter une attention particulière à l'intégration de la qualité à cette phase.

Puis, dans la progression finale vers la Qualité Totale vient l'intégration de la qualité aux étapes amonts et avals qui sont le marketing et la vente.

Nous notons par ailleurs une certaine correspondance entre les diverses normes ISO 9000 et les différentes étapes de cette démarche vers la Qualité Totale, comme l'indique la figure I.3.

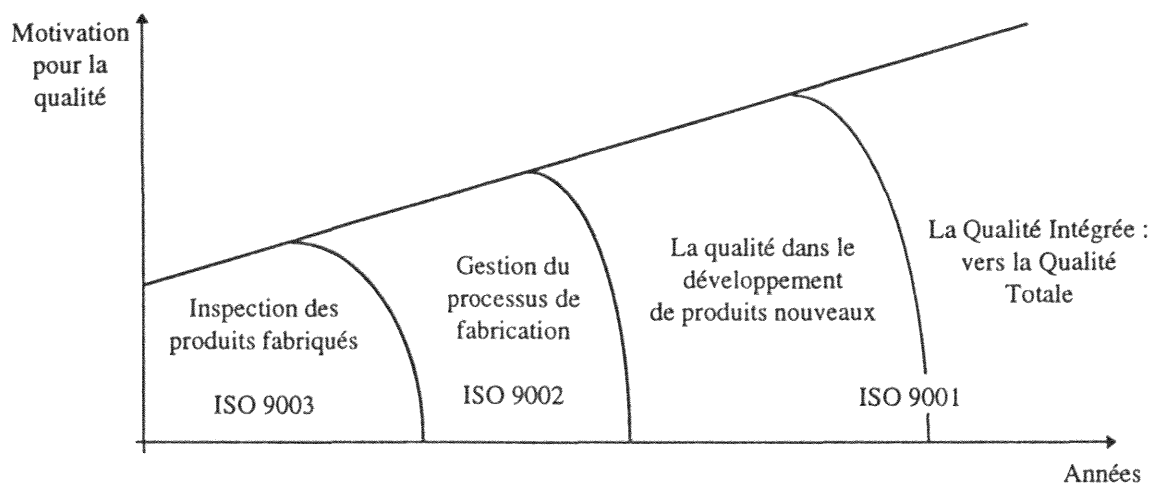


Figure I.3 : Les étapes de la démarche vers la Qualité Totale

Nos travaux de recherches sont axés sur la qualité en phase de production, ils comprennent donc les deux premières étapes de la démarche vers la Qualité Totale, c'est à dire:

- l'inspection des produits fabriqués
- la gestion du procédé de fabrication

Etudions alors ces deux étapes en montrant leurs performances respectives pour l'obtention d'une qualité maximale, et en présentant les méthodes et moyens à notre disposition pour leur accomplissement.

2.2 - La qualité basée sur l'inspection

La première étape fut pour l'industrie de penser que la garantie de la qualité des produits livrés ne dépendait que de l'inspection des produits fabriqués permettant le tri et l'élimination des produits défectueux.

C'était une époque où bon prix signifiait basse qualité [ISH84]. Il s'agissait alors uniquement de s'assurer que le produit fourni au client était en conformité avec les spécifications annoncées.

Encore à l'heure actuelle, bon nombre d'entreprises ont la même réflexion. Pour toute démarche qualité, elles mettent en oeuvre:

- une inspection du produit fabriqué avant livraison à un client ou entre deux opérations de production,

associée à:

- une gestion curative des défauts de qualité, n'évitant ainsi pas la production de produits non conformes.

Dans l'industrie de l'embouteillage nous verrons dans la suite de ce mémoire qu'un grand nombre d'entreprises appliquent encore cette gestion de la qualité.

L'inspection des produits se fait soit par échantillonnage, soit à 100% des produits fabriqués. Mais elle a toujours pour seul objectif l'acceptation ou le refus des produits inspectés.

Une sélection des produits par inspection n'apporte alors aucune valeur ajoutée, ni à l'amélioration de la qualité de fabrication, ni à la motivation du personnel de l'entreprise.

En effet, de par sa finalité bon/pas bon, cette inspection ne permet pas de motiver ni de responsabiliser le personnel. Au contraire, elle aura pour conséquence de culpabiliser celui-ci lors des refus de produits sans lui donner les moyens d'une amélioration de la qualité de la production.

Notre expérience nous a montré qu'un système automatisé d'inspection de la production est alors parfois pris pour un "mouchard" par le personnel de production.

2.2.1 - Inspection par échantillonnage

L'inspection par échantillonnage a pour objectif de déterminer si la qualité d'un lot de produits fabriqués est acceptable en n'inspectant qu'un certain nombre de produits du lot. L'acceptation ou le refus est fonction du nombre d'éléments défectueux détectés parmi les produits inspectés. Un lot refusé est ensuite généralement trié en produits bons, produits mauvais à éliminer, produits mauvais à recycler et produits déclassés.

Ce type d'inspection est fréquemment utilisé en contrôle de réception.

Un plan de contrôle établi à l'avance suivant des lois statistiques définit le nombre de produits du lot à inspecter répartis en un ou plusieurs prélèvements successifs. Les normes NFX06021

à NFX06025, reprises dans l'ouvrage de Vandeville [VAN85], peuvent servir de références pour l'établissement des plans de contrôle.

Mais regardons la courbe d'efficacité d'un tel contrôle :

Considérons par exemple une inspection par échantillonnage simple (un seul prélèvement) qui consiste à prélever 50 produits d'un lot et à considérer que ce lot est non acceptable dès que nous trouvons un seul produit non conforme. La courbe d'efficacité de ce plan d'inspection, représentant la probabilité P d'acceptation du lot en fonction de sa proportion de défectueux p , suit une loi binomiale qui se résume dans notre cas à $P=(1-p)^{50}$. Cette courbe d'efficacité est tracée sur le graphique suivant:

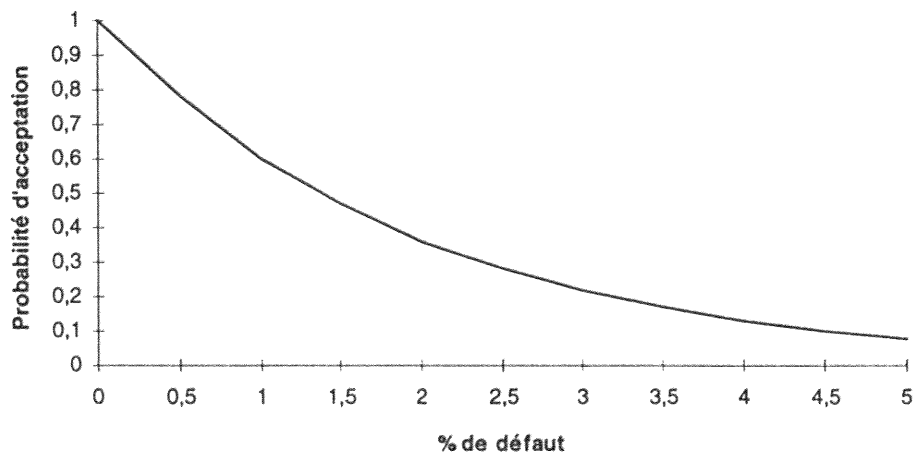


Figure I.4 : Exemple de courbe d'efficacité d'un plan de contrôle de réception

Nous constatons alors que dans le cadre de ce plan de contrôle assez sévère, la probabilité d'accepter un lot comportant 2% de produits défectueux est de 36%, ce qui est important.

Cet exemple illustre bien la faible efficacité d'un contrôle par échantillonnage.

Une inspection par échantillonnage ne peut donc pas assurer la qualité de la production, elle permet tout au plus d'éviter les catastrophes.

2.2.2 - Inspection à 100%

Lorsque cela est possible, certaines entreprises pensent remédier au problème d'inefficacité de l'échantillonnage en pratiquant une inspection à 100%. Et cela est de plus en plus souvent réalisable avec l'apparition de moyens automatisés d'inspection de plus en plus performants (nous décrirons les moyens d'inspection utilisés en embouteillage aux chapitres III et IV).

L'inspection à 100% est généralement plus coûteuse que l'inspection par échantillonnage, mais celle-ci est indispensable lorsqu'il est nécessaire de garantir la qualité d'absolument tous les produits. Et c'est le cas notamment dans le domaine de l'embouteillage car le produit est consommable.

Mais une inspection de tous les produits la plus minutieuse laisse toujours des erreurs de contrôle: quelques produits défectueux arrivent à en traverser les mailles [PIL93][ISH84]. En effet, l'instrumentation de contrôle n'est jamais sûre à 100%, et l'inspection humaine trop subjective et trop lente pour des cadences de production toujours de plus en plus élevées.

2.2.3 - Conclusion concernant la qualité basée sur l'inspection

Un niveau d'inspection, qu'il soit effectué par échantillonnage ou à 100% des produits, permettra une élimination plus ou moins exhaustive des produits défectueux, mais sans garantir le zéro défaut absolu. Une démarche qualité basée uniquement sur l'inspection ne peut donc pas à elle seule garantir la qualité des produits livrés.

De plus, une telle démarche ne permet pas la réduction des coûts internes à l'entreprise dus aux défauts fabriqués. Et ces coûts peuvent être considérables à long terme car il prennent en compte, non seulement la matière première perdue et le manque de production engendré, mais également les dépenses en moyens et personnel pour le traitement des produits non conformes.

2.3 - La qualité basée sur la gestion du processus de fabrication

Après avoir constaté l'inefficacité d'une approche qualité basée uniquement sur l'inspection, l'idée qu'une gestion bien menée du processus de fabrication doit nécessairement supprimer les défauts s'est rapidement fait jour.

Dans le contexte d'une concurrence de plus en plus forte, l'émergence de cette idée a également été favorisée par la nécessité de réduire les coûts dus aux défauts fabriqués.

L'objectif est alors la maîtrise du procédé de fabrication afin d'amener et de maintenir le processus de production en état de fabriquer tous les produits conformes aux spécifications retenues.

Ainsi, la qualité des produits livrés sera obtenue en assurant la qualité des produits fabriqués.

La maîtrise du procédé est réalisée par la méthode de Maîtrise Statistique des Procédés (MSP). Cette méthode est basée sur une démarche préventive de surveillance et de réaction

dès que des variations anormales du procédé apparaissent et cela avant la fabrication de produits défectueux (figure I.5).

Nous détaillerons la Méthode MSP au chapitre II de ce mémoire.

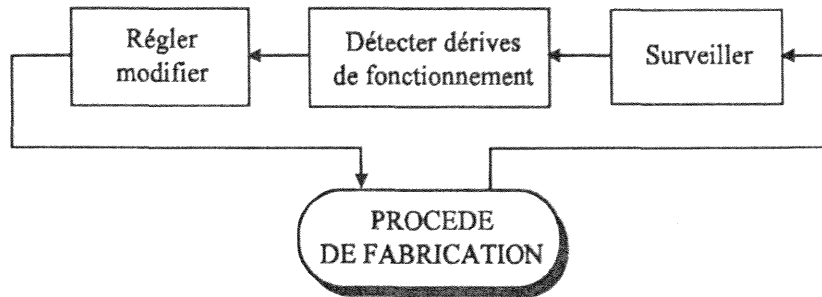


Figure I.5 : Boucle de maîtrise d'un procédé

Il est à noter que cette étape de gestion du processus de fabrication compte parmi les plus importantes dans la progression vers la Qualité Totale.

2.4 - La nécessaire complémentarité entre inspection et maîtrise du procédé

Néanmoins, une maîtrise du procédé de fabrication ne peut être absolument parfaite, et des événements imprévisibles peuvent toujours survenir, amenant ainsi la production de produits non conformes.

Aussi, l'obtention d'une qualité livrée maximale passe donc par la complémentarité entre, d'une part une maîtrise du procédé de fabrication visant le zéro défaut fabriqué, et d'autre part une inspection/tri à 100% des produits visant le zéro défaut livré.

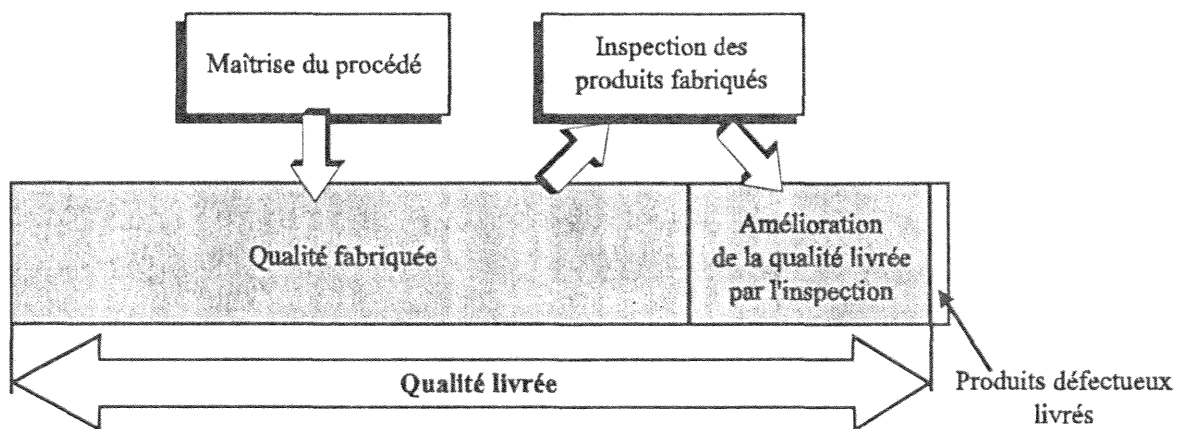


Figure I.6 : L'amélioration de la qualité livrée

3 - Le procédé d'embouteillage et la problématique de maîtrise de sa qualité

3.1 - Introduction

Après avoir présenté la démarche permettant d'obtenir une qualité maximale dans l'industrie en général, nous avons mis l'accent sur les moyens d'améliorer la qualité dans la phase de production, qui est le coeur de nos travaux.

Notre objectif étant d'appliquer ces moyens au procédé d'embouteillage, il nous faut maintenant décrire les particularités de ce procédé, en mettant en évidence les difficultés qu'il présente pour la réalisation de sa maîtrise et l'inspection des produits fabriqués.

Ensuite nous présenterons la manière dont est actuellement gérée la qualité dans le procédé d'embouteillage, et nous montrerons ses lacunes.

Mais tout d'abord, présentons la composition d'un procédé d'embouteillage ainsi que les critères de qualité des produits.

3.2 - Composition du procédé d'embouteillage

Une ligne d'embouteillage est constituée de différentes machines successives ayant chacune une action différente sur le produit. A chaque étape du processus correspond un certain nombre de critères de qualité à respecter.

Sur le schéma suivant, nous avons représenté les principales machines et les différents postes d'inspection à 100% des produits, en montrant les divers défauts susceptibles d'apparaître.

Notons qu'il est généralement nécessaire d'inspecter les bouteilles vides avant leur remplissage, bouteilles qui peuvent être neuves ou récupérées de consigne. Le cas des bouteilles récupérées devient de plus en plus fréquent avec la préoccupation grandissante de recyclage des déchets, et cela même pour des bouteilles plastiques. Le recyclage demande alors de nouvelles inspections telles que le contrôle d'absence de traces d'hydrocarbures et le tri des divers formats.

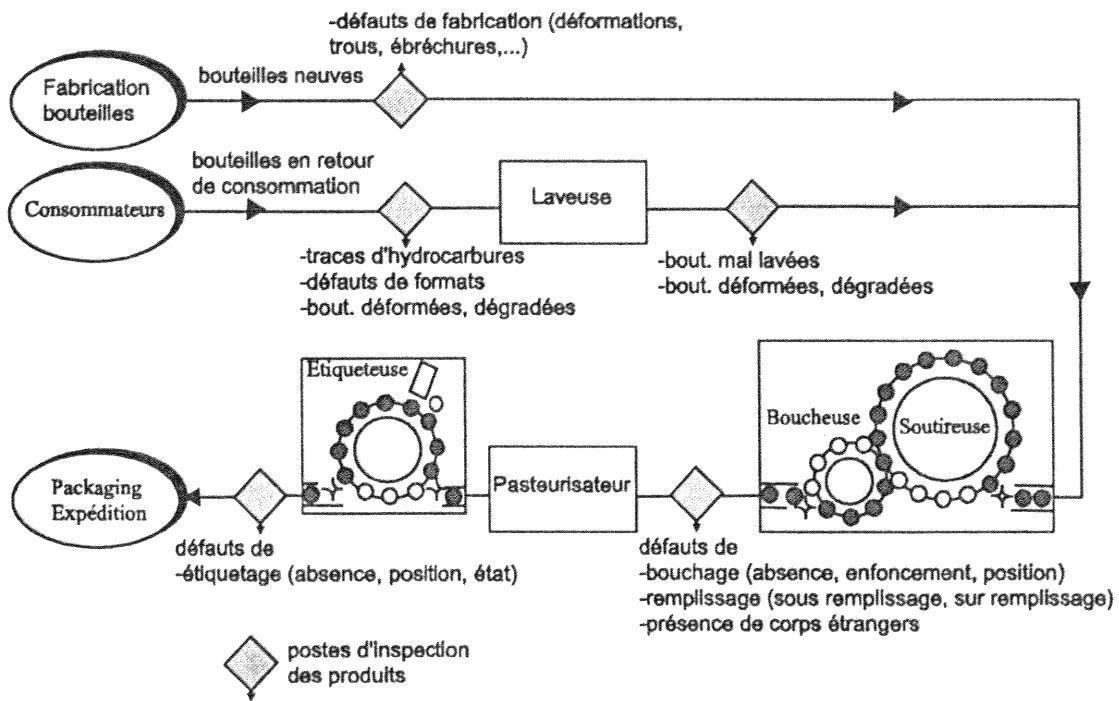


Figure I.7 : Les étapes qualité d'une ligne d'embouteillage

Pour notre étude, nous nous intéresserons à la phase d'embouteillage proprement dite composée essentiellement de trois machines: la soutireuse, chargée de remplir les bouteilles, la boucheuse et l'étiqueteuse. Dans la suite de ce mémoire, nous appellerons procédé d'embouteillage l'ensemble de ces trois machines.

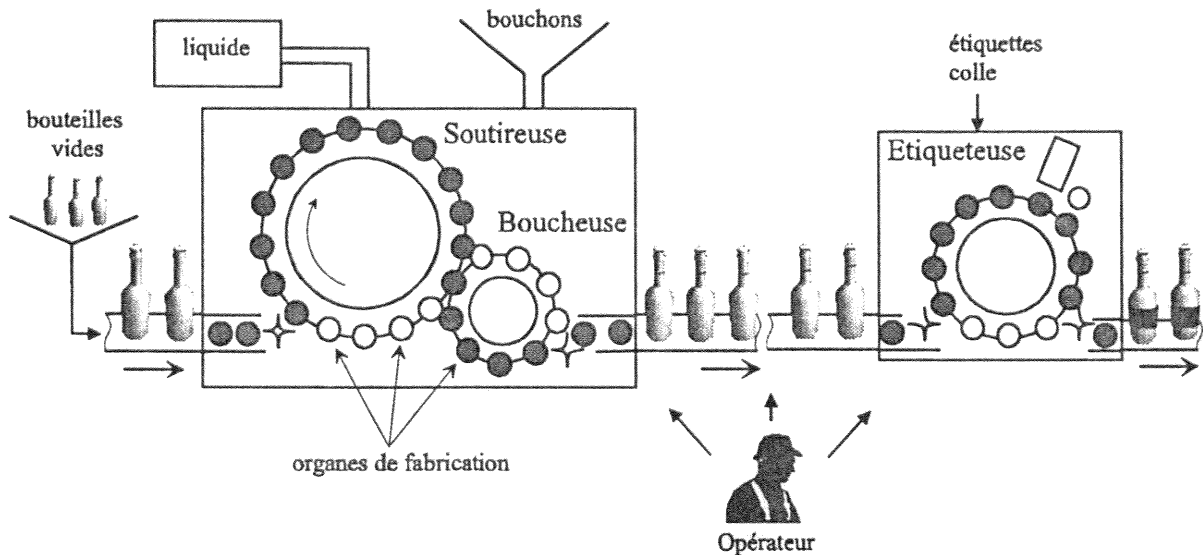


Figure I.8 : Le procédé d'embouteillage

Notre objectif sera donc de garantir la qualité des caractéristiques fabriquées par chacune de ces machines.

3.3 - Les critères de qualité des produits

Dans le procédé d'embouteillage, comme dans toute l'industrie agro-alimentaire, nous distinguons deux types de critères de qualité. Le premier exprime l'absence de dangers de contamination biologique de la denrée alimentaire, le second est la qualité du conditionnement due aux seules opérations de type mécanique.

Pour la maîtrise des risques biologiques, la méthode HACCP (Hazard Analysis Critical Control Points), recommandée par l'OMS et la CEE, est très souvent employée [LEA96]. Cette méthode préventive, qui s'apparente à la démarche de Maîtrise Statistique des Procédés (voir chapitre 2), consiste premièrement à localiser dans le déroulement du processus de fabrication des points critiques d'apparition des dangers. Puis, à ces points, des paramètres pertinents sont mis sous surveillance et des actions sont établies lors de la dérive d'un de ces paramètres. Cette méthode est par exemple employée à l'usine de Vittel et dans les usines du Groupe Mars [MAR92].

Le second type de critères de qualité est bien entendu celui qui correspond à notre problématique et que nous considérerons dans la suite de ce mémoire. Nous proposons la classification suivante des caractéristiques de qualité entrant dans ce cadre:

- **La qualité d'apparence**

Un produit peut être mal vendu s'il a un aspect extérieur négligé car l'emballage, la présentation des produits sont les premières caractéristiques perçues par l'acheteur final, c'est à dire le consommateur.

Ce type de caractéristique correspond notamment à la qualité de l'étiquetage.

- **La qualité exigée pour le respect des réglementations et normes**

Des normes sont établies par la CEE et les différents pays concernant notamment la quantité de liquide à respecter dans chaque bouteille. Un lot de produits peut alors être tout simplement refusé s'il ne respecte pas la réglementation en vigueur. Ce critère de qualité est devenu encore plus important avec l'internationalisation des marchés.

- **La qualité liée à la consommabilité ou la sécurité du produit**

Les produits étant de consommation, la santé du consommateur est en jeu. Aussi, tout défaut de qualité entraînant un manque de sécurité pour ces derniers peut engendrer de graves

conséquences pour l'entreprise productrice.

Ce type de caractéristique correspond notamment à la qualité du bouchage. En effet il est important de montrer au consommateur que sa bouteille n'a pas été et n'a pas pu être ouverte auparavant, on parle alors d'inviolabilité. Par exemple, les industriels de l'embouteillage savent l'intransigeance du Japon concernant la qualité de cette caractéristique, notamment pour les bouteilles d'eau, l'eau minérale française étant considérée comme un produit de luxe dans ce pays.

- **Critères de qualité visant la réduction des coûts de production**

Outre les critères de qualité évoqués précédemment dus à des exigences externes à la société productrice, provenant de demandes des clients ou d'organismes de réglementation, l'usine de fabrication peut s'imposer des critères de qualité propres visant à réduire les coûts de production. En effet, afin de réduire la quantité de liquide utilisée pour remplir les bouteilles, un niveau de remplissage minimum des produits, respectant la réglementation, peut être visé. Ce critère de qualité ne provoquera pas de rejets de produits, mais il peut être important car quelques millilitres supplémentaires par bouteille finissent par se chiffrer, en fonction du coût de la boisson, en dizaines, voire en centaines de milliers de francs sur une année de production [NOD93].

Les principaux défauts de qualité:

Le tableau suivant présente les préoccupations de qualité d'une usine d'eau minérale cliente de la Société GEBO Automatique. Cet exemple est représentatif des défauts de qualité les plus fréquents d'une ligne d'embouteillage. Nous y retrouvons alors les différents critères exposés ci-dessus.

défauts de remplissage	défauts de bouchage	défauts d'étiquetage
sous-remplissage	absence bouchon	absence étiquette
sur-remplissage	vissage insuffisant	étiquette en drapeau (décollée)
	casquette (bouchon vissé de travers)	coin corné
	bague d'inviolabilité coincée sous bouchon	recouvrement décalé
	sur-bouchage (membrane plastique thermo-rétractée sur bouchon)	
	absent	
	sur-bouchage mal positionné	

Figure I.9 : Les préoccupations de qualité d'une usine d'eau minérale

Notre expérience dans plusieurs usines nous montre qu'actuellement la fréquence moyenne d'apparition d'un défaut de qualité est assez variable, nous pouvons toutefois considérer qu'en

moyenne elle est de l'ordre de 0.1% de la totalité des bouteilles produites par machine d'embouteillage (si l'on tient compte de l'ensemble des défauts spécifiés dans le tableau ci-dessus), soit au total environ 0.3% si nous considérons la qualité du remplissage, du bouchage et de l'étiquetage.

Compte tenu des cadences très importantes de production, allant de 10000 à 80000 bouteilles/heure, cette proportion de défauts représente en moyenne 120 bouteilles défectueuses par heure (pour une cadence moyenne de 40000 bout./h), ce qui est assez considérable et représente une perte financière non négligeable sur un an de production.

Aussi, la réduction du nombre de ces défauts fait partie des objectifs principaux de nos travaux de recherche.

3.4 - Le procédé d'embouteillage et les causes de sa variabilité

Le procédé d'embouteillage, comme tout procédé de fabrication, est un ensemble d'éléments agissant de manière simultanée pour l'obtention d'un produit. Ces éléments connus sous l'appellation des 5 M, sont:

- Les Matières premières
- Les Moyens de production (machines de fabrication, systèmes de transfert de produits, ...)
- La Main d'oeuvre, les opérateurs de production
- Le Milieu (chaleur, poussières, bruit, humidité, ...)
- Les Méthodes de conduite du procédé

Comme l'illustre la figure suivante, chacun de ces facteurs possède une variabilité propre qui contribue à la variabilité du procédé.

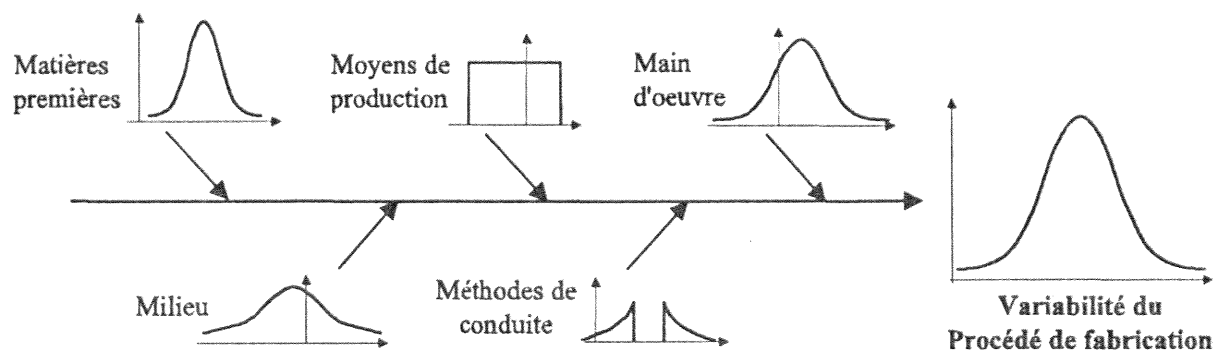


Figure I.10 : Causes de variabilité du procédé

Notre objectif étant de maîtriser la variabilité de chaque machine du procédé d'embouteillage, nous avons identifié pour chacune d'elles les causes potentielles de variabilité suivant cette décomposition des 5M.

Dans ce mémoire, nous présentons le cas de la soutireuse, à partir duquel nous étendrons notre analyse aux autres machines (boucheuse, étiqueteuse).

Pour la soutireuse, le diagramme simplifié de décomposition des 5M, que nous explicitons ci-après, est le suivant:

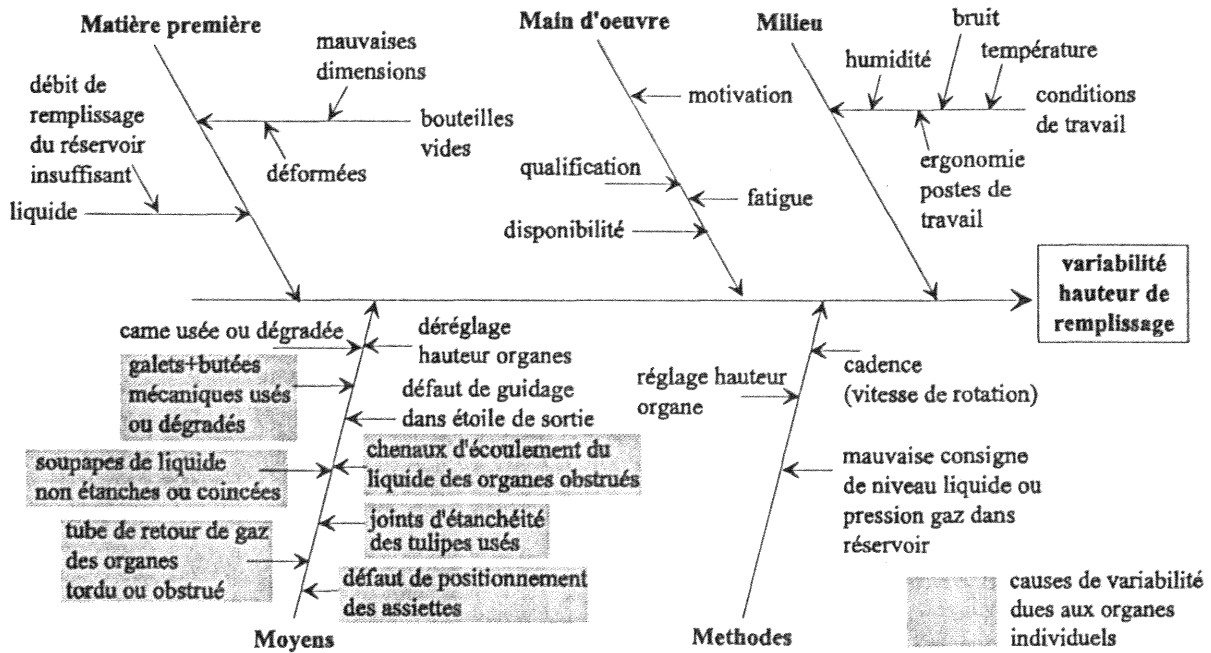


Figure I.11 : Causes de variabilité d'une soutireuse

Reprenons alors chaque composante de ce diagramme.

3.4.1 - Les Moyens et Méthodes de production

Chacune des machines (soutireuse, boucheuse, étiqueteuse) fonctionne sous la forme d'un carrousel se décomposant en un nombre assez important d'organes de fabrication effectuant chacun les mêmes opérations sur une bouteille différente (figure I.8). Le nombre d'organes dépend de divers paramètres mais nous pouvons prendre comme valeurs indicatives moyennes: 75 pour une soutireuse, 15 pour une boucheuse et 25 pour une étiqueteuse.

Présentons ici de manière sommaire le fonctionnement d'une soutireuse.

Il existe divers types de soutireuses dont certains plus perfectionnés que d'autres, nous nous limiterons dans le cadre de ce mémoire aux machines que nous avons le plus souvent rencontrées, c'est à dire aux soutireuses dites "à contre-pression".

Le fonctionnement de ces machines, décrit ci-après, est illustré par les figures suivantes:

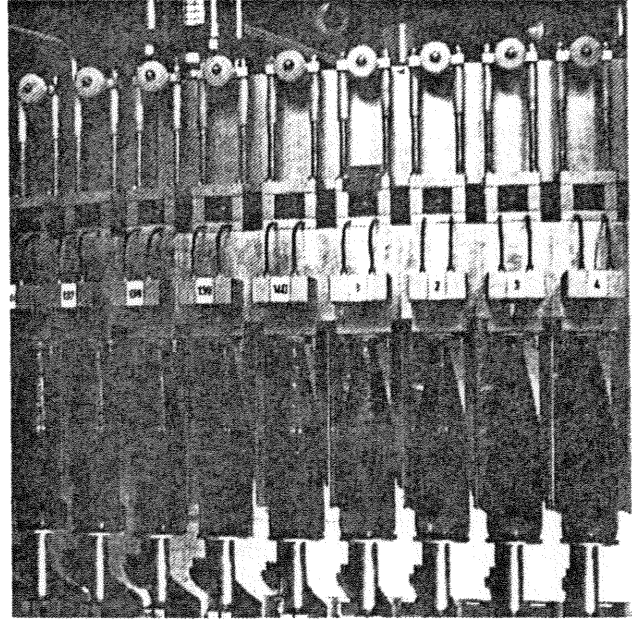
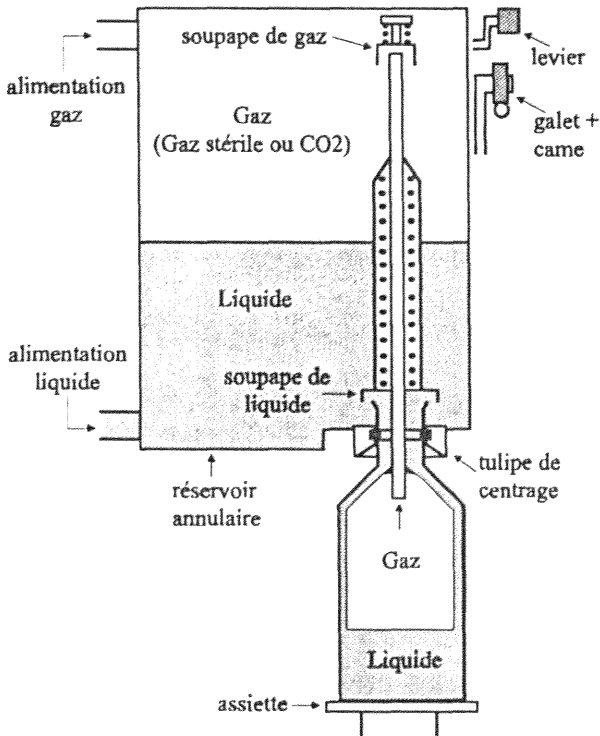


Figure I.12 : L'étape de remplissage réalisée par un organe de souflage

Figure I.13 : Photo de bouteilles en phase de souflage

Le souflage d'une bouteille s'effectue suivant 4 étapes principales s'exécutant pendant la rotation de la machine.

1 - La mise en position de la bouteille

Lorsqu'une bouteille arrive dans la soufrière, elle est maintenue entre une assiette et une tulipe de centrage. Le mouvement ascendant de l'assiette, commandé par un dispositif mécanique de galet glissant sur une came, vient appuyer la bouteille contre la soupape de liquide, assurant ainsi l'étanchéité par l'intermédiaire d'un joint.

2 - La mise en pression

Alors que la soupape de liquide est toujours fermée, la soupape de gaz s'ouvre et le gaz contenu dans le réservoir annulaire (gaz stérile ou CO₂) pénètre dans la bouteille jusqu'à l'obtention d'un équilibre de pression entre l'intérieur de la bouteille et le réservoir. Notons qu'avant cette étape de mise en pression, il est fréquent qu'un vide soit créé dans la bouteille afin d'éviter que de l'air ambiant ne se mélange avec le gaz du réservoir.

3 - Le remplissage (figure I.12)

La soupape de liquide s'ouvre et le liquide du réservoir s'écoule le long de la paroi de la bouteille, alors que le gaz contenu dans celle-ci reflue dans le réservoir.

Les soupapes de gaz et de liquide sont pilotées par des mécanismes à base de ressorts et de leviers actionnés mécaniquement par butées et cames lors de la rotation de la machine.

4 - La fin du soutirage

Le remplissage s'arrête lorsque le niveau liquide dans la bouteille atteint l'orifice du tube de retour de gaz.

Le réglage de la hauteur de remplissage sur cette machine s'effectue alors en modifiant la position en hauteur des tubes de retour de gaz, donc des organes de soutirage (appelés canules). Ceux-ci étant liés mécaniquement, seul un réglage commun à tous les organes est possible par action manuelle.

Une fois remplies, les bouteilles sont ensuite amenées par une "étoile" (élément mécanique entraînant les bouteilles à l'entrée et à la sortie d'une machine d'embouteillage) dans la boucheuse.

Suite à cette description, nous pouvons mettre en évidence les sources potentielles de variabilité de hauteur de remplissage dues au moyen (la machine) et aux méthodes de production.

- **Les Moyens**

En ce qui concerne les moyens, nous pouvons distinguer d'une part des causes de variabilité pouvant apparaître sur un ou plusieurs organes particuliers, représentées en parties grisées sur la figure I.11, comme par exemple l'usure de joints d'étanchéité de tulipes de centrage, ou un dérèglement dans les mécanismes de galets et butées d'actionnement des soupapes.

D'autre part, il apparaît des causes générales à la machine (parties non grisées sur la figure I.11), influant de manière commune sur tous les organes, donc sur toutes les bouteilles produites. Parmi ces causes, nous pouvons citer par exemple: un dérèglement progressif de la hauteur des canules de soutirage; un défaut de la came d'entraînement des assiettes; ou un mauvais guidage des bouteilles non bouchées dans l'étoile de sortie de la soutireuse, engendrant des secousses et des pertes de liquide.

La boucheuse et l'étiqueteuse étant composées également d'organes de fabrication, les causes de variabilité d'une machine d'embouteillage peuvent ainsi provenir de deux types d'éléments:

- Les organes de fabrication, éléments particuliers caractérisés par un certain degré d'indépendance. Un dérèglement ou dysfonctionnement de certains organes entraînera alors des variations de qualité uniquement pour les bouteilles produites par ces derniers.
- Les éléments généraux à la machine qui sont les réglages et paramètres de marche communs à tous les organes. Une variation d'un de ces éléments, entraînera alors une dérive de qualité pour tous les produits fabriqués.

Cette décomposition en deux types d'éléments est importante car elle nécessitera de définir des méthodes et outils permettant, d'une part de détecter des variations causées par des dérèglages ou dysfonctionnements soit des éléments particuliers soit des éléments généraux, puis de diagnostiquer quel type d'élément est à l'origine des défauts de qualité.

Nous noterons néanmoins que dans le cas d'une étiqueteuse, les causes pouvant provenir des organes de fabrication sont plus limitées car ceux-ci ont uniquement pour rôle d'entraîner la bouteille en rotation sur elle-même.

- **Les Méthodes**

Les causes de variabilité dues aux méthodes de production sont pour la plupart communes à l'ensemble de la machine. Ce sont par exemple, dans le cas d'une soutireuse, les réglages initiaux de hauteur des organes, les cadences de production qui vont influencer sur le temps disponible pour le remplissage et nécessiter des débits d'alimentation du réservoir plus importants.

3.4.2 - La Main d'œuvre

Nous pouvons considérer la main d'œuvre comme composée des opérateurs de production, chargés de la surveillance d'une ou plusieurs machines, ainsi que du personnel de maintenance amené à intervenir sur le procédé en cas de problème.

Outre l'influence de la qualification, de la motivation et de l'état de fatigue du personnel de main d'œuvre sur la conduite et le réglage du procédé, et donc sur la qualité des produits, sa disponibilité est un facteur déterminant pour la maîtrise du procédé d'embouteillage.

En effet, les réactions de l'opérateur de production à tout aléa doivent être rapides, étant donné les cadences de production très importantes. Et dans la pratique, nous avons pu constater que de nombreux petits aléas se produisent, monopolisant l'attention de l'opérateur. Celui-ci, bien qu'ayant un rôle important à jouer dans la maîtrise du procédé, car il est la seule personne en contact direct et permanent avec celui-ci, ne pourra donc consacrer que très peu de son temps au suivi de la qualité.

Il sera donc nécessaire d'utiliser des moyens et méthodes visant à limiter et à faciliter sa tâche dans le cadre de la maîtrise du procédé d'embouteillage.

3.4.3 - Les Matières premières

Dans le cas de la soutireuse, les matières premières sont les bouteilles vides et le liquide de remplissage. Le débit d'alimentation de ce dernier doit être suffisant pour suivre les cadences de remplissage. Quant aux bouteilles vides, elles doivent respecter des dimensions et formes assez précises, la soutireuse étant réglée pour un format spécifié.

Dans le cas de la boucheuse et de l'étiqueteuse nous retrouvons la même contrainte de conformité des matières premières (bouchons, membrane de sur-bouchage pour la boucheuse; étiquettes, colle pour l'étiqueteuse), ces machines étant toutes réglées pour des caractéristiques précises de ces éléments de base.

Par exemple, nous avons eu l'expérience, dans une usine d'eau minérale, d'un nombre très conséquent de défauts de bouchage dus à un changement de fournisseur de bouchons.

L'influence des matières premières est peu aisée à détecter de manière instantanée. Aussi, sa mise en évidence nécessitera de fournir, au service assurance qualité, les données permettant le diagnostic à posteriori de telles causes de variabilité.

3.4.4 - Le Milieu

Dans le cas d'une soutireuse, le milieu n'a d'influence que sur les conditions de travail des opérateurs, se répercutant naturellement sur leur conduite du procédé. Cette source de variabilité ayant une action très faible et constante, il sera très difficile de la mettre en évidence.

Par contre, la chaleur et l'humidité peuvent rendre la phase d'étiquetage plus délicate comme nous avons pu le constater à plusieurs reprises. L'influence de ces paramètres étant, comme pour le cas des matières premières, difficile à mettre en évidence de manière instantanée, il est donc nécessaire de pouvoir récupérer les données permettant de diagnostiquer à posteriori ces variations du milieu.

3.5 - Les contraintes engendrées par les cadences élevées de production

Un procédé d'embouteillage est fortement automatisé, sa caractéristique essentielle est sa très grande cadence de production allant de 10 000 à 80 000 bouteilles à l'heure selon le type de produit et la contenance des bouteilles, soit une moyenne d'environ 11 produits à la

seconde. Cette cadence de production très élevée engendre des contraintes fortes pour la gestion de la qualité et la maîtrise du procédé [COL96c] :

- **Impératif de suivi temps réel du procédé**

Une dérive du procédé peut alors provoquer très rapidement la fabrication d'un nombre conséquent de produits non conformes. Aussi, il est impératif de réduire au maximum l'inertie de réaction en détectant au plus tôt toute variabilité anormale du procédé et en réagissant rapidement dès sa détection.

L'aspect temps réel dans le suivi de la qualité de ce type de procédé est donc un impératif.

Par exemple, un procédé produisant 11 pièces à la seconde et soumis à un dérèglement, mettra probablement moins d'une minute à fabriquer des produits de qualité inacceptable, et au bout de 2 minutes, au moins 660 produits non conformes auront été fabriqués. Les coûts de non qualité engendrés par un dysfonctionnement ou dérèglement du procédé peuvent donc devenir très rapidement importants.

- **Importance du nombre de données à traiter**

Une cadence de production élevée signifie également une quantité importante de données à gérer pour le suivi de la qualité. Aussi, un système automatisé de collecte et de traitement des données est indispensable.

- **Besoin de systèmes d'inspection performants**

Nous avons vu la nécessité d'inspecter la production à 100%. Des moyens automatisés d'inspection et de tri des produits, ayant de grandes vitesses de traitement ainsi que des temps de réponse très faibles, sont donc nécessaires.

3.6 - La gestion actuelle de la qualité en embouteillage et ses lacunes

Notre expérience dans plusieurs usines d'embouteillage ainsi que l'interview de responsables qualité de celles-ci, nous montrent qu'actuellement, la qualité du procédé d'embouteillage est gérée essentiellement de manière curative selon trois constantes de temps différentes:

3.6.1 - Gestion en temps réel

En temps réel, la qualité est contrôlée uniquement par une inspection en ligne des produits fabriqués, suivie d'une élimination du flux des produits déterminés non conformes. Cette inspection s'effectue, soit à la volée par des opérateurs humains, soit par des systèmes automatisés, ou encore par ces deux moyens combinés.

Or, nous avons vu précédemment l'insuffisance de cette démarche pour garantir une qualité livrée maximale, et l'impératif d'une maîtrise temps réel du procédé.

De plus, afin de garantir le niveau de qualité exigé, les limites de refus du produit sont généralement resserrées d'une valeur plus ou moins arbitraire par rapport aux limites de non conformité réelles. Les limites de refus ainsi définies provoquent alors le rejet de produits conformes alors qu'elles ne devraient être que des seuils d'alerte.

3.6.2 - Gestion à court terme

Dans certaines unités de production parmi les plus importantes, des procédures de contrôle du procédé et surtout de la qualité des produits conditionnés ont été mises en place, celles-ci sont décrites ci-après. Les résultats de ces contrôles, ainsi que les observations sur le fonctionnement ou l'état du procédé, sont consignés sur des feuilles d'auto-contrôle transmises ensuite au service d'assurance qualité.

- **Contrôle du procédé**

Les procédures de contrôle du procédé consistent à effectuer, lorsque la production est à l'arrêt, un entretien de base de celui-ci et à vérifier le bon fonctionnement des composants critiques.

- **Contrôle des produits**

Les procédures de contrôle des produits sont basées sur le relevé manuel aux différents stades du procédé, à une fréquence d'environ 10 bouteilles par heure, de l'état bon ou mauvais des caractéristiques de qualité ou au mieux des mesures de celles-ci. Dans le cas de relevé de mesures, l'opérateur trace petit à petit un histogramme et regarde si celui-ci est centré par rapport aux tolérances. Dans le cas du relevé d'attributs, l'opérateur compare le nombre d'éléments non conformes avec différents seuils d'alerte fixés. Dans ces deux cas, la procédure indique ensuite à l'opérateur l'action à entreprendre en fonction des résultats.

Nous remarquerons que la fréquence d'échantillonnage de 10 bouteilles par heure est bien trop faible devant l'importance des cadences de production, et que la méthode de suivi de la qualité employée est peu efficace. En effet, pour tracer un histogramme, il faut un échantillon d'au moins 50 données pour être représentatif de la production [LAM89]. Aussi, en respectant cette taille d'échantillon, avec un prélèvement de 10 bouteilles par heure nous ne pouvons nous rendre compte d'un dérèglement du procédé qu'après 5 heures de production, soit après une moyenne de 200000 bouteilles fabriquées.

Ce mode de suivi de la qualité ne permet donc pas de mettre en évidence suffisamment tôt la majeure partie des dérives de qualité. Il est alors difficile de planifier et de mettre en oeuvre des actions de maintenance préventive visant à réduire de manière significative le nombre moyen de produits non conformes.

Les actions de maintenance effectuées sont ainsi essentiellement curatives. Elles sont déclenchées après fabrication d'un nombre de produits défectueux jugé trop important, et nécessitent des arrêts imprévus de production. Notre expérience dans diverses usines d'embouteillage nous montre que ces arrêts de production pour cause de dérèglement ou de dysfonctionnement du procédé sont en général assez fréquents, et compte tenu des cadences importantes de fabrication, la perte de production engendrée par chacun d'eux se chiffre en plusieurs milliers de bouteilles.

3.6.3 - Gestion à moyen et long terme

Avec une fréquence variable, et au mieux une fois par jour, un contrôle de type contrôle de réception est effectué. Celui-ci consiste en une inspection partielle du lot des produits récemment fabriqués, réalisée hors ligne avant stockage.

Or, nous avons montré qu'une telle inspection par échantillonnage ne permet pas de garantir la qualité des produits livrés (cf. §2.2.1). De plus, la proportion d'éléments inspectés est trop faible pour obtenir une efficacité suffisante du contrôle, "*le nombre de produits à inspecter est trop important pour un contrôle humain*" nous a fait remarquer un responsable qualité.

Par ailleurs, une réunion journalière a lieu entre les responsables des différentes lignes de fabrication et un animateur qualité afin d'étudier les dysfonctionnements précédemment observés et de définir des actions à mener.

Puis mensuellement, ou de manière extraordinaire lorsque des réclamations clients se sont fait entendre, une réunion du service d'assurance qualité analyse les différents relevés de données consignés sur les fiches d'auto-contrôle et tente de diagnostiquer les problèmes de qualité.

Ici encore, la fréquence d'analyse des données qualité est trop faible par rapport à la cadence de production. Remarquons par ailleurs, que cette analyse se fait généralement sans méthode précise, son efficacité est alors basée essentiellement sur l'appréciation des personnes et sur leur expérience.

3.6.4 - Constat sur la gestion actuelle

En conclusion, nous constatons que la gestion actuelle de la qualité en embouteillage est caractérisée par :

- Une démarche exclusivement curative.
- Des fréquences de prélèvements et d'analyses de données de qualité trop faibles.
- Un manque de méthodes et d'outils appropriés de suivi et de maîtrise du procédé.

Cette gestion permet alors au mieux d'éviter dans certains cas les catastrophes de productions en masse de bouteilles défectueuses en détectant les dérèglages importants des différentes machines.

Elle ne constitue pas une réelle maîtrise du procédé, et ne permet alors pas une réduction significative des pertes financières occasionnées non seulement par les bouteilles défectueuses fabriquées, mais également par les pertes de production dues aux arrêts imprévus de la ligne de conditionnement pour actions de maintenance curative.

D'autre part, ce mode de suivi des caractéristiques de qualité ne permet pas une réduction aisée des coûts évoqués précédemment dus à un sur-remplissage des bouteilles (cf. §3.3).

Aussi, l'interview de plusieurs responsables qualité d'usines d'embouteillage, ainsi que notre expérience, nous montrent une préoccupation actuelle grandissante d'améliorer cette gestion de la qualité.

4 - Conclusion

L'amélioration de la qualité en embouteillage nécessite la complémentarité entre, d'une part une inspection à 100% des produits, et d'autre part une maîtrise du procédé de fabrication.

Le procédé d'embouteillage présente des caractéristiques particulières engendrant des contraintes fortes pour la réalisation de cet objectif. Ces caractéristiques sont:

- Une variabilité importante dont les sources proviennent, d'une part d'éléments particuliers, les organes de fabrication, et d'autre part d'éléments généraux aux machines, les paramètres de marches et réglages communs, ainsi que l'influence du milieu et des matières premières.
- Des cadences de production très importantes, nécessitant un suivi en temps réel de la variabilité du procédé, et générant un grand nombre de données à traiter pour réaliser ce suivi.

Aussi, en tenant compte de ces contraintes, et au regard du manque d'efficacité de la démarche actuelle de gestion de la qualité, nous proposons:

- D'une part, de définir et mettre en place une méthode et des outils de gestion préventive de la qualité.
Nous appliquerons dans cette optique la méthode de Maîtrise Statistique des Procédés (MSP) au procédé d'embouteillage.
- Et d'autre part, devant le flux important d'informations et le peu de disponibilité des moyens humains, d'optimiser et d'informatiser certaines fonctions à des fins de réactions temps réel dans la ligne de production, et d'analyses pour améliorations à posteriori par le service assurance qualité.
Pour cela, nous définirons et mettrons en oeuvre un système automatisé de maîtrise de la qualité du procédé d'embouteillage, ce système aura également pour fonction l'inspection et le tri des produits.

La mise en oeuvre de ces méthodes et moyens devrait permettre une réduction significative, d'une part du nombre de produits défectueux s'élevant actuellement à plusieurs dizaines voire plus d'une centaine par heure, et d'autre part des arrêts imprévus du procédé pour actions de maintenance curative dont chacun d'eux engendre des pertes de production se chiffrant à plusieurs milliers de bouteilles. De plus, la maîtrise du niveau de sur-remplissage devrait amener à long terme un gain financier non négligeable.

Chapitre II :

Outils Statistiques pour la Maîtrise des Procédés Discontinus à Haute Cadence, Cas du Procédé d'Embouteillage

1 - Introduction

Tout procédé de fabrication varie, évolue, il est alors nécessaire de suivre son comportement de manière préventive, afin de reconnaître les signes annonciateurs d'une variation anormale avant que des défauts ne soient fabriqués.

Les opérateurs, ayant une grande expérience de leur procédé, ont généralement une action de prévention basée sur leur perception et leur appréciation plus ou moins subjective du fonctionnement des machines. Les décisions de réglage se prennent alors sans que l'on puisse savoir si elles sont pertinentes; certains ont tendance à régler trop tôt alors que d'autres agissent trop tard [SOU86].

La Méthode de Maîtrise Statistique des Procédés (MSP) permet de réaliser cette démarche de suivi préventif en s'appuyant sur des outils et méthodes statistiques. Ces derniers permettent de dégager des indicateurs objectifs du comportement du procédé à partir de données prélevées sur les produits fabriqués.

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord la démarche générale de la MSP, puis les caractéristiques de variabilité du procédé d'embouteillage. Nous étudions ensuite les outils statistiques existants correspondant à ces caractéristiques, outils que nous expérimenterons sur une machine d'embouteillage. Nous proposons pour finir une stratégie d'utilisation de ces divers outils pour la maîtrise d'un procédé d'embouteillage.

2 - La Maîtrise Statistique des Procédés

2.1 - La variabilité du procédé

Comme nous l'avons précisé auparavant, la variabilité du procédé est due à la somme des variabilités des 5 M le composant.

Il existe deux types de causes à cette variabilité, les causes aléatoires et les causes assignables.

2.1.1 - Les causes aléatoires ou causes communes

Ces causes sont les nombreuses petites sources de variation que l'on peut imputer au hasard, elles ne sont donc pas clairement identifiables. Ces causes sont à l'origine de la dispersion intrinsèque du procédé. Celles-ci ne peuvent jamais être totalement supprimées mais on peut en réduire le nombre ou leur importance globale.

L'action de ces causes étant permanente et constante, il est possible de la modéliser par une loi statistique (voir description des lois en 2.1.3). Leur influence sur le procédé devient alors prévisible.

Un procédé ayant une variabilité provoquée uniquement par les causes aléatoires sera dit stable, ou sous contrôle, et l'on parlera alors de variabilité naturelle.

Par ailleurs, si la variabilité naturelle du procédé permet à celui-ci de fabriquer les produits à la qualité requise, on dira que ce procédé est capable (définition précise de la capabilité en 2.2.1).

La variabilité naturelle augmente progressivement avec le temps, caractérisant l'usure et le vieillissement du procédé, et se traduisant par un accroissement de la dispersion des caractéristiques observées.

2.1.2 - Les causes spéciales ou causes assignables

Ces causes sont identifiables et provoquent des variations plus importantes pouvant se traduire, comme l'illustre la figure suivante, soit par un décalage de la tendance centrale, soit par une augmentation de la dispersion, ou par ces deux effets simultanés.

Il sera donc nécessaire de suivre ces deux paramètres.

Dans le cas de décalage de la tendance centrale, pour recentrer la production, il suffit souvent d'un réglage du procédé. Le cas de variation de la dispersion est généralement plus grave car il montre un fonctionnement erratique du procédé, il est alors primordial de réagir au plus vite [PIL89].

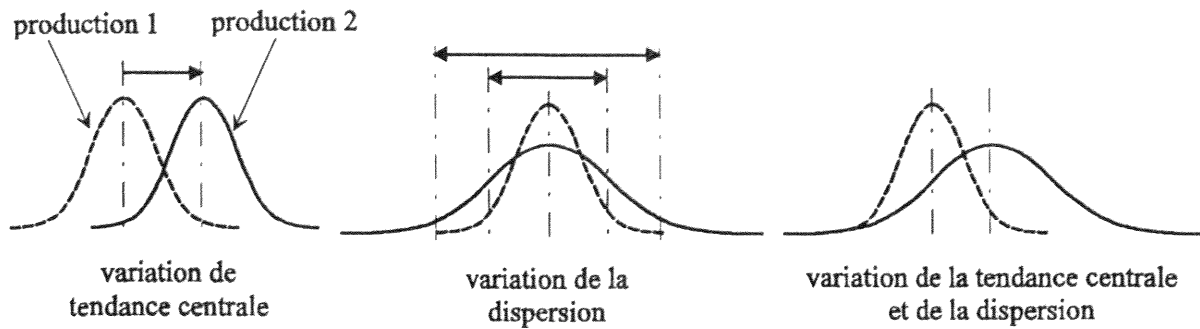


Figure II.1 : Les effets des causes assignables

Les causes assignables sont souvent irrégulières et donc imprévisibles, il est alors essentiel de les identifier et de les supprimer afin que celles-ci ne réapparaissent plus.

Un procédé ayant une variabilité due à des causes assignables est dit instable.

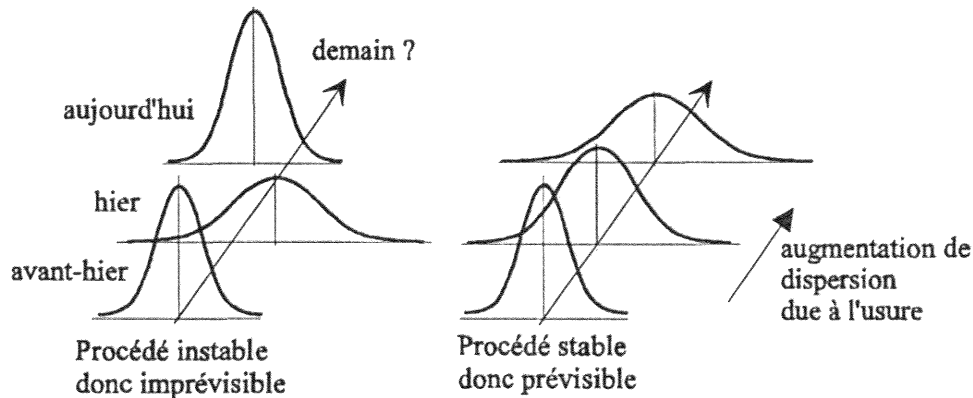


Figure II.2 : Procédés stables et instables

2.1.3 - Loi de référence du procédé

Afin de pouvoir détecter les instabilités dues aux causes assignables, il faut donc tout d'abord déterminer la loi statistique permettant de modéliser la variabilité naturelle du procédé.

La grande majorité des processus physiques suivent une loi de distribution de Gauss, dite loi normale. En effet, les conditions de Borel nous indiquent qu'une grandeur subissant l'influence de divers facteurs suit une loi de Gauss à condition que [VAN85]:

- chaque cause de perturbation ait individuellement un effet indépendant, l'effet global est alors la somme des effets individuels,
- les causes de perturbation soient nombreuses,
- une cause n'ait pas un effet prépondérant par rapport aux autres.

Souvent, le fait qu'un procédé ne présente pas une distribution normale est uniquement significatif de la présence d'instabilités, sauf dans le cas de procédés particuliers se comportant réellement suivant une autre loi.

Parmi ceux-ci, nous pouvons citer par exemple les procédés générant des caractéristiques de concentricité ou de coaxialité se distribuant suivant une loi de Rayleigh [SOU86]. La loi de Weibull [SCH84][MIT94] est également fréquemment appliquée pour ces procédés particuliers car elle a l'avantage de pouvoir approximer un grand nombre de distributions.

Pour vérifier l'hypothèse de normalité, divers tests sont disponibles. Les plus connus sont le test du khi-deux ou test de Pearson, et le tracé de la droite de Henry appelé également test d'anamorphose de Galton. Le test de Shapiro-Wilk est légèrement plus complexe d'utilisation, quant à celui de Kolmogoroff-Smirnow, il permet de calculer des indicateurs d'asymétrie (appelé Skewness) et d'aplatissement (Kurtosis) de la courbe de distribution.

Les caractéristiques du procédé d'embouteillage correspondent tout à fait aux conditions d'obtention d'une loi de Gauss présentées ci-avant, néanmoins nous vérifierons sa normalité par une phase d'expérimentation présentée au paragraphe 7.1.2 de ce chapitre.

2.2 - La démarche de maîtrise du procédé de fabrication

La démarche de maîtrise du procédé passe par trois étapes principales comme le montre la figure suivante. Ces étapes, détaillées dans les paragraphes suivants, sont:

- 1 - L'étape préliminaire d'étude du procédé qui permet la constitution d'une base de connaissances de celui-ci.

- 2 - La mise sous contrôle qui vise à éliminer les causes assignables et à vérifier si le procédé est capable.

- 3 - La surveillance et l'amélioration du fonctionnement du procédé qui a pour objectif de le maintenir stable et d'accroître sa performance.

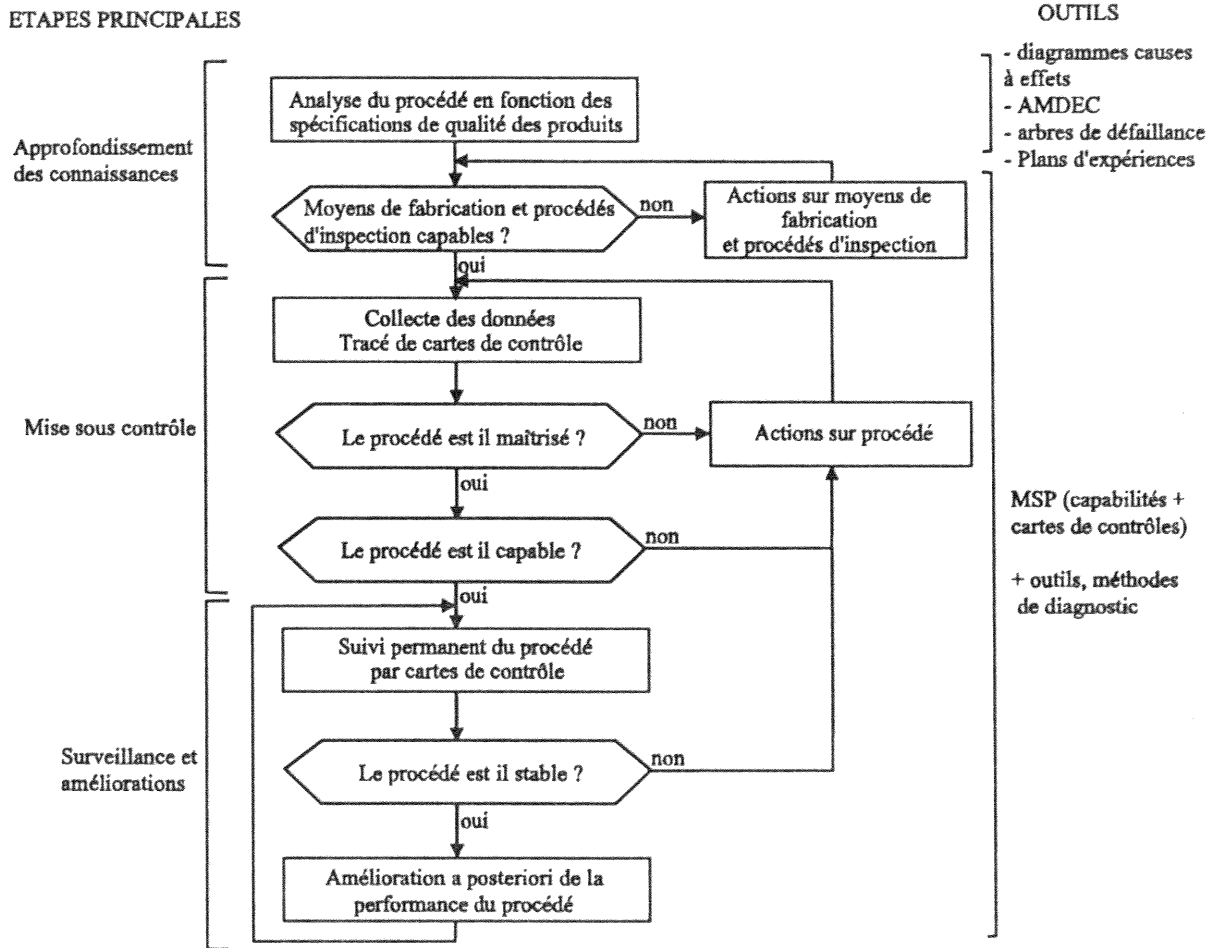


Figure II.3 : La démarche de maîtrise du procédé de fabrication

2.2.1 - Etude préliminaire, approfondissement des connaissances

- **Constitution d'une base de connaissances du procédé**

Avant de vouloir régler et améliorer le fonctionnement d'un procédé, il est indispensable de l'étudier afin d'établir une base de connaissances de celui-ci. Cette étude a pour objectif de déterminer d'une part les paramètres influents du procédé sur les caractéristiques de qualité des produits, et d'autre part d'identifier les causes potentielles de non qualité.

Pour réaliser cela, divers outils sont disponibles, dont le plus simple et le moins puissant est le diagramme de causes à effets d'Ishikawa [ISH84].

Les AMDEC procédé (outil d'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets, et de leur Criticité), ou FMECA en anglais (Failure Mode, Effect and Criticality Analysis) [AFI90], permettent d'obtenir une analyse plus fine. Ils consistent à décomposer un procédé en sous-systèmes successifs et à identifier les risques et défauts dus à chacun d'entre eux, puis à déterminer les probabilités d'occurrence des défaillances et leur gravité.

Quant à la méthode des arbres de défaillance, elle consiste à identifier toutes les combinaisons d'événements possibles entraînant la réalisation d'un effet indésirable sur le procédé [ZWI95]. L'analyse pourra être ensuite affinée par une approche plans d'expériences [SNE94][SOM92], qui permet, dans le cas de procédés plus complexes, de déterminer l'influence de paramètres en réalisant un nombre réduit d'essais planifiés suivant une méthodologie précise.

- **Etude de la capabilité des moyens de fabrication**

Par ailleurs, il est également nécessaire dans cette phase préliminaire de vérifier si les moyens de fabrication sont aptes à fabriquer les produits en respectant les spécifications de qualité. Pour cela on calcule l'indice de capabilité machine, qui indique l'importance de la dispersion de la machine par rapport à l'intervalle de tolérance. Nous rappelons ici son expression dans le cas d'une distribution normale:

$$C_m = \frac{T_s - T_i}{6,18 \cdot \sigma'_i}$$

où \Leftrightarrow T_s et T_i sont les tolérances supérieures et inférieures de la caractéristique fabriquée
 \Leftrightarrow σ'_i est l'écart type instantané estimé à partir d'au moins 50 mesures x_j de la caractéristique, selon la formule:

$$\sigma'_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{où } n \text{ est le nombre de mesures}$$

Les mesures doivent être prises pendant un fonctionnement stabilisé de la machine, et sur un intervalle de temps suffisamment court afin de ne prendre en compte que sa dispersion naturelle, en dehors de toute variation des autres facteurs de production (milieu, méthodes,...).

On pourra également calculer l'indice C_{mk} qui tient compte du centrage de la dispersion de la machine:

$$C_{mk} = \min\left(\frac{T_s - \bar{x}}{3,09 \cdot \sigma'_i}, \frac{\bar{x} - T_i}{3,09 \cdot \sigma'_i}\right)$$

La condition de capabilité, fixée par le service Assurance Qualité, est généralement $C_m > 1.33$ ou $C_{mk} > 1.33$ suivant l'indice choisi.

- **Etude de la capabilité des procédés d'inspection**

Il est essentiel de vérifier que les procédés d'inspection qui vont être utilisés pour mesurer les divers paramètres à surveiller sont aptes à remplir cette tâche. En effet, l'erreur sur la mesure doit être suffisamment faible pour ne pas fausser notre perception du comportement du processus de fabrication.

Pour déterminer la capabilité des procédés d'inspection, il faut non seulement tenir compte de

la variabilité intrinsèque du moyen de contrôle, mais également de celle engendrée par les conditions d'inspection.

La méthode la plus simple consiste à calculer tout d'abord l'Incertitude sur la Mesure (indice IM), exprimée en termes d'exactitude (ou justesse), de répétabilité et de reproductibilité. Son expression à un niveau de confiance de 99.8% est:

$$IM = |E| + 6,18 \cdot \sqrt{\sigma'_M{}^2 + S_E{}^2}$$

- où
- ⇨ E est l'exactitude de la mesure, S_E l'erreur estimée de l'exactitude
 - ⇨ σ'_M est la dispersion estimée de la mesure dans laquelle intervient la répétabilité et la reproductibilité

Pour déterminer ces divers paramètres, nous trouverons une description de la méthode communément admise dans l'ouvrage de JI. Vachette [VAC90] ou dans l'article de G. Phung [PHU93].

La condition de capabilité du procédé d'inspection est généralement: $\frac{T_s - T_i}{IM} \geq 4$

2.2.2 - Mise sous contrôle

- **Elimination des causes assignables**

La mise sous contrôle du procédé vise, essentiellement par le tracé de cartes de contrôle (détaillées au paragraphe 4), à détecter la présence de causes assignables en observant les variations de la tendance centrale et de la dispersion des caractéristiques de qualité observées. Puis, par des méthodes et outils de diagnostic (présentés au chapitre III), et à partir des connaissances recueillies dans la phase préliminaire d'étude du procédé, ces causes sont identifiées et éliminées.

La méthode qui s'attache à surveiller les variations du procédé est la MSP (Maîtrise Statistique des Procédés), que l'on peut également trouver sous son appellation anglaise SPC (Statistical Process Control). Cette méthode est l'objet de nombreux documents parmi lesquels nous pouvons citer [LAM89][VAC90], ainsi que la norme française NF X06-030 [AFN92].

- **Etude de la capabilité du procédé**

Lorsque le procédé est stable on peut vérifier par le calcul de capabilités procédé s'il est apte à fabriquer les produits en respectant les spécifications de qualité. Pour cela on calcule les indices de capabilité C_p et C_{pk} selon des formules semblables à C_m et C_{mk} :

$$C_p = \frac{T_s - T_i}{6,18 \cdot \sigma'_0} \quad C_{pk} = \min\left(\frac{T_s - \bar{x}}{3,09 \cdot \sigma'_0}, \frac{\bar{x} - T_i}{3,09 \cdot \sigma'_0}\right)$$

avec les conditions généralement employées: $C_p > 1.33$ ou $C_{pk} > 1.33$

σ'_0 est l'écart type estimé indiquant la dispersion de l'ensemble du procédé, il doit tenir compte ici de la variabilité engendrée par l'influence des 5M, et non pas uniquement de celle émanant des moyens comme dans le cas de la détermination de la capabilité machine.

Pour calculer σ'_0 on peut utiliser la même formule que pour σ'_i , mais on choisira un nombre plus important de mesures, relevées sur un intervalle de temps suffisamment grand pendant lequel les 5M ont présenté des variations entrant dans le cadre des causes communes.

Une autre méthode, qui est plus couramment employée, est de prélever plusieurs échantillons composés chacun d'un nombre n de valeurs, on obtient alors:

$$\sigma'_0 = \frac{\bar{\sigma}_x}{b_n}$$

- où
- ⇨ $\bar{\sigma}_x$ est la moyenne des écarts types des échantillons
 - ⇨ b_n est une constante, déterminée en fonction de n à partir de la loi du χ^2 déterminant la distribution des écarts types $\bar{\sigma}_x$, on trouvera les valeurs de b_n dans les ouvrages sur la MSP cités précédemment.

Cette dernière méthode a l'avantage de pouvoir utiliser les prélèvements effectués pour le tracé des cartes de contrôle.

Nous noterons que d'autres indicateurs de capabilité peuvent être établis comme le propose M.Pillet [PIL93], qui définit, à partir des indices de capabilité machine et procédé, des paramètres de rendement de réglage et de rendement de maîtrise du procédé.

2.2.3 - Surveillance et amélioration

Le procédé étant stable, il faut surveiller en permanence son évolution afin de détecter toute variation due à une cause assignable et réagir de manière préventive avant la production de produits non conformes. La détection par cartes de contrôle d'une variation anormale doit alors, d'une part être un facteur d'activation d'actions de maintenance préventive conditionnelle, et d'autre part être déclencheur de modifications de la conduite du procédé.

En parallèle avec cette surveillance, des analyses hors ligne doivent être effectuées sur un horizon plus long de l'évolution du procédé. Elles permettront de détecter des variations lentes, caractéristiques d'une usure ou de l'influence de composantes telles que le milieu ou les matières premières (cf. Chapitre I), et ainsi améliorer de manière progressive et continue la performance du procédé.

2.3 - Maîtrise directe ou indirecte

Pour observer le comportement du procédé, trois alternatives sont possibles [PEU92]. La première est de suivre l'évolution des paramètres du procédé, appelée maîtrise directe, la seconde est de suivre les caractéristiques fabriquées des produits, appelée maîtrise indirecte, la troisième est un compromis entre ces deux dernières.

- **La maîtrise directe**

Le principe de la MSP étant d'assurer la qualité de l'opération de fabrication, il est plus logique de rechercher à observer l'évolution des paramètres du procédé plutôt que de suivre les caractéristiques du produit [LAM89][AFN92]. Cette démarche facilite par ailleurs grandement le diagnostic des causes de non qualité.

Cependant, les exigences du client étant la plupart du temps exprimées uniquement en termes de critères de qualité à garantir au niveau du produit, il sera nécessaire d'identifier parfaitement a priori les paramètres du procédé influant sur ces critères afin de les mettre sous contrôle.

Or, dans le cas d'un procédé complexe comme une ligne d'embouteillage, cette identification est peu aisée. Les paramètres influents sont en nombre important pour une même caractéristique du produit, une instrumentation conséquente est alors à mettre en œuvre dans des conditions souvent difficiles (machines en mouvement, humidité, vibrations,...). De plus, certains paramètres peuvent avoir des actions contraires, aussi, la dérive de l'un d'eux n'implique pas forcément une dérive de qualité du produit.

- **La maîtrise indirecte**

L'avantage de la maîtrise indirecte est qu'elle observe en premier lieu les caractéristiques du produit, ce qui correspond souvent à une demande du client qui voit l'importance dans la qualité des produits et non dans la manière de l'obtenir.

Par ailleurs, la maîtrise indirecte permet de mettre en œuvre une inspection des produits pour remplir un rôle double. D'une part l'inspection sert à suivre les caractéristiques du produit afin de détecter toute modification subie par le procédé. D'autre part, elle permet d'écarter du flux de produits, du moins partiellement, les éléments non conformes.

- **Compromis entre maîtrise indirecte et directe**

Cette troisième méthode consiste à suivre l'évolution des caractéristiques du produit, et

lorsque des dérives de qualité apparaissent, à prendre en compte des indicateurs sur l'état ou le fonctionnement du procédé pour en diagnostiquer les causes.

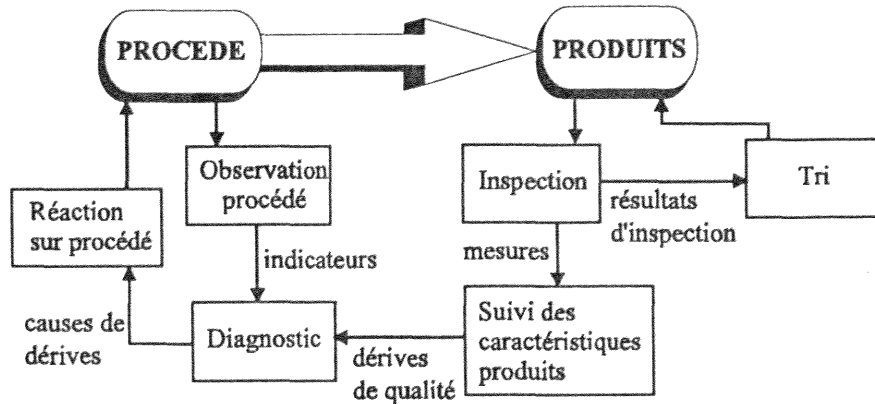


Figure II.4 : Compromis entre maîtrise directe et indirecte

Cette démarche basée sur une maîtrise indirecte du procédé permet d'améliorer grandement l'efficacité de la phase de diagnostic, aussi elle représente un bon compromis qui nous semble bien adapté notamment lorsque le procédé montre une certaine complexité.

Notre choix s'orientera donc vers cette solution pour la maîtrise du procédé d'embouteillage. Il est à noter que, étant donné que le procédé d'embouteillage est constitué de machines successives ayant des actions différentes sur le produit, il sera donc nécessaire d'appliquer cette boucle de maîtrise du procédé (figure II.4) de manière individuelle à chaque machine.

3 - La problématique d'application de la MSP aux procédés discontinus à haute cadence et au procédé d'embouteillage

Les principes de la méthode de maîtrise des procédés ayant été exposés, il faut maintenant définir les modalités de son application au processus d'embouteillage.

Dans cette optique, décrivons tout d'abord les contraintes que présentent pour le suivi de leur variabilité, d'une part les processus continus, et d'autre part les procédés discontinus à cadence peu élevée.

Nous identifierons ensuite le procédé d'embouteillage à ces deux familles de processus.

3.1 - Le suivi des procédés continus

Les procédés continus tels que les processus de fabrication de poudres, de papier ou de tissus, produisent avec un débit constant, un flux de matière non discrétisable. Ils réalisent

une transformation progressive des matières premières caractérisée par une continuité des traitements effectués.

Ce type de procédés demande un suivi très rigoureux de la qualité et permettant des réactions suffisamment rapides, car il est impossible de par le caractère continu du produit de séparer a posteriori les éléments bons des mauvais.

Les dérives de qualité observées sont pour la plupart lentes et progressives, les cartes de contrôle utilisées doivent donc permettre de détecter au plus tôt de petites variations.

3.2 - Le suivi des procédés discontinus à cadence peu élevée

Les procédés discontinus fabriquent des produits discrets en effectuant des opérations successives et séparées.

Le fait que les produits soient individualisables est un gros avantage sur les procédés continus, car il est possible de trier les produits fabriqués non conformes des produits bons.

Nous pouvons décomposer les procédés discontinus à cadence peu élevée en deux catégories:

- **Les processus nécessitant un réglage à chaque opération ou fabriquant des produits en très petites séries**

Les outils traditionnels de la MSP ne s'appliquent qu'aux productions en série de plus de 50 pièces. En dessous de ce nombre, le manque d'informations ne permet pas de modéliser de manière suffisamment juste le comportement du procédé. Aussi, une inspection à 100% suivie d'un tri des produits est souvent le seul moyen utilisé pour maîtriser la qualité de la production.

Néanmoins, nous remarquerons les travaux de recherche de M.Pillet [PIL93] qui propose une méthode de suivi statistique adaptée aux petites séries pouvant être inférieures à 20 pièces. Pour pallier le manque de produits, cette méthode est basée sur une prise en compte de toutes les pièces réalisées depuis le lancement de la série. Elle permet de déterminer à chaque nouveau produit fabriqué si le procédé est hors contrôle.

- **Les procédés fabriquant des produits en séries de tailles moyennes**

La maîtrise de la qualité de ces procédés a été déjà longuement étudiée. Les méthodes et outils traditionnels de la MSP étudiés dès 1930 par W.A. Shewhart s'appliquent tout à fait à ce type de production.

Les cadences n'étant pas très élevées, et les séries de fabrication peu importantes, la rapidité de détection des petites dérives de qualité n'est pas une contrainte forte. L'utilisation de cartes

de contrôle spécifiques permettant la mise en évidence de ces faibles variations, et utilisées principalement pour suivre les procédés continus, n'est donc pas un impératif. On se contente généralement d'employer des cartes performantes pour la détection des dérives plus importantes.

Par ailleurs, les cadences assez faibles permettent une mise en oeuvre assez aisée des outils de la MSP, et leur exploitation possible sans moyens informatisés. Ainsi, de nombreuses entreprises utilisent ces outils, souvent de manière très diversifiée [MOQ95a][MOQ95b], et obtiennent des résultats très positifs.

3.3 - Cas des procédés discontinus à haute cadence et du procédé d'embouteillage

La maîtrise des procédés discontinus à haute cadence fait l'objet de nos travaux de recherche, en effet le processus d'embouteillage fait partie de cette catégorie de procédés.

Avec l'avènement de techniques d'automatisation de plus en plus performantes et leur percée dans une grande majorité de domaines de production, cette famille de procédés tend à s'étendre. Néanmoins, peu de travaux de recherche ont été réalisés à ce jour sur la maîtrise de la qualité pour de tels processus et sur les modes de sa mise en oeuvre.

3.3.1 - Un caractère à la fois discontinu et continu

Ces procédés, fabriquant des produits discrets en réalisant des opérations successives sur les produits, ont un fonctionnement de type discontinu. Cependant, les produits étant fabriqués à hautes ou très hautes cadences, *"tout se passe comme si de la machine s'écoulait un flot ininterrompu de produits"* [TOR65]. Aussi, de par leur dynamique, ces procédés s'apparentent aux procédés continus [PAL93] [TOR65].

Nous nous trouvons alors confrontés à un type de procédé hybride, ayant à la fois un caractère discontinu et continu.

3.3.2 - Nécessité de détection des dérives lentes et rapides

- **Détection des dérives lentes**

Comme dans le cas des processus continus, il est important de détecter au plus tôt une évolution même lente du procédé. En effet, devant les cadences importantes de production, cela est nécessaire pour éviter que ce type de dérive ne provoque à terme une production massive de défectueux. Aussi, les cartes de contrôle spécifiques utilisées généralement pour

suivre les procédés continus, doivent alors également être employées pour suivre les procédés discontinus à haute cadence.

Dans le cas d'une soutireuse, les paramètres à évolution généralement lente sont principalement les éléments généraux de la machine, comme par exemple la hauteur commune des organes de remplissage.

- **Détection des dérives rapides**

Il est bien évidemment nécessaire de détecter également les variations plus rapides et plus importantes du procédé, il est alors nécessaire d'utiliser les cartes de contrôle employées pour suivre les processus discontinus à cadence peu élevée.

Les dérives rapides de qualité sont essentiellement dues à l'exécution répétée et à fréquence élevée par certains composants (les organes de fabrication dans le cas d'une machine d'embouteillage), des mêmes opérations pour chaque produit, provoquant généralement des déplacements rapides et violents de pièces mécaniques. Cet aspect du fonctionnement des machines est alors un facteur d'accélération des dérèglages.

3.3.3 - Critère de capabilité

Outre un suivi spécifique par cartes de contrôle, les procédés discontinus à haute cadence nécessitent un critère de capabilité adapté.

En effet, les cadences de production étant importantes, il est nécessaire que ces procédés aient une marge de variation possible sans produire de défectueux, plus importante que pour les autres types de processus. Aussi, le critère de capabilité procédé sera plus exigeant, nous choisirons $C_{pk} \geq 2$, tendant ainsi vers l'excellence qualité. Selon la décomposition des 5M, la capabilité des moyens de production doit être suffisante pour pouvoir satisfaire cet objectif, nous exigerons $C_{mk} > 2$.

3.4 - Conclusion

Les procédés discontinus à haute cadence, dont fait partie le procédé d'embouteillage, nécessitent des modes d'applications de la MSP adaptés.

Leur maîtrise demande notamment l'utilisation, d'une part de cartes de contrôle permettant la détection des dérives de qualité rapides et importantes, généralement employées pour le suivi des procédés discontinus à faible cadence, et d'autre part l'emploi de cartes de contrôle performantes pour la détection de dérives lentes et d'amplitude plus faible, essentiellement utilisées pour la maîtrise des procédés continus.

Aussi, nous allons maintenant étudier les différentes cartes de contrôle existantes permettant de détecter ces deux types de variation, et établir ensuite leur mode d'utilisation pour la maîtrise du procédé d'embouteillage.

4 - Typologie des cartes de contrôle de suivi de la moyenne

4.1 - Introduction

Dans le cas d'une maîtrise indirecte, la carte de contrôle est une représentation graphique qui est une suite d'images d'une caractéristique des produits fabriqués dont nous voulons maîtriser la qualité. Ces images (points sur le graphique) sont prises à intervalles réguliers (fréquence d'échantillonnage), et sont déterminées à partir d'échantillons constitués d'un nombre fixé de pièces successives prélevées dans la production. La présence d'une cause assignable de dérive de qualité est détectée lorsqu'un point du graphique dépasse des limites définies appelées limites de contrôle.

On distingue deux grandes familles de cartes de contrôle, les cartes aux mesures et les cartes aux attributs. Les cartes aux mesures, que nous allons maintenant étudier, permettent de suivre des grandeurs continues et mesurables telles que la hauteur de niveau de remplissage, l'enfoncement du bouchon ou la mesure de la position de l'étiquette. Les cartes aux attributs, qui feront l'objet de la partie 6 de ce chapitre, sont utilisées pour suivre le nombre ou la proportion de produits défectueux dans le cas de caractéristiques non mesurables comme la présence du bouchon ou de l'étiquette.

Nous avons vu précédemment (cf. §2.1.2) qu'il est nécessaire d'observer à la fois l'évolution de la tendance centrale et de la dispersion des caractéristiques de qualité mesurables. Analysons dans un premier temps le suivi de la tendance centrale par l'observation de la moyenne des échantillons. La tendance centrale peut également être observée par la médiane, mais les cartes de contrôle sont alors de performance moindre sans être plus faciles à mettre en oeuvre. Le suivi de la dispersion sera étudié dans la partie 5 de ce chapitre.

Les cartes de suivi de la moyenne présentées ci-après ont été expérimentées sur des données provenant d'une soutireuse réelle, les résultats de cette expérimentation sont présentés dans la partie 7 de ce chapitre.

4.2 - Les cartes de Shewhart

Walter A. Shewhart, un physicien des Bell Laboratories, fut le premier à montrer dès 1931 l'intérêt de l'utilisation des statistiques pour maîtriser un processus de fabrication [SHE31]. Mais c'est pendant la deuxième guerre mondiale que sous l'impulsion du ministère de la défense américain, des études plus poussées furent menées pour la fabrication d'armes, notamment par le statisticien W. Deming [PEY94].

Les cartes de contrôle de Shewhart sont de loin les plus diffusées, elles sont certainement les plus simples à mettre en oeuvre et les plus faciles à comprendre. Ce type de cartes est largement documenté, nous citerons pour références les ouvrages de Lamouille [LAM89], Souvay [SOU86], et Vachette [VAC90], ainsi que la norme française NF X06-031 [AFN70].

Considérons le cas d'une population de mesures d'une caractéristique du produit relevées sur l'ensemble de la production du procédé à maîtriser. Cette population, distribuée suivant une loi normale, est de moyenne m_0 et d'écart type σ_0 . Les limites supérieure et inférieure de tolérance de la caractéristique observée sont respectivement T_s et T_i .

Les valeurs \bar{x}_j des points de la carte de Shewhart sont définis par la moyenne de chaque échantillon de mesures:

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{j,i} \quad \text{où} \quad \Leftrightarrow n \text{ est la taille des échantillons}$$

$$\Leftrightarrow x_{j,i} \text{ sont les mesures individuelles d'indice } i \text{ de l'échantillon } j$$

Le théorème de la limite centrale nous indique que la distribution des moyennes suit également une loi normale de moyenne: $\bar{\bar{x}}$ estimée de m_0 , et d'écart type: $\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}}$ [VAC90].

Pour effectuer les calculs, σ_0 est estimé par σ'_0 dont le mode de détermination a été décrit au paragraphe 2.2.2, ce qui nous donne: $\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma'_0}{\sqrt{n}}$.

4.2.1 - Les limites de contrôle classiques

Les limites de contrôle supérieure et inférieure dites "classiques", notées respectivement Lc_s et Lc_i , sont déterminées par le risque α (figure II.6).

Le risque α , ou risque fournisseur, est la probabilité de détecter un dérèglement alors qu'il n'y a pas de cause assignable, c'est donc la probabilité qu'un point de la carte sorte des limites de contrôle lorsque le procédé est stable.

Ce risque est généralement fixé à $\alpha=0,002$, ce qui positionne les limites de contrôle à $3.09\sigma_{\bar{x}}$ de part et d'autre de la moyenne :

$$Lc_{s/i} = \bar{x} \pm 3.09 \frac{\sigma'_0}{\sqrt{n}}$$

Les limites ainsi définies (figure II.5) sont basées sur la variabilité intrinsèque du procédé, elles ont pour objectif le maintien de celui-ci dans ses limites naturelles et la détection de tout décalage de la moyenne.

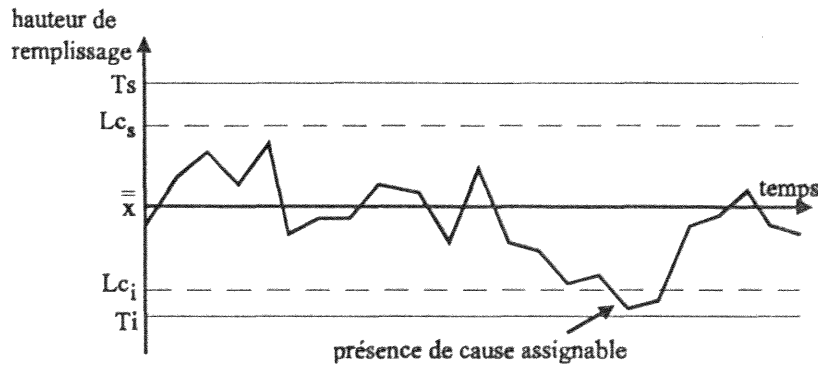


Figure II.5 : Exemple de carte de contrôle de Shewhart

4.2.2 - Détermination de l'effectif des échantillons et définition de l'efficacité

L'effectif n de chaque échantillon est déterminé, d'une part en fonction du coût de l'inspection d'un produit et de sa faisabilité, et d'autre part en fonction du risque β , appelé risque client, qui est la probabilité de ne pas détecter un décalage de la moyenne d'une valeur $\lambda \cdot \sigma_0$ (figure II.6).

L'influence de n est considérable sur β , car plus n est grand, plus $\sigma_{\bar{x}}$ est faible et donc meilleure est l'estimation de m_0 par \bar{x}_j . Aussi, augmenter la valeur de n permet de resserrer les limites de contrôle tout en conservant le même α , mais en diminuant β .

Nous remarquerons par ailleurs que, pour des tolérances fixées, la proportion p de défectueux est fonction de λ , p est donc également fonction de β (figure II.6).

Pour déterminer n , nous disposons des courbes d'efficacité. Ces courbes expriment soit β en fonction de λ , soit β en fonction de p , cela pour différentes valeurs de n . Ce dernier type de courbes étant d'un intérêt plus pratique, il est certainement le plus utilisé dans l'industrie.

Nous noterons que ces dernières années, des recherches ont été effectuées visant à adapter en permanence la taille des échantillons et la fréquence d'échantillonnage à l'évolution de la variabilité du procédé, ce qui permet de réduire le risque β tout en minimisant le nombre des prélèvements de mesures [PRA93][DAU92][RUN91].

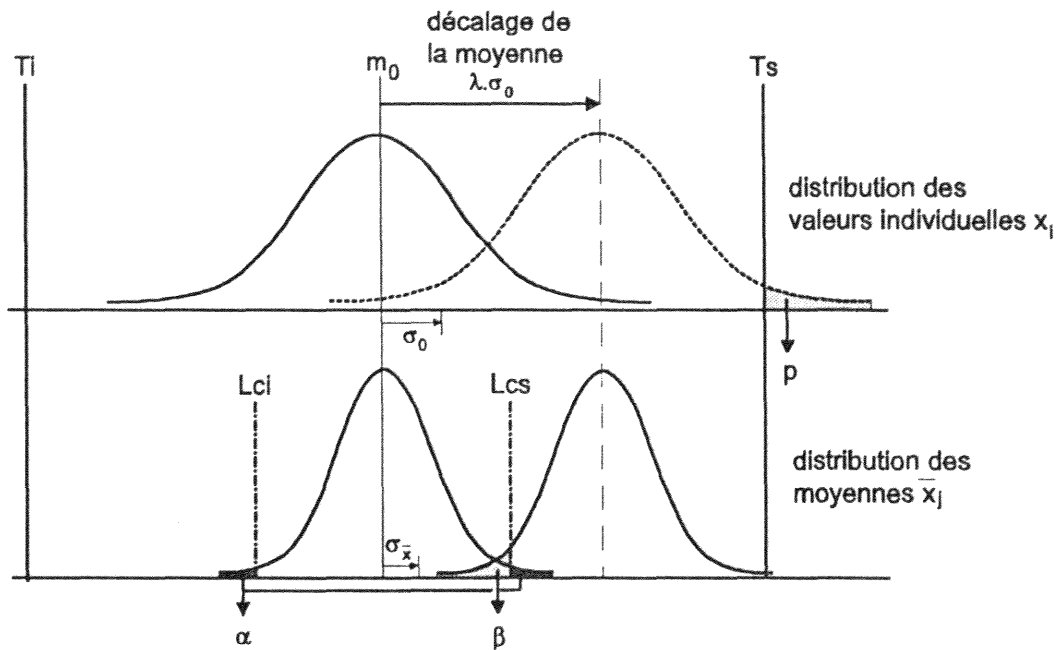


Figure II.6 : Risques α et β

- L'indice d'efficacité ARL

Par ailleurs, afin de définir plus clairement ce que l'on peut attendre d'un plan d'échantillonnage et comparer l'efficacité des différents types de cartes de contrôle, l'indice ARL (Average Run Length, ou longueur moyenne de rafale) a été défini [TOR65]. L'indice ARL_{in} est le nombre moyen d'échantillons à prélever avant qu'un point ne sorte des limites de contrôle, cela lorsque le procédé est stable. L'indice ARL_{out} correspond à la même valeur mais lorsqu'un dérèglement a eu lieu.

Un bon plan d'échantillonnage aura donc un ARL_{in} maximal et un ARL_{out} minimal. Généralement, on choisit $ARL_{in} = 500$ ou 1000 soit $\alpha = 0.002$ ou 0.001 et $ARL_{out} = 2$ ou 3 soit β entre 0.5 et 0.667 .

Pour les cartes de Shewhart, on a :
$$ARL_{in} = \frac{1}{\alpha} \quad \text{et} \quad ARL_{out} = \frac{1}{1 - \beta}$$

4.2.3 - Les limites de contrôle modifiées

Pour positionner les limites de contrôle, il existe une deuxième alternative appelée carte de Shewhart aux limites modifiées ou écartées. Ce mode de positionnement peut être employé, d'une part dans le cas d'oscillations fréquentes de la moyenne très difficilement maîtrisables, et d'autre part lorsqu'une surveillance pointue du procédé n'est pas indispensable. Ce dernier cas correspond aux processus ayant une capacité élevée ($C_{pk} > 2$) et dont les cadences de production ne sont pas trop importantes.

Pour ces procédés, les limites de contrôle peuvent être écartées afin d'avoir une surveillance moins sévère. Elles sont positionnées à partir des limites de tolérance, de manière à déclencher une alarme uniquement lorsqu'un décalage de la moyenne engendrant une proportion maximale de non conformes fixée $p_{\max i}$ est atteint.

Les limites de contrôle sont alors définies par [SOU86][AFN70]:

$$Lcs = Ts - \left(\theta' - \frac{3.09}{\sqrt{n}}\right) \cdot \sigma'_0 \quad \text{et} \quad Lci = Ti + \left(\theta' - \frac{3.09}{\sqrt{n}}\right) \cdot \sigma'_0$$

où θ' est une constante dont la valeur est fonction de $p_{\max i}$

Il est important de noter que ces limites de contrôle ont uniquement pour objectif de limiter le nombre de produits défectueux, et non d'éliminer toute cause assignable de variabilité. Elles ne permettent donc pas d'améliorer de manière continue la qualité du processus.

Comme nous l'avons souligné auparavant (cf. §3.3.2), le procédé d'embouteillage nécessite une surveillance rigoureuse en raison de sa cadence élevée de production, par ailleurs notre objectif est d'obtenir une stabilité maximale de celui-ci. Aussi, ce mode de positionnement des limites de contrôle ne correspond pas à ces exigences. Dans la suite de cette thèse nous ne prendrons donc pas en compte ces limites modifiées, nous considérerons uniquement les limites de contrôle classiques.

4.2.4 - Détection de tendances

Afin d'améliorer la détection de causes assignables, il est possible d'ajouter d'autres règles de déclenchement d'alarmes en plus de la règle de base: un point au delà des limites de contrôle. Ces règles ont pour but de détecter des tendances ou dérives lentes du procédé caractérisées par des séquences d'alignements de points sur la carte de Shewhart.

Pour détecter ces séquences, des zones sont définies sur la carte de contrôle comme le montre le schéma suivant:

Lc_s		$3.09 \sigma_{\bar{x}}$
	zone A	$2 \sigma_{\bar{x}}$
	zone B	$1 \sigma_{\bar{x}}$
	zone C	\bar{x}
	zone C	\bar{x}
	zone B	$-1 \sigma_{\bar{x}}$
	zone A	$-2 \sigma_{\bar{x}}$
Lc_i	zone A	$-3.09 \sigma_{\bar{x}}$

Figure II.7 : Zones de la carte de Shewhart pour détection de tendances

Les règles les plus utilisées ont été définies par Nelson [NEL84] ou par la Compagnie Western Electric [WES58], pour exemple nous pouvons citer deux d'entre elles: 4 points sur

5 dans la zone B ou au delà, huit points consécutifs en dehors de la zone C. Mais d'autres règles peuvent être facilement imaginées en fonction des tendances remarquables du procédé à maîtriser.

4.2.5 - Efficacité en fonction du type de variation

- **Peu efficace pour la détection de petites dérives**

La caractéristique essentielle des cartes de contrôle de Shewhart classiques (sans détection de tendances) est qu'elles considèrent chaque échantillon indépendant des autres. Aussi, la détection d'un dérèglement ne dépend que de la dernière moyenne calculée.

En effet, si nous exprimons la valeur d'un point de la carte à l'instant t par une pondération des valeurs des échantillons précédents nous obtenons:

$$\bar{x}_t = \sum_{j=1}^t w_j \cdot \bar{x}_j$$

avec $w_t = 1$ et $w_{t-k} = 0, k \geq 1$

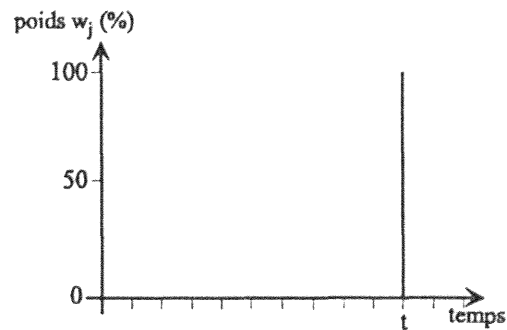


Figure II.8 : Pondération des échantillons d'une carte de Shewhart

Pour cette raison, les cartes de Shewhart classiques sont inadaptées au suivi de procédés continus. En effet, pour ces procédés, il est logique de considérer que la production actuelle nous informe sur la qualité de la production future et donc que les échantillons prélevés antérieurement contiennent une certaine information sur le fonctionnement actuel du procédé [TOR65].

Plus concrètement, la prise en compte uniquement de la moyenne instantanée amène une faible sensibilité (ARL_{out} grand) envers les dérives plus petites que les limites de contrôle soit $\lambda < 3,09$.

Ce manque d'efficacité dans le cas de petites variations peut néanmoins être réduit par l'utilisation des règles de détection de tendances. En effet, celles-ci prennent en compte les valeurs de quelques échantillons précédents. Mais aucune méthode ou critère formel ne permet d'établir ces règles de façon optimale, aussi leur choix est délicat et laissé à l'appréciation de l'expert désigné [HUN86]. De plus, l'addition de ces règles, souvent nombreuses pour parer à tout schéma de dérive, fait perdre l'avantage de la simplicité des

cartes de Shewhart [LUC76], et à tendance à augmenter le nombre de fausses alarmes [DAU91].

- **Efficace pour détecter les dérives rapides**

L'indépendance des échantillons est par contre source d'une bonne efficacité pour des dérèglages rapides et relativement importants. En effet, une dérive importante ne peut pas être atténuée par la prise en compte des valeurs des échantillons antérieurs plus centrées sur la moyenne.

4.2.6 - Exploitation pour la phase de diagnostic

La carte de Shewhart représente l'évolution chronologique de la valeur instantanée de la caractéristique observée. Aussi, cette carte est riche en informations pour la phase de recherche des causes assignables.

En effet, pour effectuer le diagnostic, nous pourrions identifier sur la carte, des schémas d'évolution correspondant à l'apparition de certaines causes assignables. Nous expliciterons plus précisément les modes d'utilisation des cartes Shewhart pour la phase de diagnostic au chapitre III.

4.3 - Les cartes à moyenne mobile

Afin de pallier le manque d'efficacité des cartes Shewhart pour la détection de petites dérives, une première solution est d'employer les cartes à moyenne mobile qui tiennent compte de l'interdépendance des derniers échantillons.

La valeur d'un point de la carte de contrôle est soit la moyenne des moyennes des k derniers échantillons, soit la moyenne des k dernières valeurs individuelles:

$$x_i = \frac{1}{k} \sum_{j=i-k+1}^i x_j \quad \text{où } x_j \text{ est une moyenne ou une valeur individuelle}$$

Les limites de contrôle se calculent comme pour les cartes Shewhart. La seule différence avec ces dernières est que les valeurs de k points successifs sont corrélées puisqu'elles prennent en compte des données communes.

Le cas de moyenne de valeurs individuelles est employé pour les procédés où les contraintes techniques ou économiques imposent des prélèvements unitaires. Ce type de carte permet alors de "reconstituer" des échantillons de plusieurs valeurs afin de pouvoir effectuer les calculs statistiques.

Le cas de moyenne de moyennes d'échantillons permet, sans prélever davantage de mesures, de prendre en compte un nombre plus important de valeurs pour l'estimation de la moyenne instantanée. $\sigma_{\bar{x}}$ étant alors plus petit car n plus grand, les limites de contrôle sont resserrées et l'efficacité pour la détection de petites dérives est meilleure.

Le choix du paramètre k détermine la taille de l'historique des valeurs à prendre en compte. Plus k est grand, meilleure est l'efficacité pour la détection des petites dérives; mais plus l'effet de lissage, dû au moyennage des k valeurs, se fera ressentir, diminuant ainsi l'efficacité pour la détection de dérives importantes et rapides. Notons d'ailleurs que $k=1$ correspond exactement à la carte de Shewhart.

Néanmoins, aucune méthode formelle n'indique la valeur à donner à k , [VAC90] nous dit que « le choix de l'amplitude doit avoir un sens au regard du rythme de fonctionnement du procédé et de la fréquence de prélèvement », nous pouvons toutefois nous demander la raison de donner une importance égale au k dernières valeurs et une importance nulle aux autres.

En effet, si comme pour les cartes Shewhart nous écrivons la valeur du point courant sous forme d'une somme pondérée des échantillons précédents, nous obtenons:

$$x_t = \sum_{j=1}^t w_j \cdot x_j$$

$$\text{avec } w_j = \frac{1}{k} \text{ pour } t-k \leq j \leq t$$

$$w_j = 0 \text{ pour } j < t-k$$

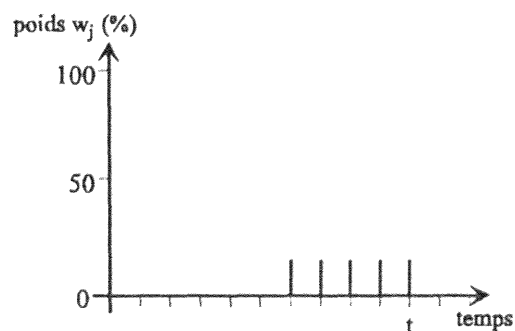


Figure II.9 : Pondération des échantillons d'une carte à moyenne mobile

- **Efficacité en fonction du type de variation**

La carte à moyenne mobile, en possédant une mémoire régulière finie sur k périodes, est une première réponse au problème de dépendance des échantillons dans le cas de suivi de paramètres continus. Mais celle-ci, de par son fonctionnement identique aux cartes de Shewhart, n'améliore que faiblement l'efficacité de ces dernières pour la détection de petites dérives.

- **Exploitation pour la phase de diagnostic**

La carte à moyenne mobile ne représente pas l'évolution chronologique de la valeur instantanée de la caractéristique observée. Aussi, elle fournit une information moins pertinente que la carte Shewhart pour la phase de diagnostic.

Nous noterons que nous retrouvons cet inconvénient pour toutes les cartes à mémoire, et notamment pour les cartes CUSUM et EWMA que nous allons maintenant étudier.

4.4 - Les cartes CUSUM

Les premiers développements des cartes CUSUM apparaissent dans les années 1960 [LEF95] et avaient pour objectif de déterminer une méthode plus efficace pour détecter les petites dérives dans le cas de procédés continus.

La carte CUSUM consiste à surveiller la somme des écarts des moyennes des échantillons par rapport à un visé. Si le procédé est stable et que sa moyenne est proche de ce visé, la somme cumulée reste proche de zéro; dans le cas contraire, la somme cumulée s'écarte rapidement de zéro, même pour des écarts faibles.

4.4.1 - La carte CUSUM à masque en V

Les premières cartes à avoir été développées sont les cartes CUSUM à masque en V. Pour ces cartes, la valeur d'un point est la somme cumulée des écarts des moyennes des échantillons précédents par rapport à la moyenne de la production.

$$y_i = \sum_{j=1}^i (\bar{x}_j - \bar{\bar{x}}) \quad (1)$$

Cette carte est une méthode graphique qui consiste à placer un masque en forme de V sur le dernier point. Un dérèglement du procédé sera détecté si au moins un des points précédents est à l'extérieur du masque (figure II.10).

Afin d'avoir un masque bien proportionné, les échelles des axes de la carte sont choisies telles que l'unité des ordonnées est f fois plus grande que l'unité des abscisses, avec généralement $f=2 \cdot \sigma_{\bar{x}}$ ($\sigma_{\bar{x}} = \sigma'_0 / \sqrt{n}$, cf. §4.2). Le masque est déterminé par deux paramètres, la distance d et l'angle θ comme le montre la figure suivante:

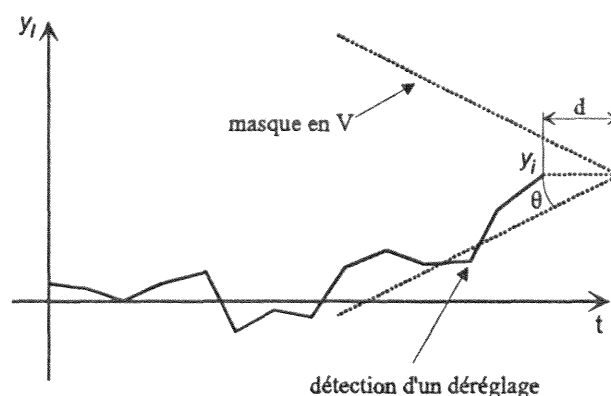


Figure II.10 : Carte CUSUM à masque en V

Pour définir ces paramètres, on raisonne généralement sur les valeurs ARL des longueurs moyennes de rafales.

Pour cela on définit les paramètres k et h [LUC76]:

$k = 2 \cdot \sigma_{\bar{x}} \cdot \tan \theta$ $h = 2 \cdot \sigma_{\bar{x}} \cdot d \cdot \tan \theta$ si sur la carte à masque en V l'unité de l'axe des abscisses est $2\sigma_{\bar{x}}$ fois plus grande que l'axe des ordonnées

Pour déterminer h et k , la démarche nous est donnée par Lucas [LUC76].

Cette démarche utilise les valeurs normalisées h^* , k^* et λ^* correspondant respectivement aux valeurs h , k et λ divisées par $\sigma_{\bar{x}}$. Des courbes (figure II.11), obtenues par résolution d'équations à base d'intégrales, et exprimant les longueurs moyennes de rafales ARL en fonction de λ^* pour différentes valeurs de h^* et k^* , nous permettent de déterminer les divers paramètres.

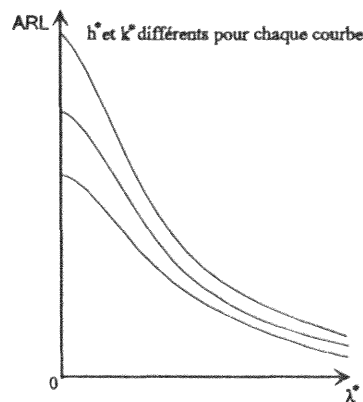


Figure II.11 : Courbes de détermination de h^*

Les étapes successives de cette démarche sont:

1 - Détermination de k .

On choisit $k = \lambda/2$ car, comme l'a montré Goldsmith [GOL61], la détection la plus rapide d'une dérive est obtenue pour k très voisin de cette valeur. On calcule ensuite

$$k^* = k / \sigma_{\bar{x}}$$

2 - On choisit la valeur de ARL_{in} souhaitée et l'on détermine h^* à l'aide des courbes présentées auparavant et correspondant à k^* calculé précédemment. Pour réaliser cela il est à noter qu'on lit sur les courbes ARL_{in} pour $\lambda^* = 0$.

3 - On calcule $h = h^* \cdot \sigma_{\bar{x}}$. On détermine ensuite d et θ à l'aide des formules précédentes pour obtenir le masque en V.

4 - On teste la carte de contrôle ainsi définie, et l'on ajuste les paramètres pour affiner son efficacité.

Nous remarquerons que dans cette démarche, l'effectif n des échantillons est fixé à l'avance. Cette hypothèse est généralement acceptable car le nombre de produits prélevés et mesurés

est souvent déterminé par des contraintes économiques et techniques. D'autres auteurs [TOR65] ont toutefois étudié des méthodes qui consistent à fixer ARL_{in} et ARL_{out} pour un décalage de la moyenne λ , puis à déterminer n et h qui permettent de respecter ces longueurs moyenne de rafales, k étant toujours égal à $\lambda/2$.

4.4.2 - La carte CUSUM à limites de contrôle parallèles

Les paramètres h et k permettent de définir une carte CUSUM à limites de contrôle horizontales, plus simple d'utilisation et permettant une programmation plus facile sur ordinateur.

La mise en oeuvre de cette carte demande, pour chaque échantillon d'indice i , le calcul de deux sommes cumulées, une pour les écarts positifs de la moyenne, notée Sh_i , l'autre pour les écarts négatifs, notée Sl_i :

$$Sh_i = \max[0, \bar{x}_i - (\bar{\bar{x}} + k) + Sh_{i-1}] \quad Sl_i = \max[0, (\bar{\bar{x}} - k) - \bar{x}_i + Sl_{i-1}]$$

avec pour valeurs initiales $Sh_0 = Sl_0 = 0$

La ligne centrale de la carte a pour valeur 0, le point correspondant à l'échantillon d'indice i est positionné à la hauteur Sh_i si $Sh_i > 0$, ou à la hauteur $-Sl_i$ si $Sl_i > 0$ (Sh_i et Sl_i ne pouvant pas être positif en même temps). Les limites de contrôle ont pour valeurs h et $-h$, une dérive de qualité étant détectée lorsque Sh_i ou Sl_i dépasse la valeur h .

4.4.3 - Efficacité en fonction du type de variation

- La carte CUSUM est bien adaptée à la détection des petites dérives

L'avantage de la carte CUSUM par rapport aux cartes Shewhart et à moyenne mobile est une détection plus rapide des petites dérives. Ewan [EWA63] et Lucas [LUC82] montrent que la détection est optimale par la carte CUSUM pour des décalages de la moyenne compris entre $0.5\sigma_{\bar{x}}$ et $2\sigma_{\bar{x}}$.

Cette sensibilité est due au fait que la carte CUSUM est caractérisée par une mémoire infinie, tenant compte avec la même importance de toute l'information du passé.

En effet, l'expression (1) peut s'écrire pour un point à l'instant t :

$$y_t = (\bar{x}_1 - \bar{\bar{x}}) + (\bar{x}_2 - \bar{\bar{x}}) + \dots + (\bar{x}_t - \bar{\bar{x}})$$

$$= \left(\sum_{j=1}^t w_j \cdot \bar{x}_j \right) - t \cdot \bar{\bar{x}} \quad \text{avec} \quad w_j = 1 \quad \text{quelque soit } j$$

Aussi, la représentation des valeurs des poids w_j montrant l'importance accordée à chaque échantillon est la suivante:

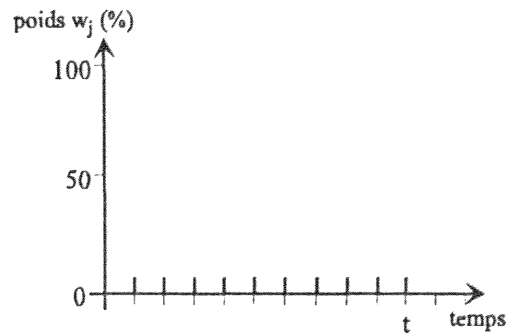


Figure II.12 : Pondération des échantillons d'une carte CUSUM

A l'inverse des cartes à moyenne mobile qui n'ont qu'une mémoire partielle, nous pouvons ici nous interroger sur la logique qui consiste à considérer avec la même importance un échantillon prélevé dans un passé plus ou moins lointain et le dernier échantillon.

- La carte CUSUM est peu adaptée à la détection des dérèglages brusques

Lorsque le procédé est stable (Sh et Sl supposés nuls) et qu'une variation apparaît, le décalage de la moyenne doit être supérieur à $k+h$ pour être détecté par la carte CUSUM. Or, généralement on a $k+h > 3.09\sigma_{\bar{x}}$, la carte de Shewhart est donc plus efficace pour les décalages brusques correspondant à λ supérieur à $3.09\sigma_{\bar{x}}$.

En faisant une analyse plus poussée, il a été montré que lorsque $\lambda > 2.5\sigma_{\bar{x}}$ la détection par la carte Shewhart est la plupart du temps plus rapide que par une carte CUSUM. Les courbes données par Ewan [EWA63] nous permettent de faire ces comparaisons de performances.

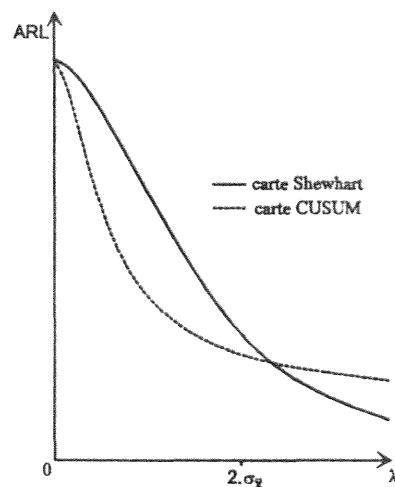


Figure II.13 : Exemple de courbes de comparaison d'efficacité des cartes Shewhart et CUSUM

Par ailleurs, lorsque la tendance du procédé est du coté négatif et qu'un brusque dérèglement apparaît du coté positif, ou inversement, la carte CUSUM met encore plus de temps à détecter cette variation.

Pour remédier à ces problèmes, deux améliorations sont possibles:

- La première est d'initialiser la carte avec les valeurs $Sh_0=Sl_0=h/2$ [LUC82b]. Cette carte, nommée FIR CUSUM (Fast Initial Response CUSUM) améliore la rapidité de détection même dans le cas de tendances.

- La seconde amélioration possible est d'employer simultanément une carte Shewhart et une carte CUSUM, les règles de détection des deux cartes étant testées pour chaque nouvel échantillon. On veillera alors dans ce cas à optimiser la position des limites de contrôle de la carte Shewhart en fonction de la valeur $h+k$ de la carte CUSUM de manière à maximiser la longueur de rafale ARL_{in} [LUC82a].

4.5 - Les cartes EWMA

4.5.1 - Description de la carte EWMA

Les cartes EWMA ont été développées pour le même objectif que les cartes CUSUM, c'est à dire la détection de petits dérèglages dans les processus continus.

La valeur suivie par les cartes EWMA est une moyenne pondérée des moyennes de tous les échantillons passés Z_{i-1} et de la moyenne de l'échantillon présent \bar{x}_i .

$$Z_i = \gamma \cdot \bar{x}_i + (1 - \gamma) \cdot Z_{i-1} \quad 0 < \gamma < 1 \quad (1)$$

avec pour valeur initiale $Z_0 = \bar{\bar{x}}$

Les limites de contrôle supérieures et inférieures sont définies par :

$$Lcs = \bar{\bar{x}} + L \cdot \sigma_z \quad \text{et} \quad Lci = \bar{\bar{x}} - L \cdot \sigma_z$$

où σ_z est l'écart type de la distribution des Z_i

σ_z nous est donné par [LUC90]:

$$\sigma_z = \left[\left\{ 1 - (1 - \gamma)^{2i} \right\} \cdot \gamma / (2 - \gamma) \right]^{1/2} \cdot \sigma_{\bar{x}}$$

qui converge rapidement pour γ petit vers :

$$\sigma_z = \left[\gamma / (2 - \gamma) \right]^{1/2} \cdot \sigma_{\bar{x}}$$

Il nous faut alors déterminer L et γ .

Comme pour les cartes CUSUM, nous déterminons ces paramètres en fonction des valeurs ARL_{in} souhaitées, et du décalage λ à détecter rapidement.

Pour calculer les valeurs ARL, il existe plusieurs méthodes. Il est possible de procéder par simulation, de résoudre une équation intégrale [CRO89], de construire une chaîne de Markov [LUC90], ou enfin de procéder par calcul direct en utilisant une méthode d'intégration numérique [DAU91]. Les résultats de ces méthodes étant sensiblement identiques, nous nous en tiendrons à ceux obtenus par Crowder [CRO89].

Crowder fournit un premier jeu de courbes permettant d'obtenir γ en fonction de λ^* et de ARL_{in} puis, un deuxième jeu de courbes est utilisé pour déterminer L en fonction de la valeur de γ obtenue et de ARL_{in} .

Nous remarquerons ici que l'effectif des échantillons n est prédéfini, ce qui n'est généralement pas contraignant comme nous l'avons déjà exprimé. Néanmoins, comme le montre Robinson [ROB78], n peut être considéré facilement comme un troisième paramètre à déterminer.

Nous noterons également que, du fait de l'expression de Z_i , la carte EWMA a l'avantage par rapport à la carte CUSUM qui ne trace qu'une somme d'écart, de donner une représentation réelle de l'évolution de la qualité des produits. Cela peut être important pour l'établissement de rapports qualité, et pour la compréhension par les non spécialistes comme les opérateurs de production.

4.5.2 - Efficacité en fonction du type de variation

La carte EWMA est donc également à mémoire infinie, elle est ainsi plus efficace que les cartes Shewhart et à moyenne mobile pour la détection de petites dérives, mais moins performante que ces dernières pour les dérèglages plus importants.

La différence avec la carte CUSUM est que la carte EWMA accorde une plus grande importance aux valeurs des échantillons les plus récents, ce qui par ailleurs semble plus logique.

En effet, la formule (1) peut être écrite de la façon suivante pour un point à l'instant t :

$$\begin{aligned}
 Z_t &= (1-\gamma)^t \cdot Z_0 + \gamma \cdot \sum_{j=0}^{t-1} (1-\gamma)^j \cdot \bar{x}_{t-j} = \gamma \cdot (1-\gamma)^0 \cdot \bar{x}_{t-0} + \gamma \cdot (1-\gamma)^1 \cdot \bar{x}_{t-1} + \gamma \cdot (1-\gamma)^2 \cdot \bar{x}_{t-2} + \dots \\
 &= (1-\gamma)^t \cdot Z_0 + \sum_{j=0}^{t-1} w_j \cdot \bar{x}_{t-j} \quad \text{où} \quad w_j = \gamma \cdot (1-\gamma)^j
 \end{aligned}$$

Chaque moyenne \bar{x}_{t-j} est donc considérée avec un poids w_j d'autant plus faible que l'observation est loin dans le passé (figure II.15), ce qui explique le nom de cette carte de contrôle : Exponentially Weighted Moving Average (EWMA).

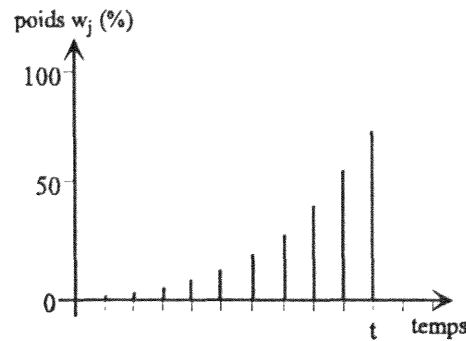


Figure II.14 : Pondération des échantillons d'une carte EWMA

La valeur de γ détermine l'importance relative des poids affectés aux différents échantillons en fonction de leur position dans le temps. Lorsque γ est proche de 1, on ne tient compte quasiment que du dernier échantillon, on a alors une carte se comportant de manière équivalente à une carte Shewhart, ayant une bonne réactivité aux dérèglages relativement importants. Lorsque γ tend vers 0, les observations les plus récentes ont un poids faible et sensiblement égal aux autres, on se rapproche alors de la carte CUSUM, avec une détection optimale des petits dérèglages. Généralement, γ est choisi entre 0.25 et 0.5 ce qui rend la carte EWMA en moyenne très légèrement moins efficace que la carte CUSUM pour les petits décalage de la moyenne.

Daudin [DAU91] fournit un tableau permettant de comparer l'efficacité, exprimée en valeurs ARL_{out} , des cartes Shewhart et EWMA pour deux valeurs de γ , la valeur ARL_{in} étant fixée à 500.

dérèglage λ^*	ARL_{out} Shewhart classique	ARL_{out} EWMA $\gamma=0.5$ $L=3.071$	ARL_{out} EWMA $\gamma=0.25$ $L=2.998$
0.00	500	500	500
0.25	374	254	169
0.50	201	88	48
0.75	103	36	20
1.00	55	17	11
2.00	7.3	3.6	3.6
3.00	2.1	1.9	2.2
4.00	1.2	1.4	1.7
5.00	1.03	1.10	1.38

Figure II.15 : Efficacité comparée des cartes Shewhart et EWMA

- **Améliorations possibles :**

Afin d'augmenter l'efficacité de la carte EWMA pour la détection des décalages plus conséquents de la moyenne, deux améliorations, du même type que ceux présentés pour la carte CUSUM, sont possibles :

- La première consiste à initialiser la carte avec Z_0 égal à $\bar{\bar{x}}$ plus ou moins une certaine valeur, ce qui permet une meilleure réactivité notamment lorsque dès le début du suivi du procédé, celui-ci est déjà dérégulé [LUC90]. Son inconvénient est qu'il faut suivre simultanément deux cartes EWMA correspondant respectivement à un décalage de Z_0 au dessus et en dessous de $\bar{\bar{x}}$.

- La seconde modification est d'utiliser la combinaison d'une carte Shewhart et d'une carte EWMA, Lucas [LUC90] propose dans ce cas de positionner les limites de la carte Shewhart à une distance de l'ordre de 4 écarts types de la moyenne (au lieu de 3.09), afin de limiter le nombre de fausses alarmes.

4.6 - Synthèse des cartes de suivi de la moyenne

Nous avons abordé les différentes cartes de contrôle existantes, en mettant en avant leurs avantages et inconvénients pour le suivi des procédés discontinus à haute cadence et la détection des deux types de dérives de qualité pouvant apparaître dans ces processus, à savoir les dérèglages brusques et les dérives de qualités plus lentes.

Tout d'abord, nous avons étudié la carte Shewhart qui considère les échantillons indépendants les uns des autres, sauf dans le cas d'utilisation de règles de détection de tendance, mais ces règles manquent de formalisme et sont peu performantes.

Cette carte est adaptée à la détection des dérèglages importants du procédé, mais elle est moins efficace dans le cas de petites dérives de qualité.

L'avantage de la carte Shewhart est qu'elle représente l'évolution chronologique des valeurs instantanées des caractéristiques observées, offrant ainsi une information plus riche pour la phase de diagnostic des causes assignables.

Nous avons ensuite abordé les cartes à mémoire tenant compte d'une certaine dépendance des échantillons successifs, et donc plus adaptées au suivi des procédés continus.

Ces cartes sont plus efficaces que la carte Shewhart pour la détection de petits dérèglages mais moins performantes dans le cas de décalages plus importants de la moyenne.

D'autre part, étant donné que la valeur d'un point est corrélée avec celles des points précédents, l'information fournie par la lecture de la carte est plus délicate à interpréter et donc moins pertinente pour le diagnostic.

Parmi ces cartes à mémoire, la carte à moyenne mobile est la moins performante. Les cartes CUSUM et EWMA sont d'une efficacité sensiblement équivalente pour les petites dérives de qualité. Néanmoins, la carte EWMA est plus simple de mise en oeuvre et a l'avantage de représenter l'évolution réelle du procédé. Pour ces raisons, notre choix entre ces trois cartes à mémoire se tournera vers les cartes EWMA.

Les cartes de contrôle se différencient donc, d'une part par leur efficacité à détecter des dérives de qualité lentes ou rapides, et d'autre part, par les informations qu'elles fournissent pour le diagnostic des causes de dérives.

Nous proposons dans le tableau suivant une hiérarchisation croissante, allant de 1 à 6, de ces différentes cartes en fonction de leur adéquation aux problèmes spécifiés [COL96b] :

Cartes de contrôle	Signification d'un point de la carte	Détection des dérives rapides	Détection des dérives lentes	Informations pour diagnostic
SHEWHART	moyenne d'un échantillon	6	2	6
MOYENNE MOBILE	moyenne des moyennes des k derniers échantillons ou des k dernières valeurs individuelles	4	3	4
CUSUM	somme infinie des écarts des moyennes des échantillons précédents par rapport à un visé	3	6	2
EWMA	somme pondérée infinie des moyennes des échantillons précédents, telle que l'influence des échantillons les plus récents soit la plus importante	4	5	4

Figure II.16 : Tableau de classification des cartes de contrôle

Il est toutefois important de noter que la différence d'efficacité entre les cartes Shewhart et les cartes à mémoire est atténuée si l'effectif des échantillons est grand. Dans ce cas, la dispersion $\sigma_{\bar{x}}$ des moyennes des échantillons est faible et les valeurs de ARL_{out} des diverses cartes tendent vers 1.

5 - Cartes de contrôle de suivi de la dispersion

Les cartes de contrôle de suivi de la dispersion ont suscité très peu de travaux de recherche depuis ceux de Shewhart [SHE31], aussi nous nous en tiendrons à ces derniers. Nous noterons néanmoins les récentes études de M. Ncube [NCU94] qui ont pour objet l'application des cartes CUSUM au suivi de la dispersion.

La dispersion des échantillons peut être observée soit par l'étendue, soit par l'écart type. Les cartes de l'étendue sont moins performantes mais demandent des calculs moins conséquents,

elles sont de ce fait particulièrement destinées à un suivi manuel. Dans notre cas, nous souhaitons utiliser un système informatisé, aussi nous utiliserons exclusivement des cartes de suivi de l'écart type.

La distribution des écarts types σ_i des échantillons, ne suit pas une loi normale mais obéit à la loi asymétrique du χ^2 à n-1 degrés de liberté [SOU86].

On a:
$$\chi^2 = n \cdot \frac{\sigma_i^2}{\sigma_0'^2}$$

La limite de contrôle de la carte de suivi de l'écart type est alors définie pour respecter le risque α fixé généralement à 0.001, soit:

$$\chi_{(n-1),\alpha}^2 > n \cdot \frac{\sigma_i^2}{\sigma_0'^2} \quad \text{où } \chi_{(n-1),\alpha}^2 \text{ est la valeur du } \chi^2 \text{ à n-1 degré de liberté ayant la probabilité de dépasser } \alpha$$

d'où on obtient
$$\sigma_i < \sigma_0' \cdot \sqrt{\frac{\chi_{(n-1),\alpha}^2}{n}}$$

La limite de contrôle est alors:
$$Lc = \sigma_0' \cdot \sqrt{\frac{\chi_{(n-1),\alpha}^2}{n}}$$

- **Approximation par la loi normale:**

Dans le cas où n est supérieur à 30, on peut approximer la distribution des écarts types σ_i par une loi normale de moyenne σ_0 et d'écart type $\frac{\sigma_0}{\sqrt{2n}}$.

La limite de la carte de contrôle de l'écart type se construit alors comme les limites des cartes de la moyenne de Shewhart soit :

$$Lc = \sigma_0' + 3.09 \cdot \frac{\sigma_0'}{\sqrt{2n}} \quad \text{pour un risque } \alpha=0.001$$

6 - Cartes de contrôle aux attributs

Certaines caractéristiques de qualité des bouteilles ne sont pas mesurables mais de type attribut, comme par exemple la présence d'un bouchon, le décollement ou la présence d'une étiquette, ... Dans ces cas, on ne peut suivre par cartes de contrôle que le nombre, ou la proportion de produits défectueux contenus dans les échantillons.

Notons que la proportion de défectueux peut de la même manière être suivie pour les caractéristiques mesurables. Mais ce suivi ne présente qu'un intérêt modéré car, ne générant pas d'avertissement avant la production de non conformes, il ne permet pas une réelle maîtrise du procédé. Il a uniquement pour but de limiter le nombre de produits défectueux.

Aussi, les cartes de contrôle aux attributs ont occasionné très peu de travaux de recherche, nous présentons alors ici les cartes de type Shewhart, qui sont de loin les plus employées.

Le nombre de produits défectueux suit une loi binomiale peu commode d'utilisation. On utilise alors généralement une approximation de cette loi:

- Dans le cas où $n.p_0 > 10$, p_0 étant la proportion de défectueux à respecter, on peut approximer la loi binomiale par une loi normale de moyenne $n.p_0$ et d'écart type $\sigma_a = \sqrt{n.p_0.(1-p_0)}$.

Il en résulte que la limite de contrôle, au sens Shewhart, de la carte aux attributs est :

$$Lc = n.p_0 + 3.09.\sigma_a \quad \text{avec un risque } \alpha=0.001$$

- Dans le cas où $n.p_0 < 10$, et $p_0 < 10\%$ on peut approximer la loi binomiale par la loi de Poisson, les limites de contrôle s'obtiennent alors à partir des tables de cette loi.

L'efficacité des cartes de contrôle par attributs à détecter un dérèglement du procédé est assez médiocre. Aussi, pour améliorer leur performance, il est nécessaire de prendre des effectifs d'échantillons importants voire très importants, on choisira n tel que $n.p_0 > 10$, ce qui nous permettra d'utiliser l'approximation par la loi normale.

7 - Expérimentation des cartes de contrôle sur une machine d'embouteillage

Nous allons expérimenter les différents types de cartes de contrôle de suivi de la moyenne présentées précédemment, sur des mesures de hauteur de remplissage prélevées sur une ligne d'embouteillage d'eau minérale d'une entreprise cliente de la Société GEBO AUTOMATIQUE.

Nous verrons dans la suite de ce chapitre qu'il est nécessaire de suivre séparément par cartes de contrôle chaque organe de fabrication d'une machine d'embouteillage. Aussi, nous allons considérer dans cette expérimentation uniquement les bouteilles produites par un même organe de soutirage.



Figure II.17 : Définition de la hauteur de remplissage

Pour cette application, la hauteur de remplissage est définie comme sur le schéma ci-contre.

Les tolérances à respecter sont: $T_s=18\text{mm}$ $T_i=8\text{mm}$

Les mesures sont effectuées par notre système d'inspection qui utilise la technologie de vision artificielle.

Notre objectif étant dans cette expérimentation de tracer des cartes de contrôle, donc de mesurer des variations et non de vérifier la conformité des produits, nous avons préféré, pour des raisons de commodité, utiliser l'unité de mesure du système d'inspection qui est le pixel.

7.1 - Etude préliminaire

Avant d'effectuer le tracé de ces cartes, nous devons, comme le précise la démarche de maîtrise des procédés présentée en début de ce chapitre, vérifier la capacité du moyen d'inspection, la normalité du procédé de fabrication, ainsi que la capacité de la machine.

7.1.1 - Capacité du procédé d'inspection

• Etalonnage

Avant de calculer la capacité du procédé d'inspection, il est nécessaire de réaliser l'étalonnage de celui-ci. L'étalonnage est réalisé suivant la norme XP X07-020 [AFN96], en déterminant la moyenne et l'écart type d'au moins 10 mesures d'une longueur étalon effectuées par le système d'inspection dans des conditions optimales. Ces mesures sont réalisées sur l'ensemble du champ de vision afin de prendre en compte les distorsions de l'image.

Nous obtenons:

1 pixel = 0.3 mm avec une incertitude d'étalonnage : $I_e = 0.042$ mm ou 0.14 pixels

• Calcul de la capacité

Les conditions industrielles de prise de mesures sont peu favorables, se traduisant par une reproductibilité assez faible du procédé d'inspection. En effet, les produits circulant sur un convoyeur à grande vitesse, toute instabilité de la bouteille se traduit par une perturbation du niveau liquide. Il est alors essentiel de porter une attention particulière au guidage de la bouteille, de réduire toutes vibrations, et de réaliser l'inspection après un déplacement rectiligne des produits ayant permis une stabilisation du niveau.

Pour calculer la capacité du procédé d'inspection, nous devons déterminer l'incertitude de mesure (IM) selon la formule présentée au début de ce chapitre. Pour cela nous effectuons, selon la méthode communément admise, 5 mesures sur 5 bouteilles différentes. Nous plaçons

ces bouteilles manuellement sur le convoyeur en mouvement, afin de reproduire au mieux les conditions réelles de prise de mesure.

Pour déterminer l'exactitude du procédé d'inspection, nous utiliserons, pour valeur de référence de la hauteur de remplissage de chaque bouteille, une sixième mesure comme le préconise la norme Renault [REN90]. Cette mesure sera effectuée convoyeur à l'arrêt, niveau stabilisé.

Nous obtenons les résultats suivants dont l'unité est le pixel :

	bouteille 1	bouteille 2	bouteille 3	bouteille 4	bouteille 5
	54.7 pixels	53.8	51.2	55.6	55.8
	53.9	54.6	51.8	55.2	56.2
	55	55.6	50.5	54.6	56.4
	53.4	54.3	52.4	54.2	56.8
	54.9	53.8	50.7	54	55
moyenne m_i	54.38	54.42	51.32	54.72	56.04
écart type σ_i	0.624	0.665	0.703	0.601	0.612
Ref _i (mesure de référence)	54.2	54.7	51.1	55	56.2
écart d'exactitude $E_i = m_i - \text{Ref}_i$	0.18	-0.28	0.22	-0.28	-0.12

Figure II.18: Tableau de mesures pour le calcul de la capabilité du procédé d'inspection

- A partir de $\bar{\sigma}_i = 0.641$ nous déterminons $\sigma'_M \approx 0.762$ (selon la formule exposée au paragraphe 2.2.2 : $\sigma'_M = \frac{\bar{\sigma}_i}{b_n}$ avec $b_n = 0.841$).

- Pour l'exactitude, nous obtenons:

$E = \bar{E}_i = -0.056$ et $\sigma'_E \approx 0.243$ (selon la formule exposée au paragraphe 2.2.1 :

$$\sigma'_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (E_i - E)^2}{4}}.$$

Pour le calcul de l'erreur d'exactitude, il faut également prendre en compte l'incertitude d'étalonnage définie précédemment, ce qui nous donne : $S_E = \sigma'_E + I_e = 0.383$

- Nous pouvons alors calculer l'incertitude de mesure :

$$IM = |E| + 6,18 \cdot \sqrt{\sigma'_M{}^2 + S_E{}^2} \approx 5.33 \quad \text{d'où} \quad \frac{T_s - T_i}{IM} \approx 6.25 \quad (T_s - T_i \approx 33.33 \text{ pixels})$$

$\frac{T_s - T_i}{IM} \geq 4$, le procédé d'inspection est donc capable.

7.1.2 - Etude de normalité du procédé

A partir d'un effectif de 62 mesures de hauteurs de remplissage, relatives à un organe donné, et relevées lors d'un fonctionnement stabilisé de la soutireuse, nous obtenons l'histogramme suivant:

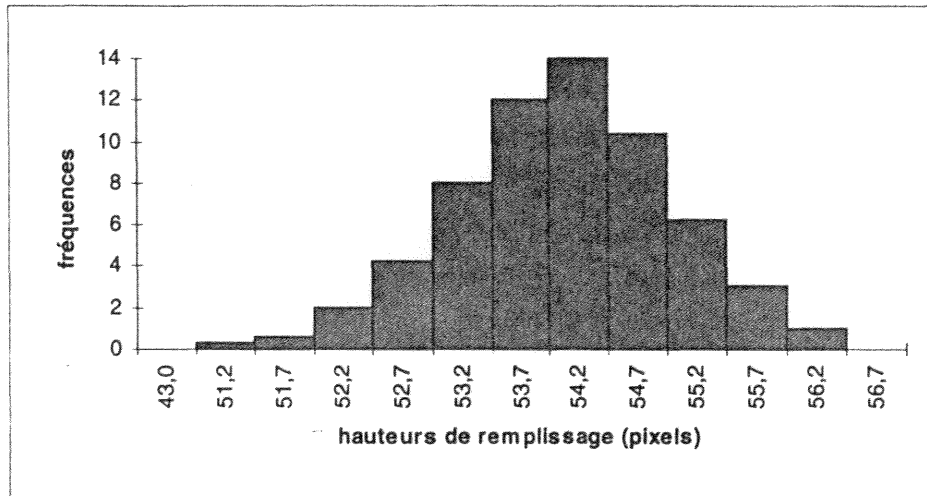


Figure II.19 : Histogramme de hauteurs de remplissage

La moyenne de ces mesures est $\bar{x} = 53.9$ pixels et l'écart type $\sigma'_i = 0.92$

Afin de vérifier la normalité de cette distribution, nous réalisons un test du khi-deux. Le test du khi-deux calcule l'indice de divergence entre une distribution de référence théorique et une distribution réelle obtenue par mesures. Cet indice, pour le calcul sur un histogramme, est:

$$I = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i} \quad \text{où} \quad \Leftrightarrow n_i \text{ est l'effectif de la classe } i$$

$\Leftrightarrow n'_i$ est l'effectif théorique de la classe i

$\Leftrightarrow k$ est le nombre de classes

Cet indice suit une loi du khi-deux à v degrés de liberté (χ_v^2), le nombre de degrés de liberté étant le nombre de variables indépendantes dont on somme les carrés. Dans le cas d'un histogramme à k classes, on considère que $v = k-3$ [LAM89].

Une distribution correspond à la loi de référence si $I < \chi_{v,p}^2$ où P est la probabilité d'erreur sur le résultat d'acceptation de correspondance à la loi de référence.

Sur cet histogramme, le test du khi-deux nous donne: $I = 10.94$ avec pour valeur maxi admissible $\chi_{8;0,05}^2 = 15.5$

$I < \chi_{8;0,05}^2$, nous pouvons donc admettre l'hypothèse de normalité.

7.1.3 - Capabilité machine

La tendance centrale de la distribution des mesures étant décentrée vers T_s , nous choisirons de calculer l'indice C_{mk} .

Nous obtenons
$$C_{mk} = \min\left(\frac{Ts - \bar{x}}{3,09 \cdot \sigma'_i}, \frac{\bar{x} - Ti}{3,09 \cdot \sigma'_i}\right) \approx 2.15$$

$C_{mk} > 2$, l'organe considéré de la soutireuse est donc capable.

7.2 - Expérimentation

7.2.1 - Récupération des données

Après avoir vérifié la normalité du procédé, nous effectuons un nouveau prélèvement de mesures relatives au même organe, jusqu'à obtenir les 18 échantillons de taille $n=5$ du tableau suivant. Afin de tester l'efficacité des cartes de contrôle pour les deux types de dérives de qualité (lentes et rapides), nous considérerons également le cas fictif des échantillons 13', 14' et 15' en remplacement des échantillons 13,14,15.

n° échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8	9
moyenne (pixels)	55.1	54.4	54.8	54.1	55.3	55	54.6	54.4	55.1
n° échantillon	10	11	12	13	14	15	16	17	18
moyenne	54.1	53.7	54.2	53.6	53.7	54	53.6	53.5	53.2
n° échantillon				13'	14'	15'			
moyenne				55	56	55.6			

Figure II.20 : Tableau des échantillons prélevés de mesures de hauteur de remplissage

La moyenne et l'écart type calculés sur les 20 échantillons précédents en l'absence de dérive qualité sont: $\bar{\bar{x}} = 54.6$ $\sigma'_0 = 0.94$

Nous allons tracer à présent les cartes Shewhart, CUSUM et EWMA à partir de ces mêmes données.

7.2.2 - Tracé de la carte de Shewhart

Le calcul des limites de contrôle classiques nous donne:

$$Lcs = 55.9 \quad \text{et} \quad Lci = 53.3$$

Notons que ces limites sont positionnées à $3.09\sigma_{\bar{x}}$ de part et d'autre de la moyenne, ce qui correspond à $\alpha=0.002$ soit $ARL_{in}=500$.

La carte de contrôle obtenue est la suivante :

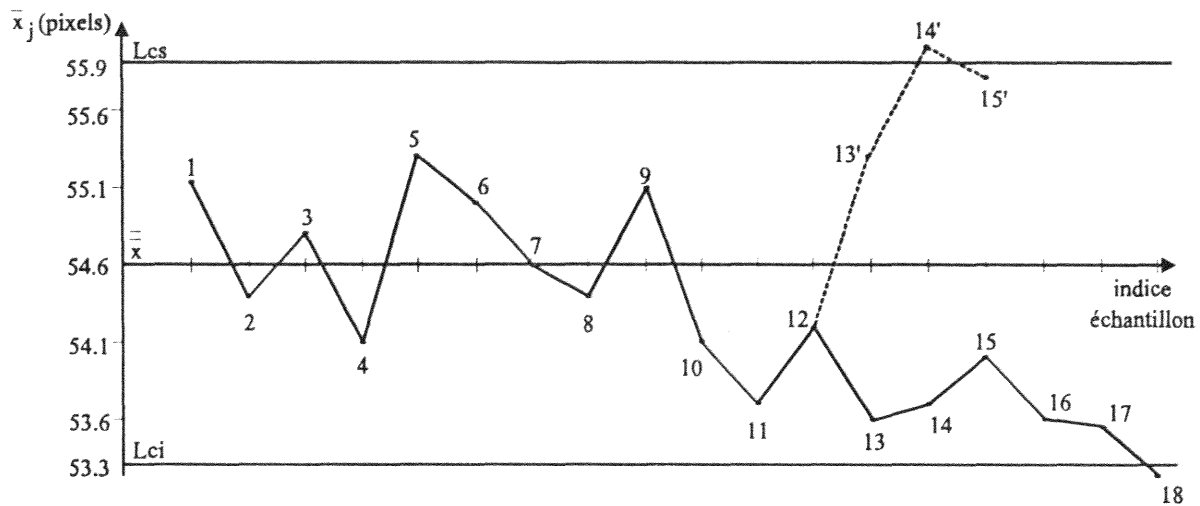


Figure II.21 : Carte de contrôle de Shewhart

Sur cette carte de contrôle (en traits continus), nous observons une petite dérive de la moyenne à partir de l'échantillon n°10. Mais pour que ce décalage de la moyenne soit perçu et déclenche une alarme, il faudra attendre qu'un point sorte des limites de contrôle, cela arrivera à l'échantillon 18, soit 8 points après l'apparition de la cause assignable.

La cadence de production étant de 40000 bouteilles/h à répartir sur 75 organes, un organe produit 9 bouteilles/mn. Si nous considérons que toutes les bouteilles fabriquées sont utilisées pour la constitution des échantillons, ce qui sera certainement réalisable par un système informatisé, ces 8 points correspondent donc à un retard de détection de 4 mn 26 s. Ce retard étant relativement important, il augmente alors considérablement l'inertie de réaction et accroît donc la probabilité de fabrication de défectueux.

Par ailleurs, si le décalage de la moyenne avait été d'une valeur positive, caractérisant un sur-remplissage des bouteilles, un surplus inutile de liquide aurait été utilisé. Et comme nous l'avons exprimé au chapitre I (§3.3), quelques millilitres supplémentaires par bouteille finissent par représenter à long terme une perte financière considérable.

Supposons maintenant le cas d'une dérive plus importante, tracée en pointillés sur la carte de contrôle. Cette dérive déclenche une alarme dès le 14^{ème} point, soit deux échantillons après l'apparition de la cause assignable. Nous verrons que, comme prévu, l'efficacité de détection de cette dérive rapide est meilleure que l'efficacité obtenue avec les autres types de cartes.

7.2.3 - Tracé de la carte CUSUM

Pour réaliser le tracé de la carte CUSUM, nous choisissons de détecter de façon optimale un décalage de la moyenne de $\lambda=0.9$, et pour comparer l'efficacité avec la carte Shewhart, nous fixons comme précédemment $ARL_{in}=500$.

Nous utilisons la procédure de Lucas [LUC76] pour déterminer les paramètres h et k . Nous calculons alors $k=0.45$. Puis, à partir des valeurs de k^* et λ^* , soit $k^*=1.07$ et $\lambda^*=2.14$, nous déterminons h^* à partir des courbes données par Lucas pour respecter ARL_{in} , soit $h^*=2.6$, ce qui nous donne $h=1.09$.

Nous obtenons la carte de contrôle suivante:

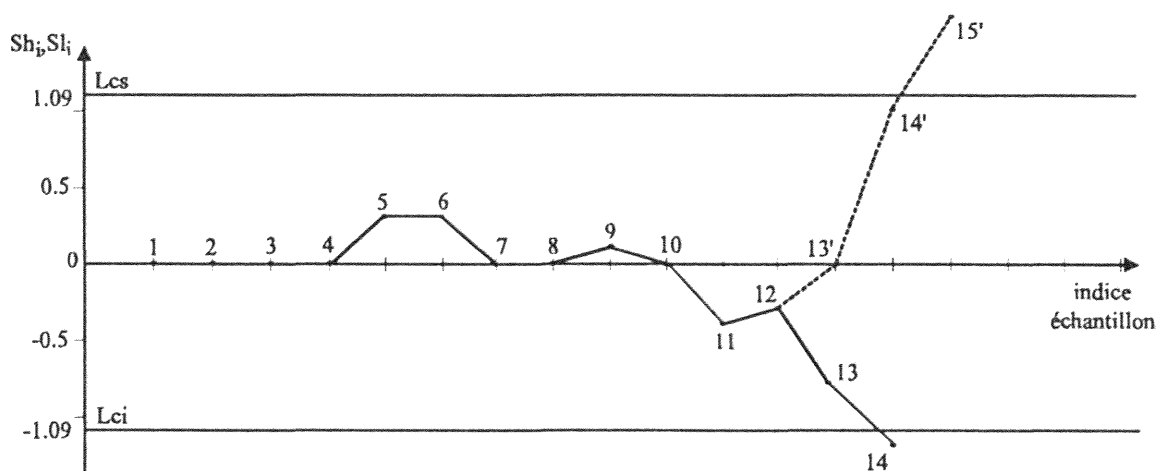


Figure II.22 : Carte de contrôle CUSUM

Nous constatons que la petite dérive détectée par la carte Shewhart au point 18 est détectée ici dès l'échantillon 14 soit plus de 2mm avant la carte Shewhart, par contre le décalage plus important représenté en pointillés est détecté par la carte CUSUM une période après la carte Shewhart.

7.2.4 - Tracé de la carte EWMA

Afin de faire une comparaison avec les cartes de Shewhart et CUSUM obtenues auparavant, nous nous fixons les mêmes contraintes:

$$ARL_{in}=500 \quad \text{et} \quad \lambda=0.9 \quad \text{soit} \quad \lambda^* \cong 2.14$$

A partir des courbes fournies par Crowder nous déterminons $\gamma = 0.4$ puis $L=3.05$

Nous calculons ensuite σ_z : $\sigma_z \cong 0.21$

Nous obtenons alors la carte de contrôle EWMA définie par:

$$Z_i = 0.4 \cdot \bar{x}_i + 0.6 \cdot Z_{i-1} \quad \text{et} \quad Lcs=55.24 \quad Lci=53.96$$

Sur le graphique suivant nous avons superposé la carte Shewhart obtenue précédemment au tracé de la carte EWMA afin de pouvoir bien comparer leurs effets:

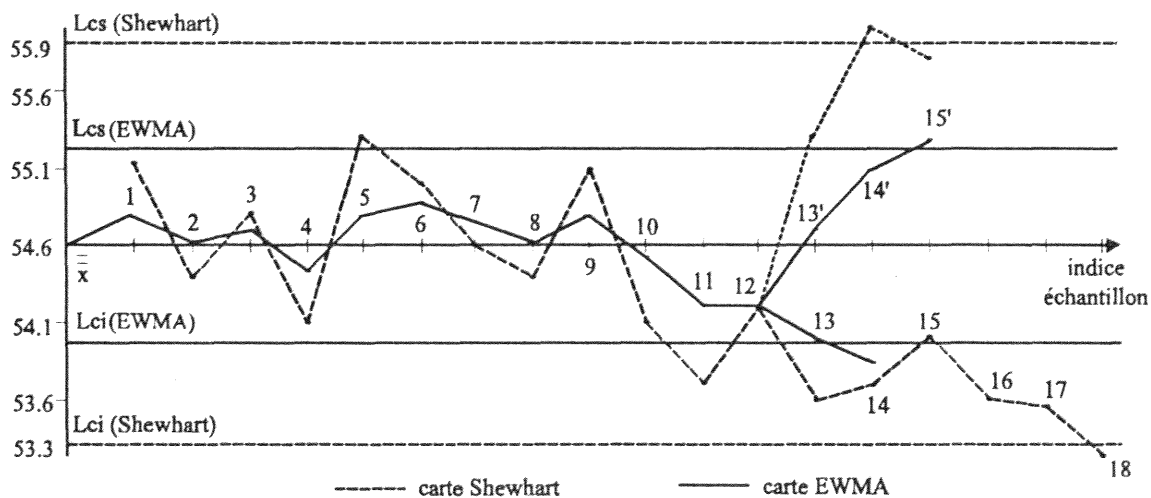


Figure II.23 : Carte de contrôle EWMA

Nous constatons que pour la détection des dérives lentes et rapides de cet exemple, nous obtenons la même performance qu'avec la carte CUSUM.

Nous remarquons également sur cette application les deux avantages de la carte EWMA par rapport à la carte CUSUM:

- La carte EWMA donne une représentation de l'évolution réelle du procédé. Cette représentation est obtenue en effectuant un lissage de l'évolution des valeurs instantanées représentée par la carte Shewhart.

- La détermination et la mise en oeuvre de la carte EWMA est plus simple que la carte CUSUM.

7.3 - Conclusion

Cette expérimentation, menée à partir de données issues de campagnes de mesures sur un procédé réel d'embouteillage, nous a permis de vérifier les conclusions obtenues suite à l'étude théorique des diverses cartes de contrôle, à savoir une détection rapide des dérives lentes pour les cartes CUSUM et EWMA, et une meilleure efficacité de la carte Shewhart pour les variations brusques. Nous avons alors constaté l'impact important sur le temps de réaction d'une détection tardive d'une dérive lente par la carte Shewhart.

8 - Stratégie de maîtrise d'une machine d'embouteillage

Après avoir étudié et expérimenté les différentes cartes de contrôle existantes, nous allons établir une stratégie d'utilisation de ces cartes pour la maîtrise d'une machine d'embouteillage. Cette stratégie, développée dans les paragraphes suivants, est synthétisée par la figure suivante:

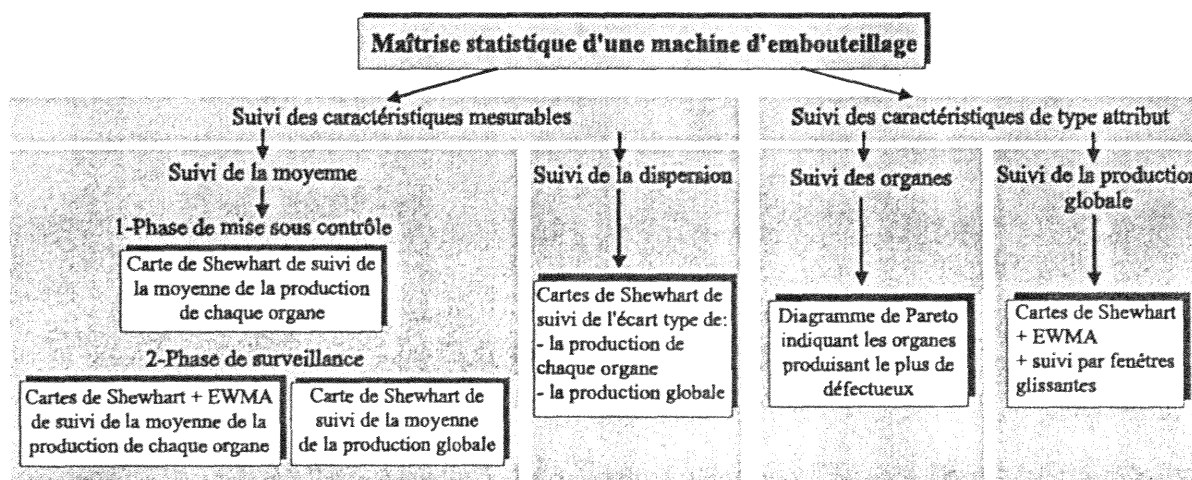


Figure II.24 : Stratégie de maîtrise d'une machine d'embouteillage

Explicitons chacune des quatre branches de cette figure.

8.1 - Stratégie de suivi de la moyenne

8.1.1 - Suivi individuel des organes de fabrication

Il est nécessaire, pour avoir une efficacité optimale de détection de dérèglages et de diagnostic, de suivre par cartes de contrôle chaque organe séparément pour les machines de soutirage et de bouchage. Pour l'étiqueteuse, les causes de variabilité provenant des organes de fabrication étant assez peu probables, un tel suivi n'est pas indispensable.

Pour sa réalisation, l'effectif des échantillons ne pourra pas être important car, si nous considérons l'exemple représentatif d'une soutireuse produisant 40000 bouteilles à l'heure et composée de 75 organes, la fréquence de fabrication d'un organe est de 9 bouteilles à la minute, nous prendrons alors des échantillons composés de 5 à 10 bouteilles afin de minimiser le temps de réaction en cas de dérèglement.

Il est important de noter que ce mode de suivi génère une contrainte supplémentaire d'identification de l'organe ayant fabriqué le produit inspecté.

Pour effectuer ce suivi, nous proposons la démarche suivante:

- Nous avons vu précédemment que la première étape de maîtrise du procédé est de le rendre stable avant de pouvoir entrer en phase de surveillance. Pour cela nous emploierons une carte de Shewhart par organe. L'emploi de cartes à mémoire dans cette étape multiplierait les alarmes, notamment pour des petites dérives, alors que l'objectif est de supprimer les causes assignables provoquant des décalages de la moyenne plus significatifs.

De plus la carte Shewhart fournira l'information utile au diagnostic.

- Ensuite, lorsque le procédé est sous contrôle, il peut être bénéfique d'utiliser par organe une carte EWMA en plus de la carte Shewhart.

Nous veillerons alors à placer les limites de la carte Shewhart à une distance de l'ordre de 4 écarts types de la moyenne comme le préconise Lucas [LUC90] pour maximiser la valeur ARL_{in} (voir description des cartes EWMA).

L'utilisation combinée de ces deux cartes permettra ainsi de réagir au plus tôt lors de dérives lentes et de dérèglages plus brusques.

8.1.2 - Suivi de la qualité de la production globale

Il nous paraît important d'observer également l'évolution de la qualité de la production prise dans sa globalité, pour deux raisons:

- D'une part car c'est la qualité de l'ensemble des produits livrés, sans distinction d'organes de fabrication, qui est jugée dans les relations clients-fournisseurs. Cette observation permettra par ailleurs de fournir au client un justificatif de la qualité des produits livrés par lot et par type de bouteilles.

- D'autre part car, comme explicité ci-après et au paragraphe 8.2, cette observation facilitera la détection des dérives de qualité ainsi que la recherche des causes assignables.

Pour réaliser cette observation, les échantillons seront constitués d'une bouteille de chaque organe de fabrication, l'objectif étant d'avoir une représentation du comportement de l'ensemble de la machine. Nous emploierons uniquement une carte de Shewhart, d'une part car celle-ci permet l'observation souhaitée de l'évolution réelle de la qualité, et d'autre part car, l'effectif des échantillons étant important, l'efficacité de la carte sera satisfaisante pour la détection de tout type de dérive.

Un point de cette carte étant obtenu après un tour de machine, alors qu'un point des cartes de suivi de chaque organe est obtenu après 5 à 10 tours, le suivi de la production globale nous permettra de détecter plus tôt un dysfonctionnement ou dérèglement d'un élément général à la machine.

8.2 - Stratégie de suivi de la dispersion

Nous avons vu qu'il est nécessaire de suivre la dispersion en plus de la tendance centrale. Nous devons donc avoir une carte de l'écart type pour chaque organe de la soutireuse et de la boucheuse.

La taille des échantillons étant dans ce cas inférieure à 30, nous utiliserons la loi du χ^2 pour déterminer la limite de contrôle (cf. §5).

Nous emploierons également une carte de suivi de l'écart type pour la production globale.

Les limites seront ici définies suivant l'approximation par la loi normale. Dans ce cas, l'effectif des échantillons étant important, l'efficacité de la carte sera meilleure.

Etant donné qu'un échantillon des cartes de suivi de la production globale (moyenne et écart-type) est constitué d'une bouteille provenant de chaque organe, ces cartes vont permettre d'orienter les recherches des causes assignables. Nous pourrions en effet définir les règles suivantes:

- Si la moyenne de la production globale est décalée et que sa dispersion est stable, nous pourrions conclure avec une faible probabilité de se tromper qu'il s'agit d'un dérèglement d'un élément global à la machine.

- Par contre, s'il y a déclenchement d'une alarme sur la carte de la dispersion de la production globale, avec décalage modéré de la moyenne, il y a une forte probabilité qu'un ou plusieurs organes particuliers soient dérèglés. Il y a par contre peu de chances que le dérèglement provienne d'un paramètre de marche général à la machine.

Par ailleurs, une alarme générée sur une carte de la dispersion d'un organe particulier, avec une moyenne relativement stable, sera significatif d'un fonctionnement erratique de celui-ci, dû à l'usure ou à la dégradation d'une pièce mécanique par exemple. Un simple réglage de paramètres de marche ne suffira alors pas à remédier au problème, une action de maintenance plus approfondie sera nécessaire.

8.3 - Stratégie de suivi des attributs

8.3.1 - Suivi individuel des organes de fabrication

Notre expérience nous amène à choisir une proportion p_0 de défectueux à respecter de l'ordre de 0.1% de la production totale, cela pour une caractéristique de qualité donnée. C'est en effet la valeur généralement admise dans l'industrie de l'embouteillage.

Pour obtenir la valeur du pourcentage moyen de produits défectueux fabriqués par un organe, il faut diviser p_0 par le nombre d'organes, ce qui nous amène à une valeur très faible.

Aussi, un suivi par carte aux attributs de chaque organe n'a pas de sens car il demanderait un effectif d'échantillons trop important pour obtenir une efficacité minimale.

Par contre, afin d'identifier les organes présentant des dysfonctionnements, nous établirons un diagramme de Pareto exprimant les pourcentages de produits défectueux fabriqués par les organes ayant produit le plus de bouteilles non conformes, cela en tenant compte des j dernières bouteilles défectueuses.

8.3.2 - Suivi de la production globale

Néanmoins, nous suivrons par carte de contrôle le nombre de défectueux de la production globale.

Lors d'une alarme sur cette carte, nous utiliserons le diagramme de Pareto précédemment décrit pour déterminer s'il s'agit d'un dérèglement, d'un ou plusieurs organes particuliers, ou d'un élément général à la machine. Dans le premier cas, les organes défectueux seront facilement identifiés par la lecture du diagramme de Pareto. Dans le second cas, tous les organes auront sensiblement la même cote sur ce diagramme.

Pour effectuer ce suivi du nombre de défectueux de la production globale, la performance de la carte classique aux attributs de type Shewhart présentée auparavant est assez mauvaise.

En effet, si nous considérons un procédé d'embouteillage de cadence $c=40000$ bouteilles/h, avec $p_0=0.1\%$, et des échantillons de taille importante $n=15000$ bouteilles, nous obtenons alors la limite de contrôle $Lc=27$ alors que la moyenne de défectueux ne vaut que $n.p_0=15$.

Pour qu'un dérèglement du procédé soit détecté, il faudra donc attendre que le nombre de défectueux d'un échantillon soit supérieur à 27 soit une proportion supérieure à 0.18% qui est presque le double de la proportion recherchée. Entre temps, étant donné la cadence importante de production, un grand nombre de produits défectueux aura été fabriqué.

Nous sommes alors confrontés au même problème qu'avec les cartes de Shewhart aux mesures, à savoir une faible sensibilité à de petits décalages de la moyenne.

De plus, le problème est ici aggravé, car l'enjeu est de limiter un nombre de défectueux, et non de maîtriser l'évolution d'une mesure qui peut éventuellement amener des non conformes.

Pour remédier à ce problème, nous proposons deux solutions. La première est une amélioration de l'efficacité par l'utilisation d'une carte EWMA. La seconde est une diminution de l'effectif des échantillons.

- **Amélioration de l'efficacité par une carte EWMA**

Pour améliorer l'efficacité de la carte de contrôle aux attributs, une première alternative est d'utiliser des règles de détection de tendances, identiques à celles employées pour les cartes Shewhart de la moyenne. Mais nous avons montré que leur performance est assez faible.

Nous proposons alors l'emploi d'une carte EWMA pour le suivi d'attributs.

Cette carte est conçue à l'origine pour suivre des caractéristiques mesurables, mais nous ne voyons pas de difficulté à l'appliquer aux attributs dans le cas où l'on peut approximer la loi de distribution des nombres de défectueux par une loi normale ($n.p_0 > 10$). Il suffit alors d'utiliser l'écart type et la moyenne de cette distribution approximée dans les formules de définition de la carte EWMA.

D'autre part, étant donné que nous considérons une certaine dépendance entre les échantillons pour le suivi des caractéristiques mesurables, il est logique de considérer également cette dépendance pour le suivi d'attributs et donc d'utiliser une carte à mémoire.

L'utilisation d'une carte EWMA permettra ainsi une meilleure réactivité aux petits dérèglages du procédé.

Comme pour la maîtrise de la moyenne de caractéristiques mesurables, nous pouvons utiliser une carte Shewhart en combiné avec une carte EWMA afin d'obtenir une réactivité optimale aux dérives importantes comme aux dérives lentes. De plus, la carte Shewhart fournira un tracé de l'évolution chronologique des valeurs instantanées des nombres de défectueux, tracé qui peut être pertinent pour l'établissement de rapports de production.

- **Amélioration de l'efficacité par la réduction de la taille des échantillons**

Lors de dérives importantes, générant la fabrication d'une proportion très conséquente de défectueux supérieure à une limite critique fixée p_c , il est nécessaire de déclencher une réaction de type réflexe sur le procédé, entraînant soit l'arrêt immédiat de la production soit un mode de fonctionnement dégradé (réduction de la cadence par exemple).

Or, un dérèglement brusque et important ne pourra être détecté au mieux qu'après n bouteilles, soit dans notre exemple précédent après 15000 bouteilles, et cela quelle que soit la carte de contrôle utilisée. Un grand nombre de défectueux seront alors fabriqués sans aucune réaction.

Pour remédier à ce problème, nous proposons d'effectuer une observation de la qualité de la production sur un certain nombre de fenêtres glissantes d'effectifs différents et inférieurs à n .

Une fenêtre glissante d'indice i de taille k_i est en fait l'échantillon constitué des k_i derniers produits fabriqués.

Sur chacune des fenêtres glissantes, nous calculerons alors la limite critique Lc_i dont le dépassement entraînera une réaction de type réflexe. La limite Lc_i est calculée comme la limite de contrôle d'une carte de Shewhart définie pour des échantillons de taille k_i , et visant à maintenir un nombre de défectueux égal à $n.p_c$.

Exemple :

Pour illustrer cette proposition, reprenons notre exemple précédent où $n=15000$, $p_0=0.1\%$, et choisissons $p_c=0.4\%$.

Nous définissons 3 fenêtres glissantes f_1 , f_2 , f_3 de tailles respectivement 20, 1000 et 5000.

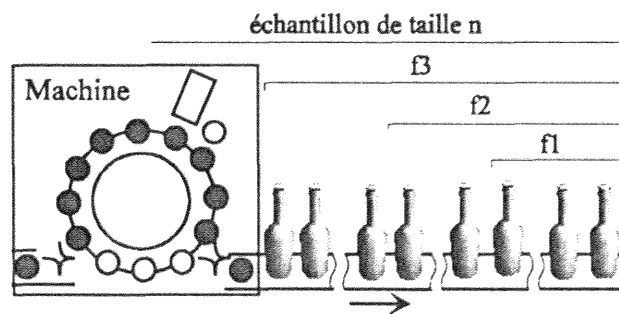


Figure II.25 : Fenêtres glissantes

La fenêtre f_1 doit être de faible taille, car elle a pour fonction de générer une réaction très rapide lorsqu'un dérèglement très important est survenu, provoquant subitement une grosse part de défectueux.

Pour f_2 et f_3 , nous calculons les limites $Lc_2=11$, $Lc_3=33$. Pour f_1 le calcul nous donne $Lc_1=1$, mais cette fenêtre étant de très petite taille nous préférons choisir une valeur de Lc_1 supérieure, par exemple $Lc_1=4$, afin d'éviter de stopper la production normale lorsque uniquement 2 produits défectueux sont apparus sur les 20 dernières bouteilles, ce qui n'est pas significatif de la proportion de défectueux de l'ensemble des produits.

Si dans ce cas nous avons une bouteille mauvaise toutes les 130 bouteilles produites, Lc_1 et Lc_2 ne sont jamais dépassées, mais nous aurons 38 bouteilles défectueuses après 5000 bouteilles fabriquées et Lc_3 sera franchie déclenchant une réaction de type réflexe.

Si cette réaction provoque l'arrêt de la production, nous aurons donc évité la fabrication du nombre de bouteilles défectueuses qui auraient été produites jusqu'à l'obtention d'un échantillon de 15000 bouteilles, soit :

$$\text{nb. de bouteilles défectueuses économisées} = (15000-5000)/130 \approx 77 \text{ bouteilles}$$

8.4 - Réduction des coûts de production

Lorsque le procédé est stabilisé, nous pouvons chercher à améliorer la position de la tendance centrale de hauteur de remplissage, de manière à réduire le volume de liquide utilisé. Cette amélioration est importante: nous avons en effet souligné au chapitre I, §3.3, les pertes financières considérables sur le long terme engendrées par le gaspillage de produit dû à un sur-remplissage.

Pour réduire ces pertes, il faut donc rapprocher la moyenne de hauteur de remplissage de la tolérance supérieure (la tolérance supérieure correspondant, comme dans le cas de notre expérimentation, au volume minimal de remplissage). Cela n'est évidemment envisageable que si les tolérances sont larges voire très larges par rapport à la dispersion ($C_p > 2.5$).

Nous viserons alors par exemple une position de la moyenne par rapport à T_s de 5 écarts types, ce qui garantit la capabilité de la machine en gardant une marge suffisante permettant des petites dérives de qualité sans production de défectueux.

Pour effectuer ce réglage de la position de la moyenne, nous proposons de calculer un indicateur PM (Position de la Moyenne) et de le fournir comme indicateur de conduite aux opérateurs, l'objectif étant de rapprocher PM de 1 tout en le conservant supérieur à 1.

$$PM = \frac{T_s - \bar{x}}{5 \cdot \sigma'_0}$$

L'indicateur PM que nous proposons est une adaptation du critère C_{pk} à une soutireuse.

9 - Conclusion

La MSP est une méthode désormais assez bien répandue, qui a suscité et suscite encore de nombreuses applications dans le domaine des procédés discontinus, et qui connaît également des développements industriels dans les processus continus.

Le procédé d'embouteillage, de par sa caractéristique essentielle qui est une haute, voire très haute, cadence de production, se rapproche de ces deux types de processus et nécessite alors la définition de stratégies particulières d'application de la MSP, stratégies que nous avons déterminées dans ce chapitre.

En effet, ce procédé exige de détecter le plus rapidement possible les dérives de qualité lentes mais également rapides, nécessitant pour sa surveillance l'emploi de différents types de cartes de contrôle.

Pour le suivi de la tendance centrale des caractéristiques des produits, nous nous sommes orientés vers l'utilisation de cartes de Shewhart et EWMA, permettant à la fois de détecter ces deux types de dérives, et de fournir des informations pertinentes pour la recherche des causes assignables. Nous avons ensuite expérimenté ces différentes cartes sur des données obtenues par une campagne de mesures réalisée sur un procédé d'embouteillage réel.

Quant au suivi des caractéristiques de type attribut, le manque d'efficacité des cartes traditionnelles nous a amené à proposer l'utilisation de cartes EWMA pour sa réalisation, ainsi que l'emploi de méthodes visant à réagir de manière réflexe sur le fonctionnement du procédé dans les cas d'urgence de nombres importants de défauts fabriqués.

Les stratégies et outils de suivi statistique ainsi définis constituent le moteur d'analyse de données de qualité d'un système automatisé de maîtrise du procédé d'embouteillage présenté aux chapitres suivants.

Chapitre III :

Analyse Fonctionnelle d'un Système de Maîtrise de la Qualité du Procédé d'Embouteillage

1 - Introduction

Devant les cadences élevées de production et le flux important de données à traiter, nous avons souligné au chapitre I la nécessité d'automatiser certaines fonctions de gestion de la qualité du procédé d'embouteillage. Par ailleurs, pour assurer la qualité des produits livrés, nous avons montré la nécessaire complémentarité entre, d'une part la maîtrise du procédé de fabrication, et d'autre part une inspection à 100% des produits fabriqués.

Aussi, nous proposons un système automatisé de maîtrise de la qualité du procédé d'embouteillage effectuant l'inspection/tri des produits, et permettant la définition de modes de réactions sur l'état et le fonctionnement du procédé.

Dans cette optique, le système doit réaliser l'analyse statistique des données prélevées sur la production suivant les stratégies définies au chapitre précédent pour, d'une part réagir sur la conduite du procédé, de manière automatique ou par l'intermédiaire de l'opérateur de production et du service assurance qualité, et d'autre part aider à la maintenance de la ligne de conditionnement.

L'interaction du système avec son environnement de production alliant automatismes et opérateurs humains est donc d'une importance majeure.

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord un modèle de référence fonctionnel de ce système, et nous analysons ensuite les flux informationnels générés par la communication de celui-ci avec les divers intervenants sur la ligne de production. Cette analyse nous amènera à proposer une architecture fonctionnelle du système à deux niveaux. Pour finir, nous montrerons les apports que sa mise en oeuvre devrait amener pour la gestion d'une ligne d'embouteillage.

2 - Analyse fonctionnelle

2.1 - Décomposition fonctionnelle

Le système de maîtrise de la qualité ayant pour objectifs, d'une part de réaliser l'inspection/tri des produits, et d'autre part de permettre la maîtrise du procédé d'embouteillage, il devra mettre en oeuvre deux boucles de réaction sur la ligne de conditionnement [COL96b]. Ces boucles sont illustrées par la figure suivante :

- La première (traits pointillés) effectue une inspection suivi d'un tri des produits.
- La seconde (traits continus) surveille le procédé de fabrication, et a pour objectif de réagir sur celui-ci lors de l'apparition de causes assignables.

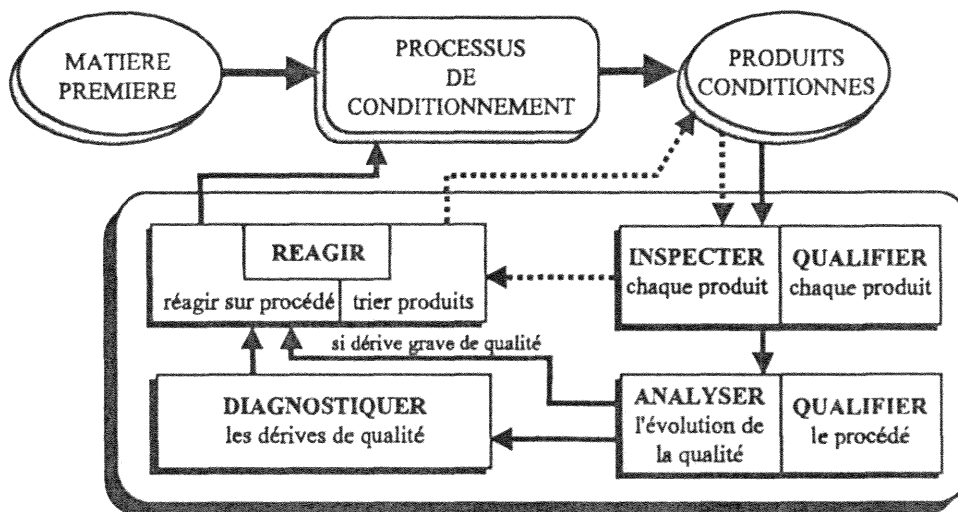


Figure III.1 : Synoptique de maîtrise du procédé d'embouteillage

Pour réaliser ces boucles, une première analyse nous fait apparaître que le système doit réaliser séquentiellement les fonctions principales suivantes (figure III.1):

- **Inspecter/Qualifier chaque produit**

L'inspection constitue la prise de données des mesures de qualité des produits. Elle permet d'une part, dans le cadre d'une maîtrise indirecte (cf. Chap.II §2.3), de suivre le comportement du procédé, et d'autre part de qualifier les produits afin de pouvoir les trier. Il est important de noter ici que nous ne nous limiterons pas à une qualification en produits conformes et non conformes, mais nous considérerons plusieurs classes de qualité.

- **Analyser l'évolution de la qualité/Qualifier le procédé**

Cette fonction réalise la surveillance de l'évolution du comportement du procédé, notamment par le tracé de cartes de contrôle. Elle évalue également sa performance par le calcul de capabilités.

• Diagnostiquer

Lorsque des dérives de qualité ont été détectées, la phase de diagnostic a pour objectif de déterminer les causes de variations. Cette phase pourra être effectuée automatiquement par le système, en collaboration avec l'opérateur, ou laissée à la charge du service maintenance.

• Réagir

Deux types de réactions sont donc nécessaires. Le premier s'attachera aux produits en réalisant leur tri. Le second interviendra sur le fonctionnement ou l'état du procédé, soit en réagissant automatiquement sur la partie commande de celui-ci, soit en suggérant une action manuelle de maintenance ou de modification de conduite.

Afin d'établir un modèle fonctionnel du système réalisant ces boucles de réaction sur la ligne de conditionnement, nous avons utilisé la méthode S.A.D.T. (Structure Analysis and Design Technique) [IGL89]. Cette méthode permet par une décomposition descendante modulaire et hiérarchique, de décrire les différentes fonctions présentées ci-avant, et participant à l'accomplissement de l'activité principale (diagramme A-0) qui est "Maîtriser la qualité". Par ailleurs, la méthode SADT nous permet de décrire les informations échangées par ces fonctions et de définir les sorties qu'elles génèrent.

Le diagramme SADT A0 décrivant le premier niveau de cette décomposition est le suivant:

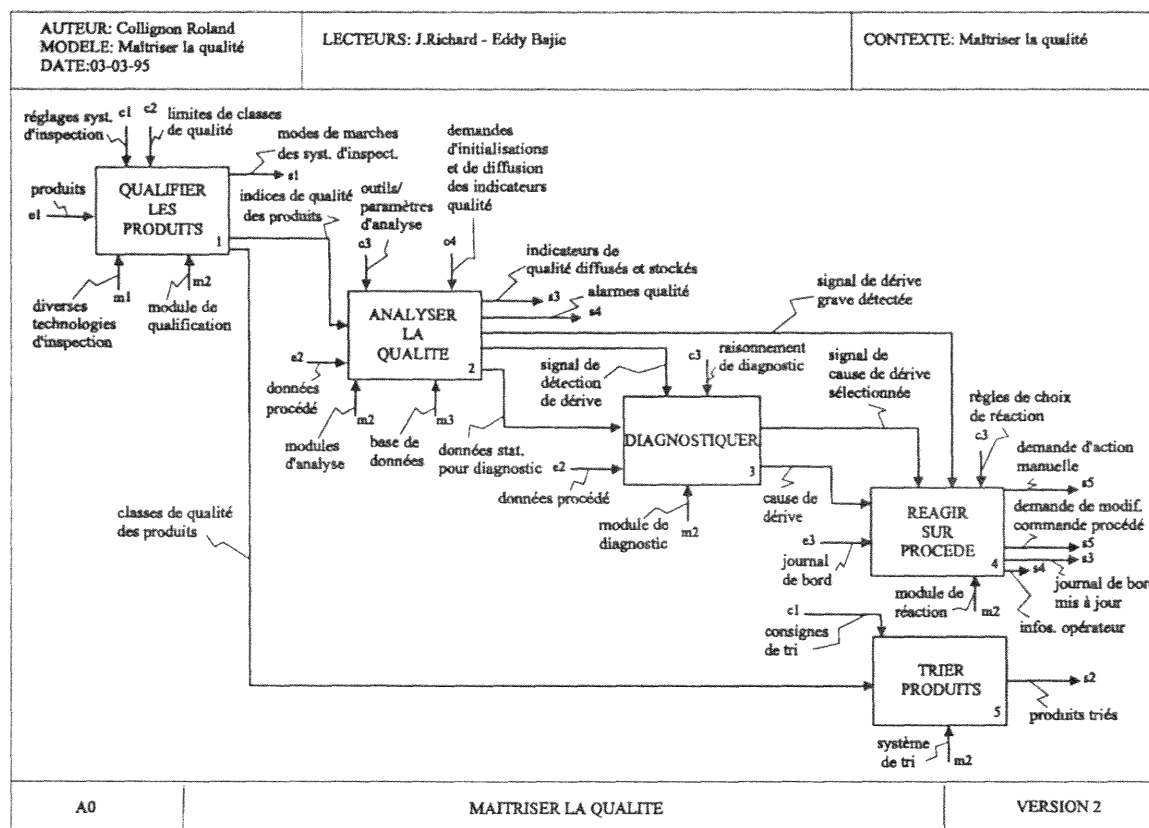


Figure III.2 : Diagramme SADT de l'activité « Maîtriser la qualité »

Sur ce diagramme apparaissent des informations diffusées à divers sites de l'entreprise, telles que des indicateurs et alarmes de qualité, des demandes de réaction sur le procédé,... Il est en effet essentiel, afin d'avoir un suivi de la qualité ainsi qu'une réactivité optimaux, d'établir une communication entre le système de maîtrise de la qualité et les divers centres de responsabilités impliqués dans la gestion de la chaîne de conditionnement. Dans cet objectif, nous établirons, en seconde partie de ce chapitre, un modèle de communication du système avec ces différents sites. Dans les diagrammes SADT présentés ici, nous ne détaillerons alors pas ces échanges d'informations par soucis de clarté.

Décrivons maintenant plus précisément les différentes activités du diagramme A0.

2.2 - Qualifier les produits

L'activité "Qualifier les produits" peut se décomposer en deux phases:

- Une phase d'inspection (activité A11, figure III.3) qui permet d'obtenir les mesures des caractéristiques des produits.
- Une phase de qualification, décomposée en trois étapes (activités A12,A13,A14), qui calcule à partir de ces mesures, des Indices de Qualité de Caractéristiques et de Produit (IQP et IQC) pour chaque bouteille inspectée, permettant notamment le tri des produits en différentes classes de qualité.

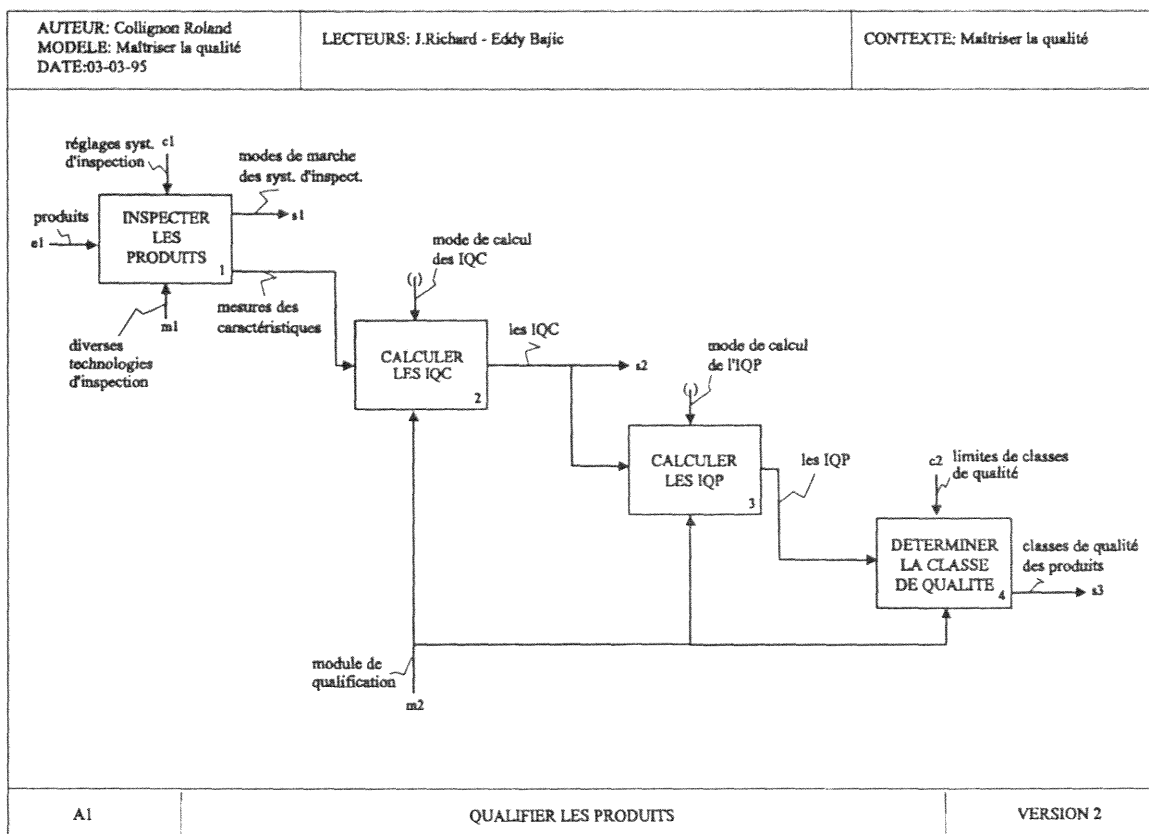


Figure III.3 : Diagramme SADT de l'activité « Qualifier les produits »

Afin de comprendre la fonction de la phase de qualification, décrivons tout d'abord l'activité "inspecter les produits".

2.2.1 - L'inspection des produits

L'inspection dans le domaine de l'embouteillage est réalisée soit par des systèmes automatisés soit par des moyens humains.

- **Les moyens humains**

L'inspection par des opérateurs humains ne permet pas de récupérer des données suffisamment rapidement pour pouvoir effectuer un suivi de la qualité en temps réel.

Par ailleurs, les fortes cadences alliées à des conditions difficiles dégradent très rapidement l'appréciation visuelle, aussi une inspection à 100% des produits ne pourra être garantie.

Néanmoins, de par sa capacité d'adaptation à l'imprévu, l'inspection humaine est souvent efficace en contrôle complémentaire à un système automatisé [COL96c].

En effet, un système automatisé ne peut être prévu pour détecter tous les défauts de qualité pouvant survenir, souvent simplement parce qu'ils ne sont pas tous connus. De plus, une défaillance imprévue et incontrôlée d'un de ces systèmes peut toujours apparaître. Pour ces raisons, la présence humaine peut être considérée comme un facteur de fiabilité d'un dispositif d'inspection [BON93].

- **Les systèmes automatisés**

Afin de garantir une inspection à 100% des produits, il est donc nécessaire d'utiliser des systèmes automatisés.

Aussi, nous avons mené une étude concernant les principaux moyens d'inspection exploités à l'heure actuelle dans le domaine de l'embouteillage. Le tableau suivant présente un récapitulatif des résultats de cette étude.

Les technologies et les principes physiques mis en oeuvre sont variés et se différencient, d'une part par le type d'informations qu'ils peuvent fournir dans le suivi de la qualité, et d'autre part par leur faculté d'intégration dans une ligne de conditionnement.

Capteurs peu encombrants, peu coûteux, d'utilisation facile et très courante, fournissant des informations de type tout ou rien	
capteurs de proximité inductifs	-Principe: détection d'éléments métalliques par induction de courants de Foucault lors du passage dans un champ électromagnétique -Avantage: mise en oeuvre aisée -Inconvénient: doit être placé près de l'élément à détecter (quelques millimètres) -Exple. d'utilisation: détection de l'absence de capsules de bouteilles de bière
capteurs de proximité capacitifs	-Principe: oscillation d'un circuit RC par passage de l'élément à détecter dans un champ électrique -Avantage: détection d'éléments métalliques et non conducteurs (distance de détection plus faible) -Inconvénient: doit être placé près de l'élément à détecter (quelques millimètres) -Exple. d'utilisation: détection de résidus de liquide dans les bouteilles consignées
cellules optiques	-Principe: pour les plus classiques, détection de la présence d'un élément par barrage ou réflexion directe d'un faisceau lumineux généralement infrarouge, et pouvant être également laser ou diffusé par fibres optiques. D'autres plus sophistiquées permettent de détecter des différences de contrastes ou de couleurs. -Avantage: grand choix de caractéristiques et de variétés -Inconvénient: difficultés de réglage sur certains produits transparents (laissant passer le faisceau) ou réfléchissants (si fonctionnement en barrage) -Exple. d'utilisation: détection de présence d'étiquette ou de bouchon
Systèmes plus sophistiqués (mise en oeuvre par un spécialiste), se présentant généralement sous forme d'un pont placé sur un convoyeur unifilaire, capables soit de fournir des informations tout ou rien, soit des mesures des caractéristiques	
systèmes à rayonnements gamma	-Principe: mesure seuillée (info. t.o.r.) de l'absorption par l'élément inspecté des rayonnements émis -Avantage: possibilité d'inspection à travers les contenants opaques et métalliques -Inconvénient: utilisation nécessitant une autorisation spéciale de la part des autorités légales -Exple. d'utilisation: détection de sous-remplissage de bouteilles ou boîtes métalliques, précision maximale de l'ordre du millimètre
systèmes à champ électrique hyperfréquence	-Principe: modification par l'élément inspecté de l'amplitude des oscillations hyperfréquences d'un champ électrique -Avantages: capables de mesures - convient aux contenants opaques, pas d'autorisation spéciale nécessaire -Inconvénient: ne convient pas aux contenants métalliques -Exple. d'utilisation: mesure de hauteur de remplissage de bouteilles (difficultés si présence de mousse), précision maximale de l'ordre du millimètre
systèmes utilisant la vision artificielle	-Principe: analyse d'images numériques prises par caméras CCD de l'élément à inspecter -Avantages: capables de mesures - inspections plus sophistiquées possibles telles que contrôles de forme et d'aspect, reconnaissance de logos, lecture d'inscriptions - nombre important de caractéristiques pouvant être inspectées simultanément -Inconvénients: impossibilité d'inspecter à travers un contenant opaque - doit être protégé des perturbations extérieures (projection d'eau, saletés, ...) -Exple. d'utilisation: contrôle du positionnement d'étiquettes, précision maximale de mesure de l'ordre de 0.5 millimètre

Figure III.4 : Les principaux moyens d'inspection en embouteillage

La vision artificielle est sans aucun doute la technologie la plus performante à l'heure actuelle car la plus polyvalente et la plus précise. Autrefois limitée par des temps de traitement parfois trop longs, elle réussit aujourd'hui à s'imposer même pour des cadences de production très élevées, et ses performances en termes de rapidité et de possibilités de contrôle continuent de s'améliorer. Sa seule réelle limitation est l'inspection de caractéristiques difficilement visibles

par caméras comme un niveau de remplissage dans une boîte métallique ou dans une bouteille très opaque.

- **La nécessité d'utiliser différentes technologies d'inspection**

Le tableau précédent nous montre que chaque technologie est capable d'inspecter des caractéristiques différentes, dans des conditions spécifiques.

Aussi, afin d'avoir une inspection la plus complète, un système automatisé d'inspection doit pouvoir agréger des données de qualité provenant de plusieurs capteurs utilisant des technologies différentes complémentaires.

Par exemple, pour inspecter l'étiquetage d'une bouteille, nous utiliserons la vision artificielle, alors que le contrôle de remplissage ne pourra se faire que par capteur hautes fréquences si le niveau liquide est masqué par l'étiquette.

Par ailleurs un système d'inspection doit pouvoir accepter des signaux provenant de différents capteurs pour des raisons de flexibilité. En effet, une augmentation considérable des variantes des produits, et la nécessité de répondre rapidement aux souhaits des divers clients, engendre des changements fréquents de caractéristiques des produits sur une même ligne de conditionnement. Un système d'inspection doit alors pouvoir s'adapter facilement à cette variabilité des caractéristiques.

2.2.2 - La qualification des produits

Pour déterminer la qualité d'une caractéristique du produit inspecté, plusieurs capteurs sont éventuellement nécessaires, générant des mesures dont les échelles sont différentes. Une fusion de ces diverses mesures doit alors être réalisée pour déterminer un Indice de Qualité pour la Caractéristique observée (IQC). Cet IQC pourra être utilisé pour le suivi par carte de contrôle.

Nous noterons néanmoins que dans la grande majorité des cas, un seul moyen d'inspection est nécessaire par caractéristique.

Ensuite, par une pondération des IQC de chaque caractéristique, nous obtenons un Indice de Qualité du Produit (IQP) qui quantifie la qualité de chaque bouteille prise dans sa globalité.

Les IQP permettent alors un tri des bouteilles en différentes classes de qualité, le nombre minimal de classes étant deux: produits conformes et non conformes.

Ainsi par exemple, suivant la qualité générale du conditionnement d'une bouteille (sur-bouchage et étiquettes plus ou moins bien posés, bouteille plus ou moins remplie à l'intérieur de la tolérance), celle ci pourra être destinée à un marché exigeant ou plus laxiste.

Dans le domaine de l'embouteillage, une telle sélection des produits n'est pas, à notre connaissance, pratiquée à ce jour. Mais nous pensons que l'approche que nous proposons ici pourrait être appliquée notamment lorsque les exigences de qualité sont très différentes en fonction du pays de destination des produits.

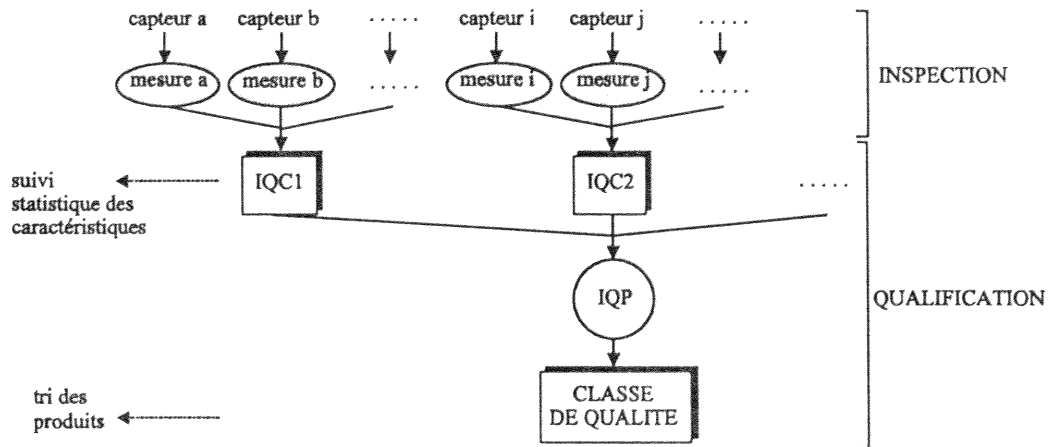


Figure III.5 : La détermination des Indices de Qualité

2.3 - Analyser la qualité

La fonction d'analyse de la qualité peut se décomposer en trois étapes principales comme le montre le diagramme suivant:

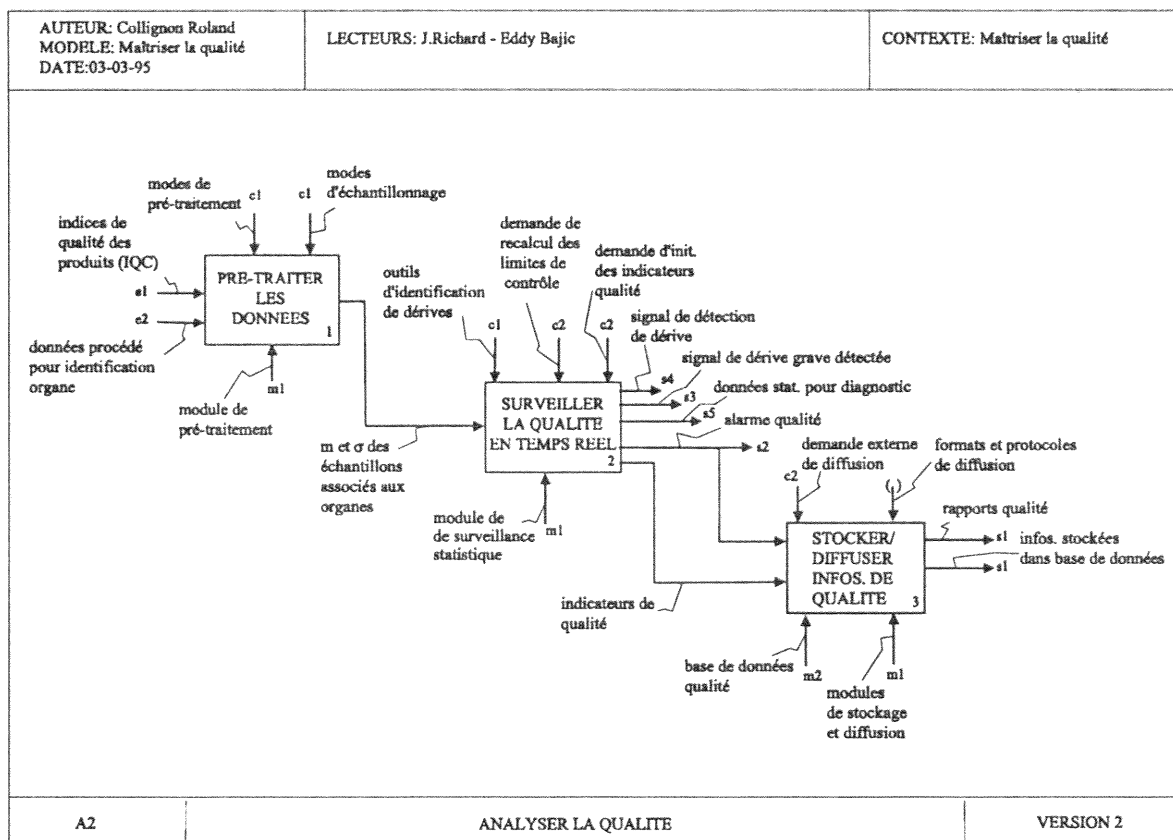


Figure III.6 : Diagramme SADT de l'activité « Analyser la qualité »

2.3.1 - Pré-traiter les données

Nous avons souligné au chapitre II la nécessité de suivre individuellement par carte de contrôle chaque organe de fabrication des machines d'embouteillage. Dans ce but, pour chaque produit inspecté, il est donc nécessaire d'identifier l'organe qui a réalisé sa fabrication.

Cette identification, effectuée par l'activité "Pré-traiter les données", est obtenue par un algorithme qui prend en compte des signaux de divers capteurs placés sur la machine de conditionnement (algorithme décrit au chapitre IV).

Lorsqu'un échantillon correspondant à un organe est complet (n valeurs individuelles ont été récupérées), le module de pré-traitement calcule la moyenne et l'écart type de l'échantillon avant de transmettre ces deux paramètres au module de surveillance pour le tracé des cartes de contrôle.

Le module de pré-traitement transforme ainsi une quantité importante de données de base que sont les mesures individuelles, en une information plus dense et plus riche, ce qui permet de réduire les temps de calculs et de manipulation de données au cours de la chaîne de traitement de l'information.

2.3.2 - Surveiller la qualité en temps réel

La surveillance de la qualité en temps réel s'effectue par le tracé des cartes de contrôle suivant les stratégies de suivi définies au chapitre II.

Lorsqu'une dérive de qualité est détectée, une alarme avertit l'opérateur et le module de diagnostic est déclenché. Dans certains cas où la dérive constatée provoque rapidement une grande quantité de défectueux, l'activité "Réagir sur procédé" pourra être activée immédiatement à des fins de réaction réflexe sur le procédé, sans perdre de temps dans la phase de diagnostic.

Ce module de surveillance qualifie également le procédé par le calcul des capacités. Il met par ailleurs en forme des informations autres que les cartes de contrôle, telles que les histogrammes, des compteurs de production et le diagramme de Pareto des fréquences des différents types de défauts.

2.3.3 - Stocker/diffuser les informations de qualité

Pour l'analyse statistique à posteriori et les besoins de traçabilité, les moyennes et écarts types des échantillons ainsi que les divers indicateurs de qualité sont ensuite archivés dans une base de données spécialisée. Pour une soutireuse, cette quantité de données représente

environ 1,6 Mo par jour si nous considérons que toutes les bouteilles produites sont utilisées pour la constitution des échantillons, ce qui reste tout à fait raisonnable.

Le système diffusera également, par l'intermédiaire de cette activité, les indicateurs de qualité (cartes de contrôle, indices de capabilité, diagrammes de Pareto,...) à l'opérateur et au service Assurance Qualité. Nous détaillerons ces flux d'informations dans la suite de ce chapitre.

2.4 - Diagnostiquer

La phase de diagnostic a pour objectif de déterminer la (ou les) cause(s) assignable(s) probable(s) ayant provoqué la détection d'une dérive de qualité par l'activité "Analyser la qualité".

L'opération de diagnostic est complexe, elle nécessite un raisonnement déductif à partir de données sur l'état et le fonctionnement du procédé.

Pour sa réalisation de manière automatique ou avec l'aide de l'opérateur, les systèmes experts sont aujourd'hui les outils offrant les meilleurs résultats. Nous proposons alors la mise en oeuvre d'un système expert pour la réalisation de la phase de diagnostic de notre système de maîtrise du procédé d'embouteillage.

2.4.1 - Description d'un système expert

D'après G. Zwingelstein [ZWI95], un système expert est « *Un système informatique destiné à résoudre un problème à partir d'une analyse et d'une représentation des connaissances et du raisonnement d'un (ou plusieurs) spécialiste(s) de ce problème* ».

Un système expert est donc composé de deux éléments principaux:

- Une base de connaissances regroupant d'une part des données sur le procédé, appelée base de fait, et d'autre part le savoir et savoir-faire (ou connaissance heuristique) du spécialiste, appelée base de règles.

- Une structure de contrôle, ou moteur d'inférence, chargé de mettre en oeuvre le raisonnement à partir de ces connaissances, et destiné à conduire à la solution au problème posé.

Le fonctionnement d'un système expert peut se représenter par le schéma suivant [LEV89]:

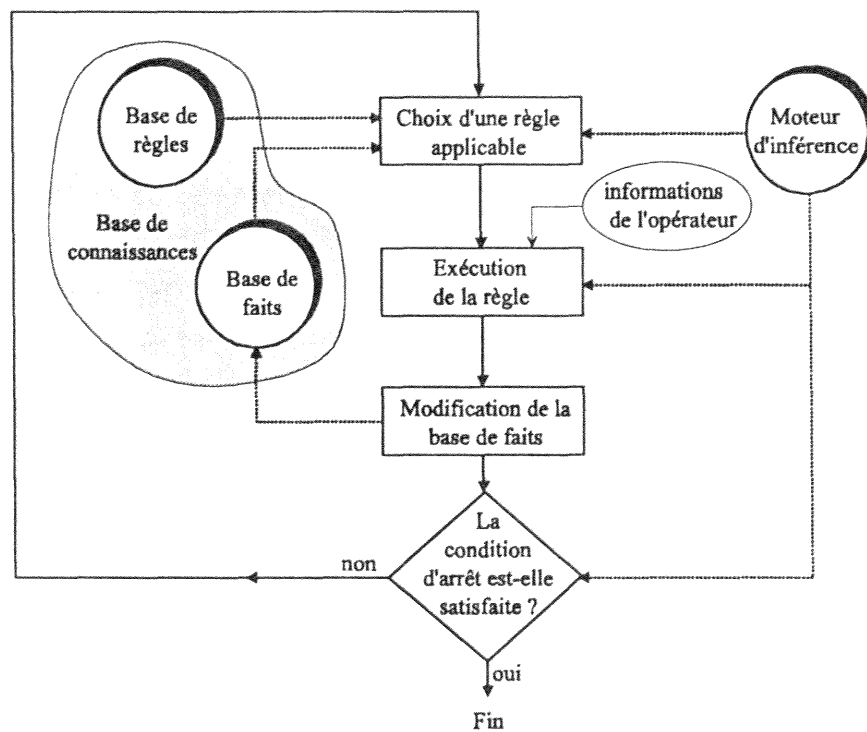


Figure III.7 : Le fonctionnement d'un système expert

- **La base de faits**

La base de faits contient d'une part toutes les données élémentaires, ou assertions, recueillies sur le procédé et pouvant être utilisées pour la réalisation du diagnostic, et d'autre part les informations déduites du raisonnement. La base de faits est dynamique, elle est remise à jour continuellement.

- **La base de règles**

Les règles, appelées également règles de production, sont les processus élémentaires de raisonnement qui, en s'enchaînant, amènent à la résolution du problème posé. Les règles se présentent, sous leur forme la plus simple et la plus usuelle, suivant le modèle suivant:

Si *prémisse vraie* alors *conclusion vraie*

La base de règles est évolutive et doit être enrichie au fur et à mesure de la résolution de nouveaux problèmes de diagnostic, permettant ainsi une capitalisation des connaissances. Les mises à jour de la base de règles sont alors facilitées par [LEV89]:

- L'aspect modulaire du système expert:

Les connaissances sont indépendantes du moteur d'inférence. Les règles peuvent alors être écrites dans n'importe quel ordre. On peut en ajouter, en retirer, ou les modifier sans être

inquiétude de la faisabilité du programme.

- La lisibilité de la base de connaissances:

La description des règles est généralement indépendante du langage de programmation. Les règles sont sous une forme accessible aux non informaticiens.

• Moteur d'inférence

Le moteur d'inférence a pour rôle de déterminer la succession des règles à appliquer, de les exécuter et de tester si la condition d'arrêt du raisonnement est satisfaite.

Le choix d'une règle applicable est délicat. Il nécessite tout d'abord de déterminer l'ensemble des règles simultanément applicables à un état donné de la base de faits, cette opération est le filtrage. L'étape de filtrage est assez longue si elle est réalisée sur la totalité de la base de règles, aussi de nombreux systèmes effectuent auparavant une phase de présélection de celles-ci, appelée restriction. Ensuite, parmi les règles applicables, il faut en choisir une, c'est l'opération de sélection.

2.4.2 - Composition de la base de connaissances

Dans le cadre de notre problématique, nous proposons d'utiliser deux types de connaissances:

- La connaissance générale basée sur l'état et le fonctionnement du procédé
- La connaissance comportant les données statistiques et leurs règles d'analyse

Le schéma suivant présente la composition de ces connaissances que nous détaillons ci-après.

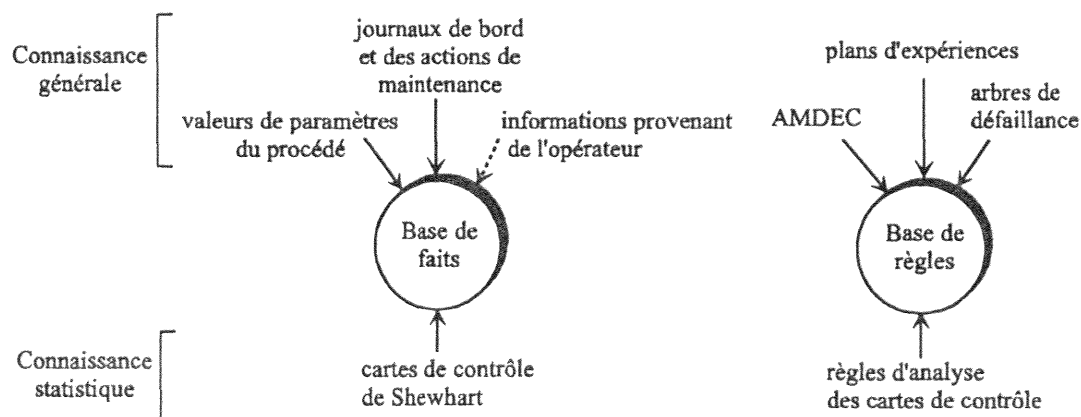


Figure III.8 : Composition de la base de connaissances

Décrivons tout d'abord la composition des bases de faits et de règles de la connaissance générale.

- **La connaissance générale**

- **La base de faits**

Parmi les informations constituant la base de faits de la connaissance générale, nous distinguons:

- Les données obtenues par divers capteurs, renseignant sur l'état de certains paramètres du procédé, comme une température de colle pour l'étiqueteuse ou une cadence de production pour une soutireuse. Nous remarquerons ici que cette récupération de données du procédé correspond au compromis entre une maîtrise directe et indirecte du processus présentée au chapitre II (§2.3).

- Des informations complémentaires fournies par l'opérateur, et pour lesquelles la mise en oeuvre d'une récupération automatique est économiquement ou physiquement irréalisable. Ces informations ne figurent pas dans la base de faits au départ d'un raisonnement, mais y sont ajoutées lors de l'exécution des règles de diagnostic nécessitant un questionnement de l'opérateur.

- Les journaux de bord et des actions de maintenance du procédé. En effet, il est essentiel pour faciliter le diagnostic et orienter les recherches, de connaître les modifications passées des éléments constituant le procédé.

- **La base de règles**

Pour le diagnostic des systèmes industriels, les règles sont généralement déduites de l'analyse préliminaire du procédé, réalisée avant la mise en oeuvre de la MSP [ZWI95]. Nous avons décrit au chapitre II les principaux outils utilisés pour cette analyse qui sont l'AMDEC, les arbres de défaillance et éventuellement les plans d'expériences. Nous remarquerons à ce titre les travaux de M. Gondran [GON84] et P. Zumegen [ZUM88] qui proposent une méthode permettant, à partir d'une analyse AMDEC, la réalisation d'un modèle de connaissance pouvant être utilisé dans un système expert.

- **La connaissance statistique**

Nous avons préconisé au chapitre II l'emploi de cartes de contrôle de Shewhart car elles fournissent une représentation utile au diagnostic de l'évolution des valeurs instantanées de la qualité des produits.

Nous proposons en effet d'utiliser ces cartes afin de reconnaître des schémas d'évolution des caractéristiques de qualité observées. Ces schémas d'évolution constitueront des indices pour la recherche des causes assignables.

Pour reconnaître ces schémas d'évolution, nous appliquerons sur les cartes Shewhart, des règles d'identification de tendances de même type que celles présentées au chapitre II (§4.2.4), comme par exemple: 5 points consécutifs en zone B. Ces règles ne serviront alors pas à détecter des dérives, car comme expliqué au chapitre précédent nous leur préférons les cartes EWMA, mais comme aide au diagnostic.

Dans la base de connaissances du système expert, nous établirons alors des règles de raisonnement du type suivant :

(Nous considérons dans cet exemple le cas du suivi de la hauteur de remplissage des bouteilles)

Si *alarme sur carte EWMA de suivi de la production globale,* (1)

Si *5 points en zone B sur la carte Shewhart de la moyenne de la production globale,* (2)

Si *écart type de production globale stable,* (3)

Alors *forte probabilité d'un dérèglement d'un élément général à la soutireuse.* (4)

La conclusion (4) sera alors intégrée à la base de faits pour être utilisée ensuite par des règles de la connaissance générale mettant en oeuvre des données du procédé. La connaissance statistique constitue donc l'étape préliminaire du raisonnement et permet d'orienter les recherches des causes assignables.

Néanmoins, si une correspondance a été établie entre le schéma d'évolution (2) et une cause assignable précise, la règle de raisonnement peut permettre d'obtenir directement la solution au problème de diagnostic. Dans ce cas, la condition (3) de l'exemple précédent n'est éventuellement pas nécessaire, et la conclusion (4) pourrait être par exemple:

Alors forte probabilité d'un dérèglement de la hauteur des organes de fabrication.

L'utilisation de la connaissance statistique nécessite donc d'avoir établi des correspondances entre des schémas d'évolution et la présence de causes assignables données. Pour les causes les plus fréquentes, la mise en évidence de schémas types peut être relativement aisée. Pour les autres cas, il sera nécessaire d'analyser à posteriori les cartes de contrôle afin d'établir ces correspondances par croisement avec les journaux de bord et des actions de maintenance [DOI92][LOV89]. La base de règle sera ainsi enrichie progressivement.

Pour améliorer l'identification des schémas d'évolution, divers travaux de recherche ont porté ces dernières années sur la mise en oeuvre de réseaux de neurones [SMI94][HWA91][PUG91]. Les réseaux de neurones étant performants pour les problèmes de reconnaissance de formes et de classification, ils semblent bien adaptés à notre

problématique. Ils permettent alors d'identifier des schémas plus subtils tels que cycles, stratifications ou mélanges de plusieurs distributions statistiques [HWA91].

Nous noterons que différents travaux de recherche et applications ont eu pour objet l'association de la MSP et des systèmes experts, parmi ceux-ci nous citerons les travaux de J.R.Evans [EVA88], P.Zumegen [ZUM88], et P.Love [LOV89] qui ont servi de base à notre étude. Quant au projet européen UNIQUE [CAP96], il utilise la connaissance statistique mais il met en forme les règles de diagnostic par des arbres de décisions, ce qui permet d'obtenir, pour les procédés peu complexes, une meilleure lisibilité qu'avec un système expert.

Au terme de cette étude, nous tenons à préciser que devant la complexité de la phase de diagnostic, l'analyse présentée ici constitue une ébauche donnant les orientations d'un travail de recherche à part entière, et qu'il sera nécessaire de mener au delà du cadre de cette thèse.

2.5 - Réagir sur le procédé

L'activité "Réagir sur le procédé" a pour objectif la modification de l'état ou du fonctionnement du procédé afin de prévenir et de limiter la fabrication de produits non conformes.

Le diagramme SADT de décomposition de cette activité est le suivant:

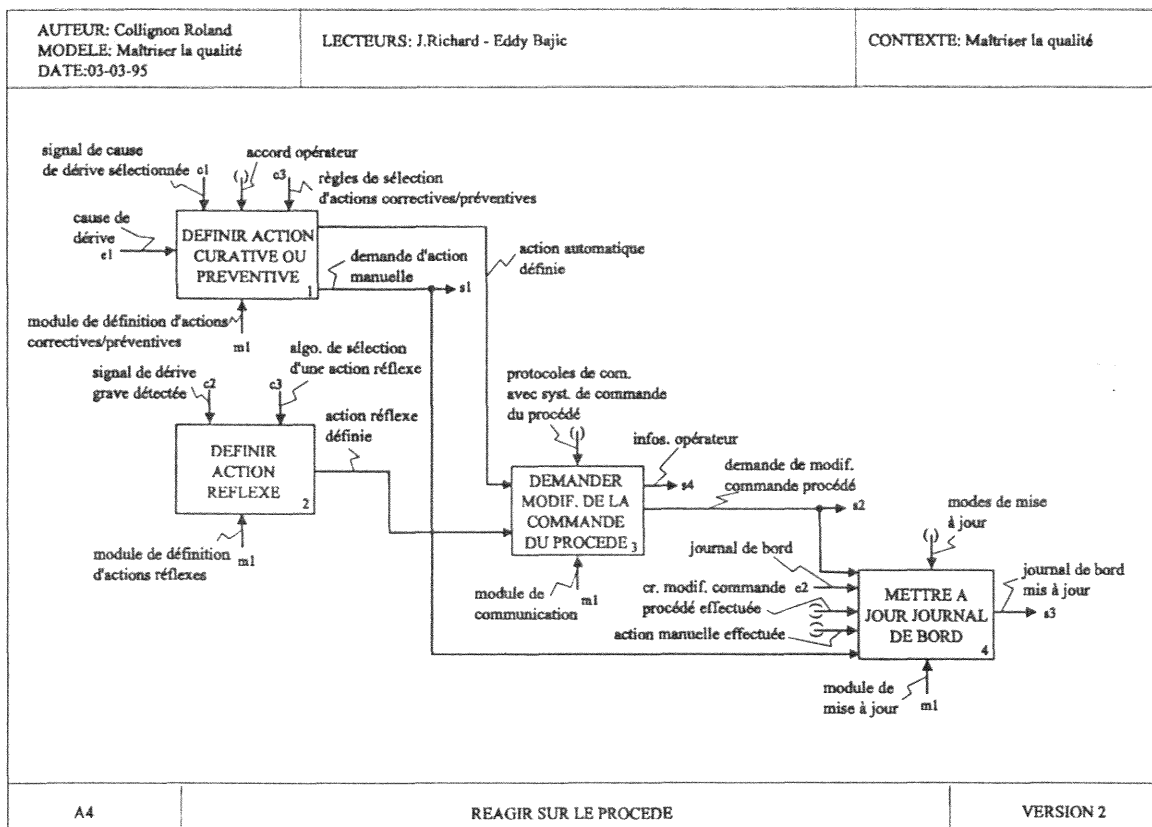


Figure III.9 : Diagramme SADT de l'activité "Réagir sur le procédé"

Comme indiqué sur ce diagramme, nous pouvons distinguer trois catégories de réactions, les réactions de type réflexe, les réactions préventives, et les réactions curatives.

La figure suivante, que nous explicitons ci-après, montre les différents types de réactions ainsi que leurs cas d'application. Notons qu'afin d'être complet dans notre analyse, nous considérons les réactions sur le procédé déterminées par le système (apparaissant sur le diagramme SADT), ainsi que celles définies à posteriori en d'autres sites de l'entreprise.

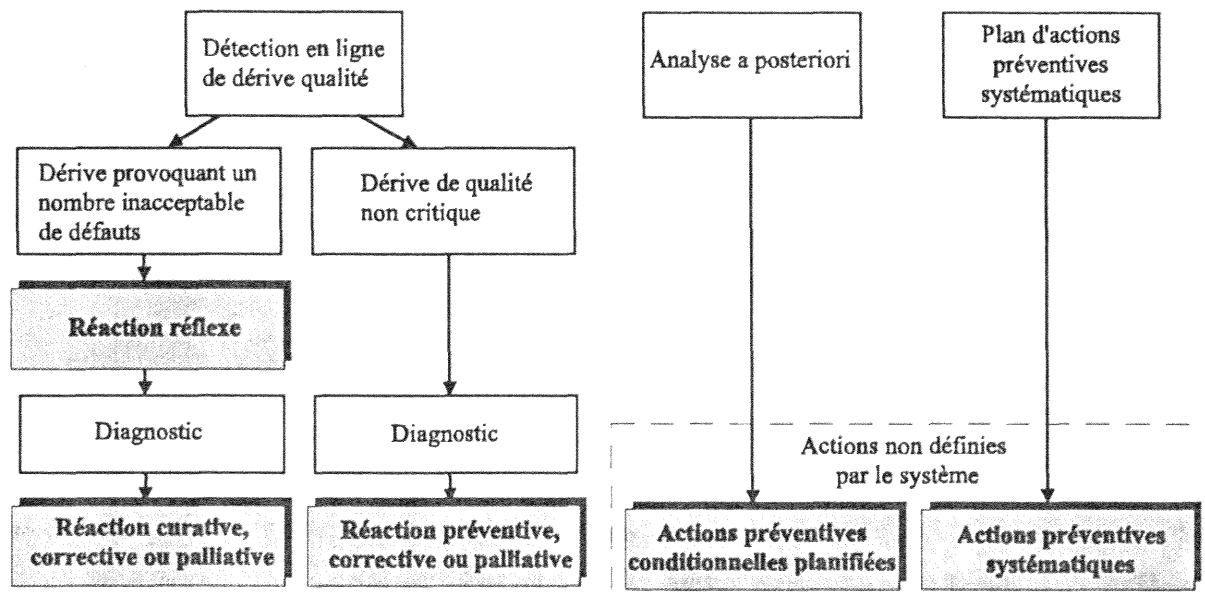


Figure III.10 : Les différents types d'actions sur le procédé

2.5.1 - Les réactions préventives

Les réactions préventives ont pour objet d'éviter la fabrication de produits défectueux. Parmi les réactions préventives définies par le système, nous distinguons deux objectifs différents:

- soit l'élimination de la cause assignable de dérive, nous parlerons alors de réactions préventives correctives.
- soit éventuellement de pallier momentanément à la dérive de qualité en agissant sur un élément autre que la cause assignable, nous parlerons alors de réactions préventives palliatives.

Ces réactions peuvent également avoir deux modes d'application, automatique ou manuel.

- **Les réactions préventives correctives**

Pour éliminer la cause assignable, et dans la mesure où celle-ci a été précisément identifiée, le système pourra dans certains cas demander la modification d'un paramètre de

marche directement à la partie commande du procédé. La mise en oeuvre de telles réactions automatiques nécessite alors une communication entre le système de maîtrise de la qualité et le système de pilotage des machines.

Pour les causes assignables nécessitant une action manuelle, le système pourra suggérer à l'opérateur, soit d'effectuer celle-ci, soit de faire appel au service de maintenance.

- **Les réactions préventives palliatives**

Dans certains cas, nous pouvons envisager que si la mise en oeuvre de l'action corrective visant à éliminer la cause est jugée trop perturbatrice du bon fonctionnement du procédé (action de maintenance manuelle trop longue, nécessitant plusieurs arrêts successifs), le système peut décider de pallier momentanément à la dérive de qualité en effectuant une autre action moins contraignante (action manuelle ou automatique).

Par exemple, considérons qu'un défaut de matière première ait été diagnostiqué pour une boucheuse. Ce défaut, qui s'avère être une légère imperfection de forme ou de matière du bouchon, génère la production de bouteilles dont le bouchon est incomplètement vissé. Dans ce cas, réagir sur l'approvisionnement de matière première est impossible à très court terme, aussi le système peut décider d'augmenter momentanément le couple de serrage de la machine pour obtenir un bon vissage. L'action corrective visant à disposer de matières premières conformes sera effectuée plus tard lors d'un arrêt de production par exemple.

Ce type d'action palliative est en fait envisageable lorsque plusieurs paramètres ou éléments du procédé ont une action semblable sur la qualité des produits, et que certains sont plus facilement accessibles ou modifiables que les éléments en défaut.

- **Les réactions préventives conditionnelles planifiées, et les actions préventives systématiques**

Ces deux types de réactions ne sont pas définis par le système, ils sont déterminés à posteriori et généralement mis en oeuvre de manière manuelle.

- **Les réactions préventives conditionnelles planifiées:**

Nous avons vu auparavant que l'analyse à posteriori des données de qualité pouvait mettre en évidence des causes de petites dérives (usure de pièces mécaniques, ou changements du milieu par exemple) non diagnostiquables en temps réel. Ces dérives provoquant un nombre négligeable de défauts à court terme, il devient possible de retarder et de planifier les interventions sur le procédé de manière à perturber le moins possible la

production. Ces actions peuvent donc être qualifiées de préventives conditionnelles planifiées.

- Les actions préventives systématiques:

Les actions préventives systématiques visent à changer ou régler des éléments prédéfinis du procédé avec une périodicité préétablie, et cela quel que soit leur état [ZWI95]. Ce type d'actions est coûteux car il amène à remplacer des éléments souvent encore en bon état, et à effectuer des interventions non réellement justifiées. En effet, la périodicité d'action est établie sur des durées de vie des composants minimisées et souvent difficilement évaluables.

La mise en oeuvre du système devrait alors permettre de réduire ces actions au profit d'interventions déclenchées par les alarmes et indicateurs de qualité.

2.5.2 - Les réactions de type réflexe

Les réactions de type réflexe ont pour objectif de réagir de manière immédiate dans les cas d'urgence de dysfonctionnements ou de dérèglages importants, provoquant la fabrication de grandes proportions de défectueux. Ces réactions sont générées automatiquement par le système. Leur action a pour effet, soit de stopper la production, soit de déclencher un mode de fonctionnement dégradé du procédé, qui est par exemple une baisse de la cadence de fabrication ou une non affectation de bouteilles vides aux organes de fabrication en défauts.

Les réactions réflexes sont déclenchées dès le dépassement d'une proportion critique de défauts, proportion suivie par carte de contrôle aux attributs ou par fenêtres glissantes (cf. Chapitre II, §8.3.2), et cela sans passer par la phase de diagnostic pour un besoin de gain de temps.

Notons par ailleurs que dans le cas d'une telle réaction, il est bien évidemment nécessaire d'avertir l'opérateur de production de manière particulièrement efficace, afin que celui-ci intervienne dans les meilleurs délais.

2.5.3 - Les réactions curatives

Les réactions curatives ont pour objectif de rétablir la machine en état de produire suite à une défaillance critique ayant nécessité une réaction de type réflexe. Aussi, pour déterminer la cause des non qualités, l'opération de diagnostic sera exécutée immédiatement après le déclenchement de l'action réflexe (figure III.10).

Comme les actions préventives, les réactions curatives peuvent être correctives (éliminant la cause assignable), ou palliatives (permettant un fonctionnement normal momentané sans éliminer la cause du défaut).

2.5.4 - Détermination des réactions

Les choix de réactions effectués par le système seront certainement pour la plupart assez simples et découleront naturellement du résultat de la phase de diagnostic. Aussi, ils pourront être intégrés à celle-ci sous forme de règles complétant la base de connaissances d'un système expert précédemment proposé.

Dans le cas d'une action de réglage d'un paramètre ou d'une consigne de fabrication, l'importance de la correction à apporter est également à définir. Pour cela, le système utilisera la connaissance statistique définie précédemment, il pourra éventuellement laisser l'opérateur juge dans le cas d'une action manuelle.

Dans tous les cas de figure, il sera nécessaire, d'une part d'informer l'opérateur de toute stratégie de réaction mise en oeuvre. Dans certains cas, un accord préalable de celui-ci peut d'ailleurs être exigé. D'autre part, toute réaction manuelle ou automatique devra être consignée dans le journal de bord du procédé pour utilisation à posteriori (figure III.9).

Notons que cette phase de décision de réactions étant étroitement liée à l'étape de diagnostic, elle nécessitera comme cette dernière des travaux de recherches complémentaires à cette thèse.

3 - Interactions du système avec son environnement

3.1 - La communication du système avec les différents sites de l'entreprise

L'analyse fonctionnelle SADT nous a fait apparaître la nécessité de communication du système de maîtrise de la qualité avec les différentes fonctions ou sites de l'entreprise ayant une action sur la qualité de la production.

Ces sites sont:

- le procédé de fabrication lui-même, et son système de pilotage
- les opérateurs de production
- le service de maintenance
- le service assurance qualité

Cette communication génère des flux informationnels bidirectionnels, utilisés et générés par le système.

- **Informations utilisées par le système:**

Le système a besoin d'informations complémentaires aux données de base que sont les mesures de qualité des produits pour réaliser notamment les phases d'analyse de la qualité et de diagnostic.

- **Informations générées par le système:**

Le système transmet des résultats et des consignes à des fins de réactions sur la conduite et l'état du procédé suivant deux constantes de temps différentes:

- Il génère tout d'abord des informations à destination, d'une part du système de pilotage du procédé, et d'autre part des opérateurs de production et de maintenance, dans l'objectif d'une réactivité en temps réel ou à court terme.

- Il diffuse ensuite des données au service assurance qualité pour analyses approfondies et réactions à posteriori.

Les informations transmises au service assurance qualité permettront par ailleurs l'édition de rapports et bilans de qualité.

La figure suivante montre l'intégration du système dans son environnement, les principaux flux de communication avec les divers intervenants cités précédemment, ainsi qu'une échelle des temps de réaction sur le procédé.

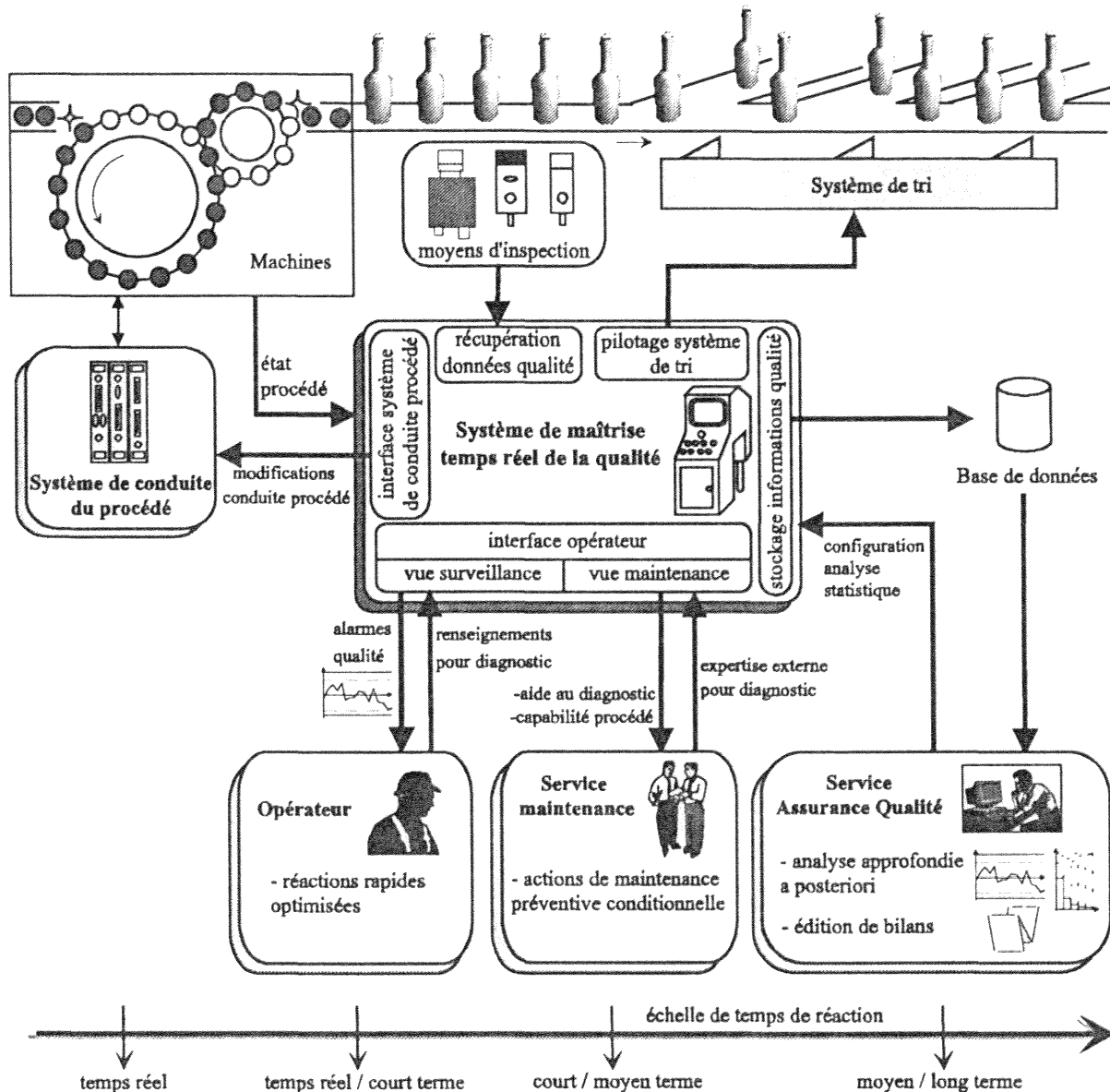


Figure III.11 : Interactions du système avec son environnement

Devant l'importance de la fonction communication, il est nécessaire de définir plus précisément les flux informationnels circulant entre les différents sites, ainsi que les divers messages qu'ils véhiculent. Pour cela, nous avons réalisé un Modèle Organisationnel de Communication (MOC), suivant la méthode MERISE [GAB92] assistée par le logiciel MEGA, définissant les divers messages échangés entre le système de maîtrise de la qualité et chacun des sites.

3.2 - Communication entre le système et l'opérateur

La communication avec l'opérateur est importante car il est le premier interlocuteur humain du système. Par ailleurs, il représente le moyen le plus rapide de réaction sur le

procédé après le système de pilotage de celui-ci. Aussi, la communication avec l'opérateur doit être réalisée par une interface adaptée, et les informations qui lui sont transmises doivent être précises, claires et concises, sans surcharger l'opérateur de données diffuses qu'il ne saura pas trier et donc pas utiliser.

Le MOC traduisant le flux informationnel entre le système de maîtrise de la qualité et l'opérateur est le suivant:

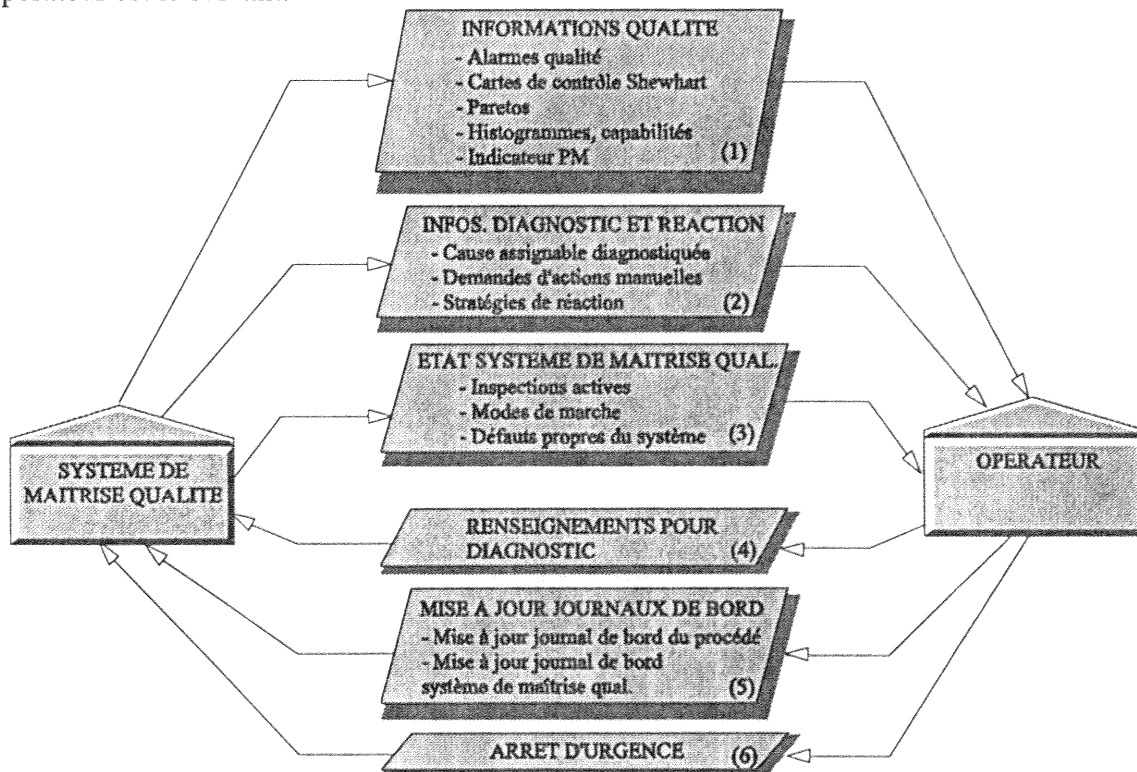


Figure III.12 : Modèle de communication entre le système et l'opérateur

Explicitons alors les différents messages échangés, numérotés de 1 à 6 sur la figure précédente:

3.2.1 - Echanges nécessaires aux phases de diagnostic et de réaction

La nécessité de réduction des temps de réaction et le peu de disponibilité des opérateurs de production impliquent la recherche d'une automatisation maximale de la maîtrise du procédé. Les phases de qualification des produits et d'analyse de la qualité par outils statistiques sont facilement informatisables et ne nécessiteront donc pas d'intervention de l'opérateur.

Par contre les étapes de diagnostic et de réaction sur le procédé ne peuvent conduire à des solutions automatiques dans tous les cas. Aussi, ces étapes nécessitent de la part de l'opérateur les actions suivantes:

- Répondre aux questions des fonctions de diagnostic et de choix de réaction pour apporter des informations attendues par le système mais non accessibles par un autre moyen que l'opérateur (message (4)).

- Exécuter des actions sur le procédé lorsque le module de définition de réaction le lui demande. Le système renseignera alors l'opérateur sur la cause assignable diagnostiquée, et lui fournira dans la mesure du possible des indications sur les actions à entreprendre (message (2)).

Comme nous l'avons déjà souligné, l'opérateur devra consigner toute action de maintenance dans le journal de bord du procédé stocké par le système de maîtrise de la qualité. Il signalera également dans ce journal tout changement dans un des 5M composant le procédé (message (5)).

En complément à ces résultats concernant la communication nécessaire aux phases de diagnostic et de réaction, nous citerons en référence les travaux de A. de Bonneval [BON93] qui analyse de manière conceptuelle la répartition des responsabilités entre un système de surveillance automatisé et un opérateur humain.

3.2.2 - Echanges pour l'amélioration de la performance du procédé

Le rôle de l'opérateur est également d'améliorer de manière continue et progressive la performance du procédé. Pour cela, le système lui fournira des tableaux de bord qualité contenant des indicateurs tels que cartes de contrôle de Shewhart (nous nous limiterons ici à ce type de carte), histogrammes, capacités et diagrammes de Pareto (montrant les proportions de défauts par caractéristiques de qualité, par organes de fabrication, et les fréquences d'apparition des causes assignables principales), ainsi que l'indicateur PM défini au chapitre II, §8.4 (message (1)). Les opérateurs devront donc être formés à une interprétation de base de ces indicateurs qui leur permettront d'optimiser la conduite du procédé.

3.2.3 - Echanges nécessaires à la surveillance du système

La mission de surveillance de l'opérateur s'étend également au système de maîtrise de la qualité qui, comme tout système automatique n'est pas infallible. Ce dernier fournira à l'opérateur des informations sur son fonctionnement, telles que les différentes inspections en cours sur les produits et les modes de marche actifs (concernant les alarmes de qualité, le système de tri des produits, ...).

La qualité de la production repose en grande partie sur le bon fonctionnement du système.

Aussi, la fiabilité de ce dernier est une contrainte forte, et il sera nécessaire de stopper la production lors d'un dysfonctionnement de celui-ci.

Il est alors essentiel de le doter de fonctions d'auto-contrôle permettant par exemple de détecter des défauts de fonctionnement des dispositifs d'inspection ou du système de tri (message (3)). Lors d'une telle auto-détection, le système provoquera l'arrêt immédiat du procédé. Pour les dysfonctionnements non détectés de manière automatique (déréglage d'un capteur par exemple), l'opérateur aura à sa disposition un arrêt d'urgence stoppant également le procédé (message (6)).

Notons par ailleurs que des vérifications régulières du bon fonctionnement du système sont nécessaires, elles seront réalisées par l'étude de capabilité du procédé d'inspection et par des passages de bouteilles tests conformes et défectueuses.

D'autre part, un journal de bord du système de maîtrise de la qualité (mis à jour automatiquement et par l'opérateur) permettra, à des fins de suivi de ce dernier, de consigner ses éventuels dysfonctionnements ainsi que les résultats des vérifications de bon fonctionnement (message (5)).

3.3 - Communication entre le système et le procédé

Les messages transmis par le système à la partie commande du procédé (messages (1), (2) et (3) figure III.13) ont pour objectif l'optimisation de la conduite de ce dernier.

Ces informations se décomposent, d'une part en demandes de modification de paramètres de marche, correspondant à des actions préventives, et d'autre part en ordres d'arrêt et déclenchements de modes de marche dégradés, correspondant à des réactions de type réflexe. Par ailleurs, comme nous l'avons souligné précédemment, lors d'un dysfonctionnement du système, ce dernier pourra provoquer l'arrêt immédiat du procédé.

En outre, le procédé ne sera pas autorisé à produire tant que le système n'est pas sous tension et prêt à fonctionner normalement. Néanmoins, cette fonctionnalité pourra être désactivée par le service assurance qualité, qui pourra décider de produire sans l'utilisation du système de maîtrise de la qualité, il veillera dans ce cas à renforcer les moyens humains d'inspection des produits.

Quant aux informations fournies par le procédé au système (messages (4) et (5)), elles consistent d'une part en valeurs de paramètres du procédé pertinents pour la phase de diagnostic, et d'autre part en données nécessaires à l'identification des organes de fabrication. Cette récupération de données nécessite donc la mise en oeuvre de capteurs au niveau des différentes machines.

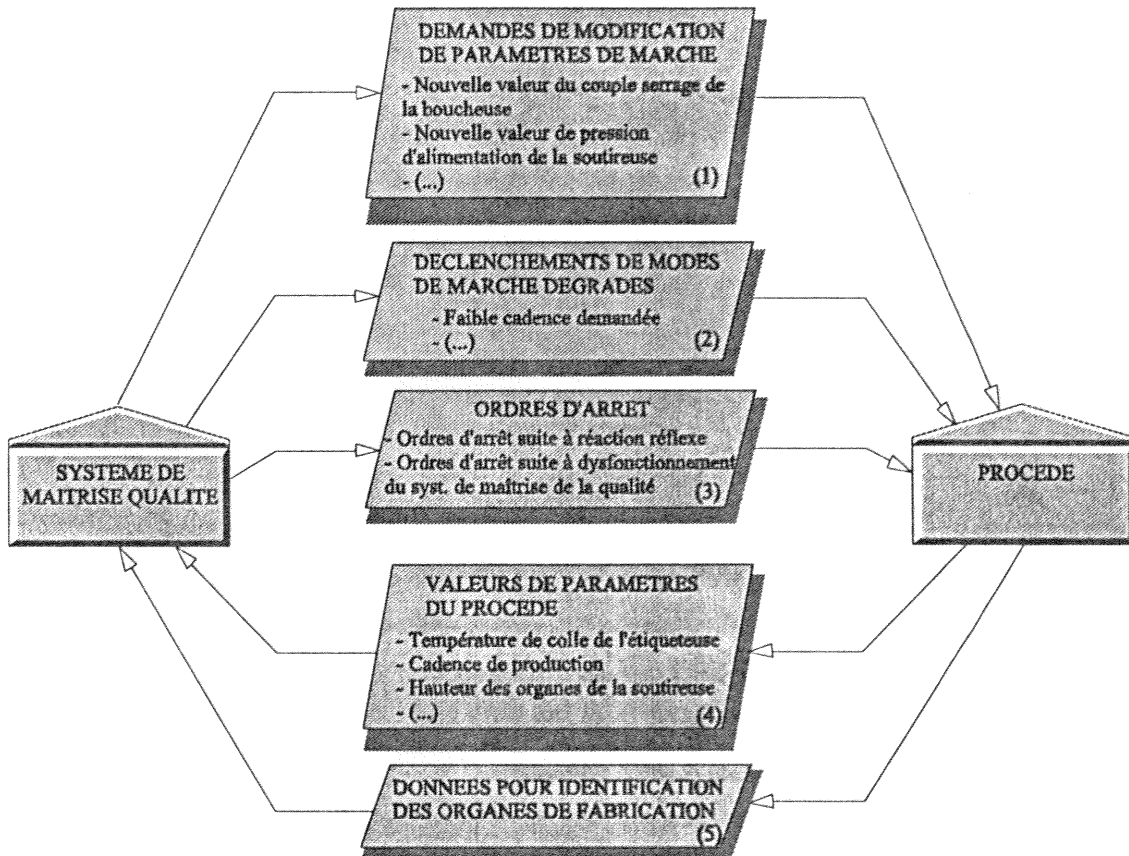


Figure III.13 : Modèle de communication entre le système et le procédé

3.4 - Communication entre le système et le service maintenance

Le service maintenance sera sollicité lorsque l'opérateur n'a pas les compétences ou les moyens matériels d'effectuer la réaction proposée par le système, ou lorsque ce dernier n'a pas réussi à diagnostiquer la cause assignable de manière suffisamment précise.

Dans ce deuxième cas, le système mettra à la disposition du personnel de maintenance un certain nombre d'informations constituant une aide précieuse pour l'identification de la cause de dérive de qualité. Ces informations sont composées des éléments suivants:

- Les indicateurs de qualité (message (1), figure III.14), les mêmes que ceux consultables par l'opérateur enrichies éventuellement de fonctions supplémentaires telles que la possibilité de visualiser les cartes de contrôle sur un passé à court terme.

- Le journal de bord du procédé (message (3)).

- Le résultat final de la phase de diagnostic réalisée par le système (message (2)). Même si ce résultat n'est pas une cause assignable précise, il pourra, comme souligné au paragraphe 2.4.2, être par exemple du type: *forte probabilité d'un dérèglement d'un élément général à la soutireuse*, et constituer alors une orientation pour les recherches.

Par ailleurs, le système pourra éventuellement fournir la trace de son raisonnement constitué par l'enchaînement des règles de diagnostic employées. Cela est envisageable si cette trace est peu complexe et si elle est présentée de manière à être compréhensible par le personnel de maintenance. Un système expert possède un module appelé traceur dédié à cette tâche.

Le service maintenance est composé des personnes de l'entreprise connaissant le mieux le procédé, aussi ces personnes auront également pour mission d'établir, avec l'aide d'un cogniticien, une part de la base de faits et surtout de règles du module de diagnostic du système (message (4)). Elles feront par ailleurs évoluer cette base de connaissances au fur et à mesure de la résolution de problèmes de diagnostic, permettant alors au système d'aboutir dans un nombre croissant de cas de recherche de causes assignables. Ainsi, le nombre d'interventions du service maintenance, interventions souvent assez longues car le personnel est rarement sur place et pas toujours disponible, sera réduit.

Notons par ailleurs que le service maintenance sera amené à intervenir sur le système de maîtrise de la qualité en cas de défaillance de celui-ci. Il pourra alors consulter le journal de bord du système pour faciliter sa tâche (cf. § 3.2.3) (message (3)).

D'autre part, comme dans le cas de l'opérateur de production, le personnel de maintenance devra mettre à jour les journaux de bord du procédé et du système après toute intervention (message (5)).

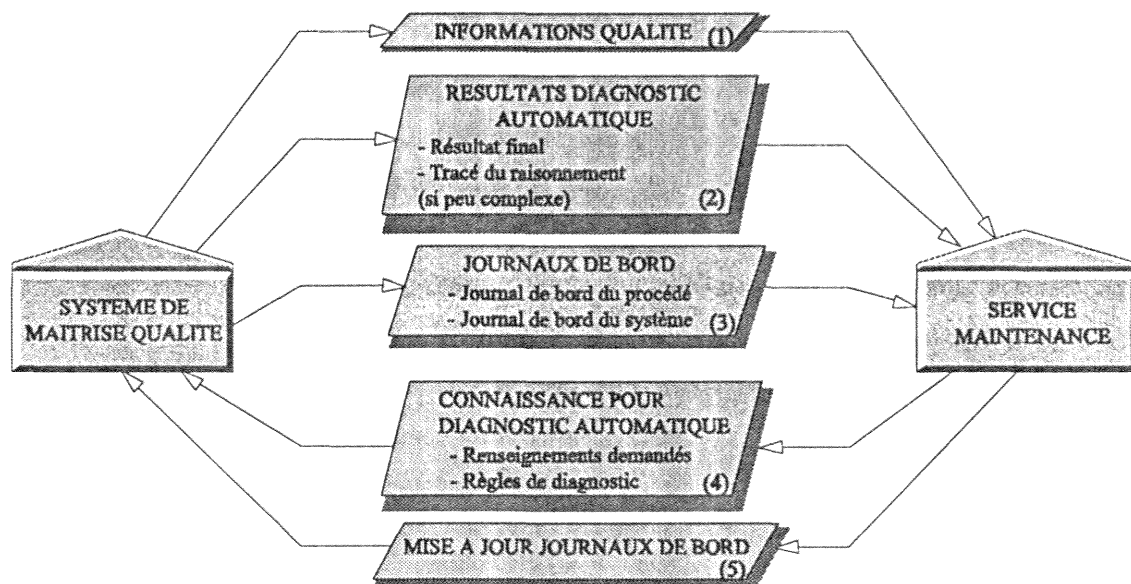


Figure III.14 : Modèle de communication entre le système et le service maintenance

3.5 - Communication entre le système et le service assurance qualité

Dans le cadre de notre application, les fonctions du service assurance qualité peuvent se dissocier en trois composantes principales:

- L'analyse à posteriori des données de qualité stockées.
- La supervision de la mise en oeuvre de la MSP, et dans cette optique, la définition des modes de fonctionnement du système.
- La gestion documentaire de rapports et bilans de qualité.

- **L'analyse a posteriori des données de qualité stockées**

Comme nous l'avons déjà souligné, les moyennes et écarts types des échantillons de produits seront sauvegardés dans une base de données spécifique (figure III.15, message (2)). Les valeurs de paramètres du procédé récupérées par le système pourront y être également enregistrées. Le service assurance qualité devra alors disposer d'outils d'analyse de ces valeurs pour mettre en évidence, par croisement avec le journal de bord du procédé (message (3)), les causes assignables non détectées ou non diagnostiquées en production.

Les résultats de ces analyses seront alors des facteurs d'activation d'actions préventives conditionnelles planifiées (cf. § 2.5.1).

- **La supervision de la mise en oeuvre de la MSP**

Le service assurance qualité a pour mission de superviser la mise en oeuvre de la MSP. Il aura ainsi à sa charge de déterminer les modes d'analyse statistique de la qualité en fonction de l'évolution des différentes étapes de la MSP (figure III.15, message (5)). Par exemple, il choisira le moment d'activation de la surveillance par les cartes EWMA lorsque le procédé paraîtra suffisamment stable (cf. chap. II,8). Il décidera également du recalcul des limites de contrôle des diverses cartes lors d'une modification de la variabilité naturelle du procédé qui aura été mise en évidence par une analyse à posteriori des données de qualité stockées.

Par ailleurs, lors d'un dysfonctionnement du système, ou lorsque décision est prise de produire malgré un défaut du procédé, le service assurance qualité pourra prendre la responsabilité de désactiver certaines inspections des produits, ou certaines alarmes générées par la surveillance statistique (message (6)).

D'autre part, le personnel de ce service possède la connaissance des outils statistiques, il devra donc établir les règles de diagnostic faisant appel à cette connaissance (message (7)).

Enfin, il définira les seuils des différentes classes de qualité permettant le tri des produits en fonction des exigences des divers clients (cf. § 2.2.2) (message (6)).

• **La gestion documentaire de rapports et bilans de qualité**

Le système, ainsi que les données stockées, permettront d'éditer des rapports de qualité à des fins de traçabilité par lots et par types de produits (message (4)). Ces rapports peuvent par ailleurs servir de justificatif de contrôle pour les clients, un rapport d'analyse statistique des différents critères de qualité pouvant être joint aux divers lots de produits livrés. Ainsi, ces comptes-rendus serviront de référence à toute discussion concernant la qualité, aussi bien avec les clients qu'en interne, permettant ainsi de réduire les conflits dus aux interprétations subjectives.

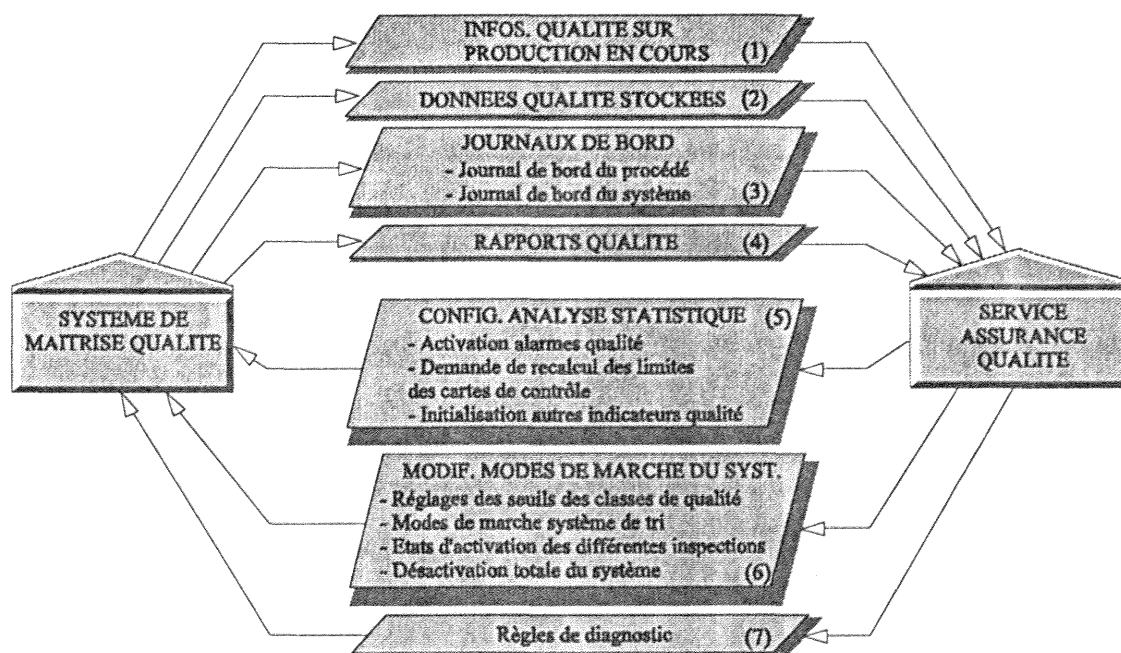


Figure III.15 : Modèle de communication entre le système et le service assurance qualité

3.6 - Communication entre le système et la supervision

La supervision en embouteillage est généralement orientée vers un rôle passif. Aussi, nous ne pouvons pas envisager à l'heure actuelle la mise en oeuvre sur de tels superviseurs de réactions sur le procédé liées à la qualité de la production. Notre approche a ainsi privilégié la relation au niveau de la ligne de conditionnement avec les opérateurs, ainsi qu'un lien direct avec les machines.

Néanmoins, la supervision pourra remplir un rôle informationnel en transmettant au chef de ligne, des informations synthétiques sur la qualité de la production en cours (dont éventuellement les rapports de qualité présentés ci-avant (cf. § 3.5)), des compteurs de produits conformes et défectueux utiles pour la gestion de production, ainsi que le mode de marche courant et les éventuels dysfonctionnements du système.

Par ailleurs, à chaque changement de format de produit conditionné, elle pourra informer le système du type du nouveau format afin qu'il puisse se configurer automatiquement pour celui-ci.

4 - Architecture fonctionnelle

Suite à l'analyse fonctionnelle précédente d'un système de maîtrise de la qualité du procédé d'embouteillage, nous pouvons regrouper les activités à réaliser en deux catégories:

- D'une part, les activités que nous nommerons activités d'exécution, qui ont pour charge la mise en oeuvre des étapes initiales et terminales des boucles de réactions sur la ligne de conditionnement, qui comprennent les phases d'inspection/qualification des produits, de tri de ceux-ci et de réactions sur le procédé. Cet ensemble d'activités nécessite d'une part des moyens de communication avec divers éléments extérieurs (capteurs, automates de commande des machines, système de tri,...), et d'autre part des temps de traitement très courts et garantis pour tenir les cadences importantes de production. Aussi, pour supporter ces activités, un environnement informatique multitâches temps réel est nécessaire.
- D'autre part, les activités de niveau supérieur, chargées de traitements plus complexes mais dont les vitesses d'exécution sont moins critiques, qui comprennent l'analyse statistique des données, le diagnostic et la prise de décisions, ainsi que l'interface opérateur qui nécessite des fonctions d'affichage avancées. Pour réaliser ces activités un environnement informatique multitâches permettant des traitements évolués de l'information est nécessaire.

Cette décomposition nous amène donc naturellement à proposer la réalisation de ces deux ensembles d'activités sur deux systèmes informatiques distincts.

La figure III.16 présente cette architecture fonctionnelle et met en valeur la réalisation des deux boucles de réactions sur la ligne de conditionnement décrites au début de ce chapitre (figure III.1), avec en traits gras pointillés la boucle s'attachant à l'inspection/tri des produits, et en traits gras pleins la boucle ayant pour objectif la maîtrise des machines d'embouteillage.

La communication entre les deux systèmes, temps réel et de traitements évolués de l'information, est d'une importance majeure pour la coordination des activités. Les données échangées, représentées sur la figure III.16, seront principalement les moyennes et écarts types des échantillons. Les autres informations transmises seront plus occasionnelles, elles seront composées d'une part, d'éléments à destination de l'opérateur, tels que les compteurs par types de non conformités des bouteilles, ainsi que les défauts des moyens d'inspection et

de tri auto-déTECTÉS par le système temps réel. D'autre part, le module d'interface opérateur transmettra au système temps réel des données de configuration de l'inspection (activation-désactivation des diverses inspections, seuils des classes de qualité) et du module de tri (activations, sélection des voies de tri), ainsi que les réactions à effectuer sur le procédé et les modes d'échantillonnage.

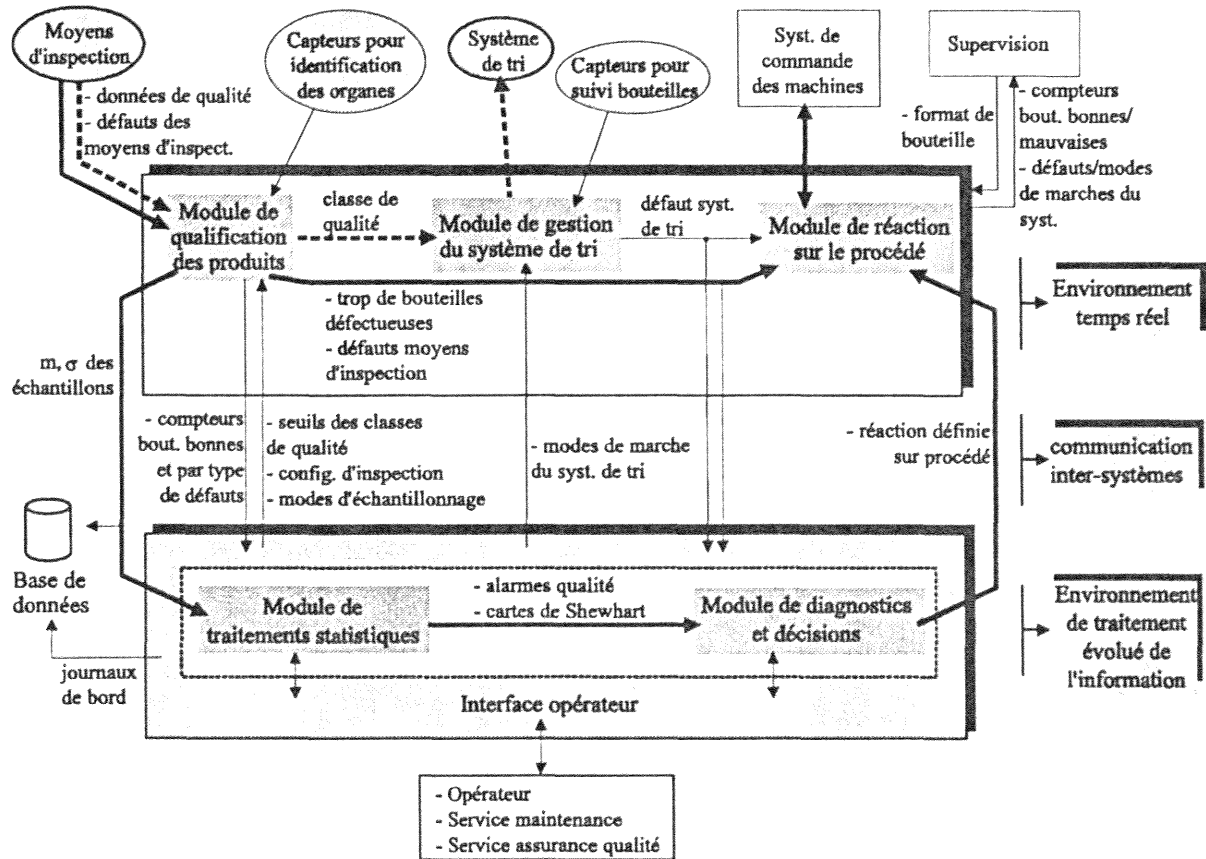


Figure III.16 : Architecture fonctionnelle d'un système de maîtrise de la qualité d'un procédé d'embouteillage

5 - Apports du système pour la gestion d'une ligne d'embouteillage

Après avoir décrit de manière fonctionnelle le système, et présenté ses interactions avec les divers sites de l'usine intervenant sur la ligne de conditionnement, nous pouvons mettre en avant les apports qu'il peut amener pour la gestion d'une ligne d'embouteillage.

Nous pouvons décomposer les fonctionnalités réalisées par le système en trois niveaux qui sont: l'inspection/tri des bouteilles, le suivi temps réel de la qualité des produits, et une aide à la maintenance du procédé.

La mise en oeuvre du système devrait permettre, à travers la réalisation de ces trois niveaux fonctionnels, et comme représenté sur la figure suivante et explicité ci-après, d'une part d'assurer la qualité des produits livrés, et d'autre part d'accroître la productivité de la ligne de conditionnement [COL96a].

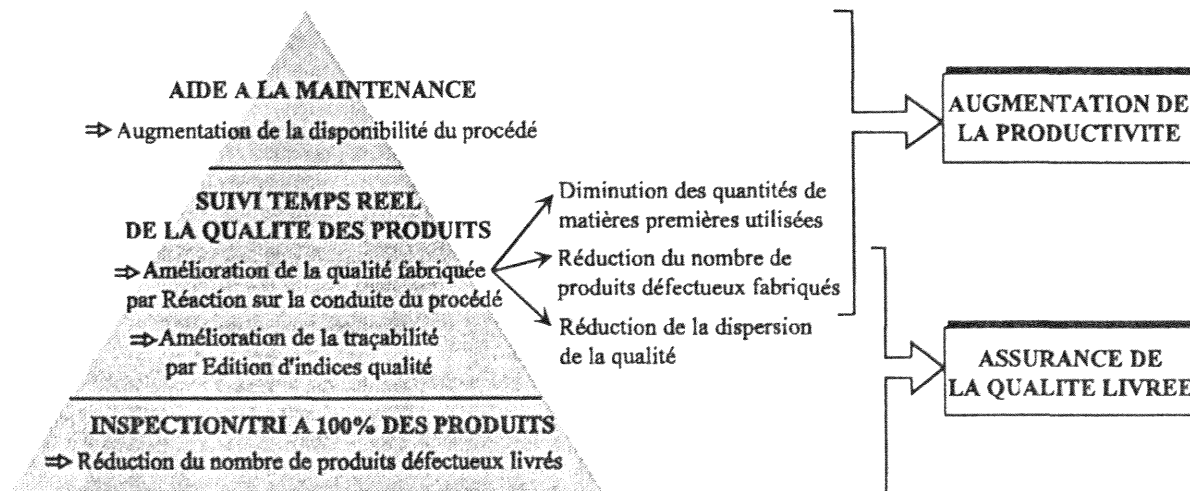


Figure III.17 : Apports du système pour la gestion d'une ligne d'embouteillage

Décrivons plus précisément les apports amenés par la réalisation de chacun de ces trois niveaux.

5.1 - Réduction du nombre de produits défectueux livrés

Le premier niveau correspond à la réalisation de la fonction d'inspection/tri des produits.

Cette fonction permet, de manière totalement automatique, d'assurer qu'une proportion très faible de produits défectueux fabriqués soit livrée au client. En général, comme nous le verrons au chapitre IV (§3.2.3), cette proportion vaut au maximum 0.1%.

Cette performance est très largement supérieure à celle d'une inspection effectuée par des opérateurs humains. En effet, comme nous l'avons déjà souligné (§2.2.1), et même si cette dernière n'a pas pu être précisément évaluée, le manque d'efficacité d'un contrôle manuel à la volée, dû aux cadences importantes de production, ne fait aucun doute.

Aussi, la mise en oeuvre du système permettra de réduire de manière considérable les pertes financières générées par la circulation de produits défectueux dans le réseau de distribution.

Et comme précisé en introduction générale, ces pertes peuvent être très importantes. En effet, outre les coûts chiffrables, dus aux services de garantie, de reprise et remplacement des lots contenant des défectueux, les coûts les plus élevés sont difficilement évaluables, ils

correspondent à la perte de confiance des clients engendrant une diminution inévitable du nombre de commandes.

L'enjeu d'une réduction des produits défectueux livrés est alors de taille, ce qui justifie que l'inspection/tri des bouteilles est la fonction du système pour laquelle la demande est à l'heure actuelle la plus forte.

5.2 - Amélioration de la qualité fabriquée et de la traçabilité

L'amélioration de la qualité fabriquée et de la traçabilité ont pour origine le suivi temps réel des caractéristiques de qualité des produits effectué par le système.

5.2.1 - Amélioration de la qualité fabriquée

L'amélioration de la qualité fabriquée est obtenue par une réaction sur la conduite du procédé de conditionnement.

Cette réaction est effectuée, comme exposé précédemment, soit de manière automatique par le système, soit par l'intermédiaire de l'opérateur, des services maintenance et assurance qualité. Dans ce second cas, le système fournit à ces divers intervenants des indicateurs et alarmes de qualité permettant de suivre en temps réel l'évolution du fonctionnement et de la performance du procédé. Ces indicateurs et alarmes constituent une aide à la conduite des machines de conditionnement.

L'amélioration de la qualité fabriquée se traduit par :

- **Une réduction du nombre de produits défectueux fabriqués**

Le suivi du procédé effectué par le système a pour objectif de réagir, de manière automatique ou manuelle, au plus tôt lors de la détection d'une dérive de qualité afin de limiter, ou même d'éviter, la fabrication de produits défectueux.

La proportion de réduction du nombre de défauts fabriqués engendrée par la mise en œuvre du système est difficilement évaluable. En effet, elle ne dépend pas uniquement du système, mais également de l'utilisation faite par les divers intervenants humains des informations qu'il fournit, ainsi que de leur volonté et de leur possibilité d'intervention au plus vite sur le procédé pour optimiser son fonctionnement. Néanmoins, nous pensons que devant le nombre actuel moyen de produits défectueux fabriqués évoqué au chapitre I, soit environ 120 bouteilles/heure, le gain de productivité devrait pouvoir se chiffrer sans grandes difficultés à

plus d'une dizaine de bouteilles par heure, ce qui représente sur un an de production une économie considérable.

Rappelons que dans ce gain il faut inclure non seulement les produits conformes supplémentaires fabriqués mais également l'économie réalisée sur les coûts de traitements des bouteilles défectueuses et sur les pertes de matières premières qu'elles génèrent.

Notons par ailleurs que, outre le gain de productivité, la réduction du nombre de produits défectueux fabriqués est, comme démontré au chapitre I et représenté sur la figure III.17, un complément indispensable à l'inspection/tri des bouteilles pour assurer la qualité des produits livrés.

- **Une diminution des quantités de matières premières utilisées**

L'indicateur PM de position de la moyenne de hauteur de remplissage que nous avons proposé au chapitre II, intégré au tableau de bord qualité du système, permet à l'opérateur et au service maintenance d'optimiser le réglage et la conduite de la soutireuse afin de minimiser la hauteur de remplissage des bouteilles tout en restant dans les normes de conformité.

L'économie réalisée sur le long terme peut être importante, comme souligné au chapitre I, et se chiffrer, d'après par F. Nodé [NOD93], en dizaines de milliers de francs sur un an de production.

- **Une réduction de la dispersion de la qualité**

Le suivi par cartes de contrôle et le calcul des indices de capabilité permet d'améliorer de manière continue la performance des machines de conditionnement en réduisant leur dispersion. La reproductibilité du procédé est ainsi améliorée amenant la fabrication de produits de qualité sensiblement identique, augmentant alors la confiance et la fidélité des clients.

5.2.2 - Amélioration de la traçabilité

Les indicateurs d'analyse statistique stockés et édités par le système, caractérisent et rendent compte de la qualité d'une production donnée, facilitant ainsi la traçabilité de la qualité par types et par lots de produits.

Par ailleurs, comme indiqué au chapitre III (§3.5), ces indicateurs objectifs peuvent servir de référence et être fournis aux clients comme justificatifs de la qualité des lots de produits livrés.

5.3 - Augmentation de la disponibilité du procédé

Actuellement, les actions de maintenance sur le procédé d'embouteillage sont en grande partie constituées d'actions curatives manuelles effectuées lorsqu'une proportion inacceptable de produits non conformes a été fabriquée. Ces interventions nécessitent alors des interruptions imprévues de la production réduisant le temps de disponibilité du procédé. Les coûts engendrés sont importants car chacune de ces interruptions entraîne, tel que précisé au chapitre I, une perte de production de plusieurs milliers de bouteilles.

Ces pertes de production devraient être réduites par la mise en oeuvre du système car celui-ci permet de diminuer, d'une part le nombre des interventions de maintenance imprévues, et d'autre part leur durée.

En effet, le nombre de ces interventions devrait être restreint par la prise en compte des indicateurs et alarmes de qualité générés par le système qui permettent de remplacer les actions de maintenance curative par des actions préventives de type correctif, palliatif ou planifié (cf. §2.5).

Par ailleurs, les indicateurs de qualité, dont notamment les cartes de contrôle par organes de fabrication et diagrammes de Pareto, ainsi que le module intégré de diagnostic, représentent une source importante de renseignements pertinents constituant une aide efficace à la maintenance. Ainsi, la recherche des causes de dérive de qualité étant facilitée, les temps d'interventions sur le procédé seront réduits.

6 - Conclusion

L'analyse fonctionnelle du système de maîtrise de la qualité du procédé d'embouteillage a mis en évidence la réalisation de deux boucles de réaction sur la ligne de conditionnement.

La première s'attache au produit en réalisant une inspection suivi d'un tri des bouteilles. Nous avons alors envisagé la possibilité d'agrégation de mesures provenant de différentes technologies d'inspection dont la vision artificielle est certainement à l'heure actuelle la plus performante. Cette agrégation de mesures nous a amené à proposer le calcul d'indices de qualité permettant un tri des produits en différentes classes de qualité.

La seconde boucle de réaction a pour objectif de garantir la qualité des produits fabriqués en réagissant sur le fonctionnement et la conduite du procédé. Les réactions sont effectuées, soit de manière automatique, soit par l'intermédiaire des opérateurs de production, services maintenance et assurance qualité, en leur fournissant des indicateurs pertinents de qualité et

des informations de diagnostic des causes de défaillances.

La communication du système avec ces divers intervenants est donc d'une importance majeure, aussi nous avons modélisé les flux informationnels échangés entre le système et chacun d'eux.

La réalisation de cette seconde boucle nécessite la définition de fonctions d'analyse statistique des données de qualité, de diagnostic des causes de dérives, et de prise de décisions de réactions sur le procédé. Les stratégies d'analyse des données ont été établies au chapitre précédent. Pour la réalisation des phases de diagnostic et de prises de décisions, nous avons proposé la mise en oeuvre d'un système expert utilisant une base de connaissances composée d'informations générales sur le procédé, ainsi que d'informations basées sur l'analyse statistique de son comportement.

La modélisation du système nous a alors conduit à proposer une architecture fonctionnelle de celui-ci décomposant les fonctions réalisées en deux ensembles, celles exigeant un environnement informatique temps réel, et les fonctions de niveau supérieur nécessitant un environnement de traitement évolué de l'information.

Enfin, nous avons montré que la mise en oeuvre d'un système ainsi défini devrait pallier les lacunes de la gestion actuelle de la qualité dans l'industrie de l'embouteillage, exposées au chapitre I, en permettant, d'une part d'assurer la qualité des produits livrés, et d'autre part d'augmenter de manière sensible la productivité de la ligne de conditionnement.

L'analyse fonctionnelle présentée dans ce chapitre a servi de modèle à la réalisation industrielle du système décrite au chapitre suivant.

Chapitre IV : Réalisation industrielle du système

1 - Introduction

L'analyse fonctionnelle du chapitre précédent a permis de définir les activités que doit réaliser un système de maîtrise de la qualité du procédé d'embouteillage, les informations échangées entre celles-ci ainsi qu'avec les intervenants extérieurs. Elle nous a amené à proposer une architecture fonctionnelle à deux niveaux de ce système.

Dans ce chapitre, nous présentons la réalisation industrielle qui a été effectuée suivant le modèle défini et qui constitue un système prototype de base à partir duquel pourra être développé l'ensemble des activités définies par l'analyse fonctionnelle.

Dans sa version actuelle, le système réalisé met en oeuvre les fonctions suivantes:

- L'inspection des bouteilles par un système de vision artificielle.
- La gestion d'un système d'éjection des produits non conformes.
- Des réactions réflexes sur le procédé constituées de demandes d'arrêt de la production lors d'un défaut auto-déTECTÉ du système, ou lors d'une production d'un nombre inacceptable de bouteilles défectueuses.
- Un traitement statistique des données de qualité de la production prise dans sa globalité (sans suivi individuel des organes des machines), permettant d'obtenir pour chaque caractéristique inspectée, le tracé d'histogrammes, de cartes de Shewhart, ainsi que les indices de capabilité.
- Une interface opérateur ergonomique, et facilement adaptable à chaque implantation industrielle.

Par ailleurs, étant donné que sur une même ligne d'embouteillage il est fréquent que des formats de bouteilles différents soient produits, le système permet de mémoriser plusieurs configurations d'applications correspondant à ces divers formats.

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord l'architecture du système réalisé et nous décrivons ensuite les traitements effectués par chacun de ses composants. Nous terminons par une présentation des principales installations industrielles dont ce système a fait l'objet.

2 - Présentation générale du système réalisé

2.1 - Architecture physique et informatique

Le système réalisé est construit suivant la structure fonctionnelle décrite au chapitre précédent (§4, figure III.16), c'est à dire composé de deux environnements informatiques distincts. La figure suivante présente son architecture que nous détaillons ci-après :

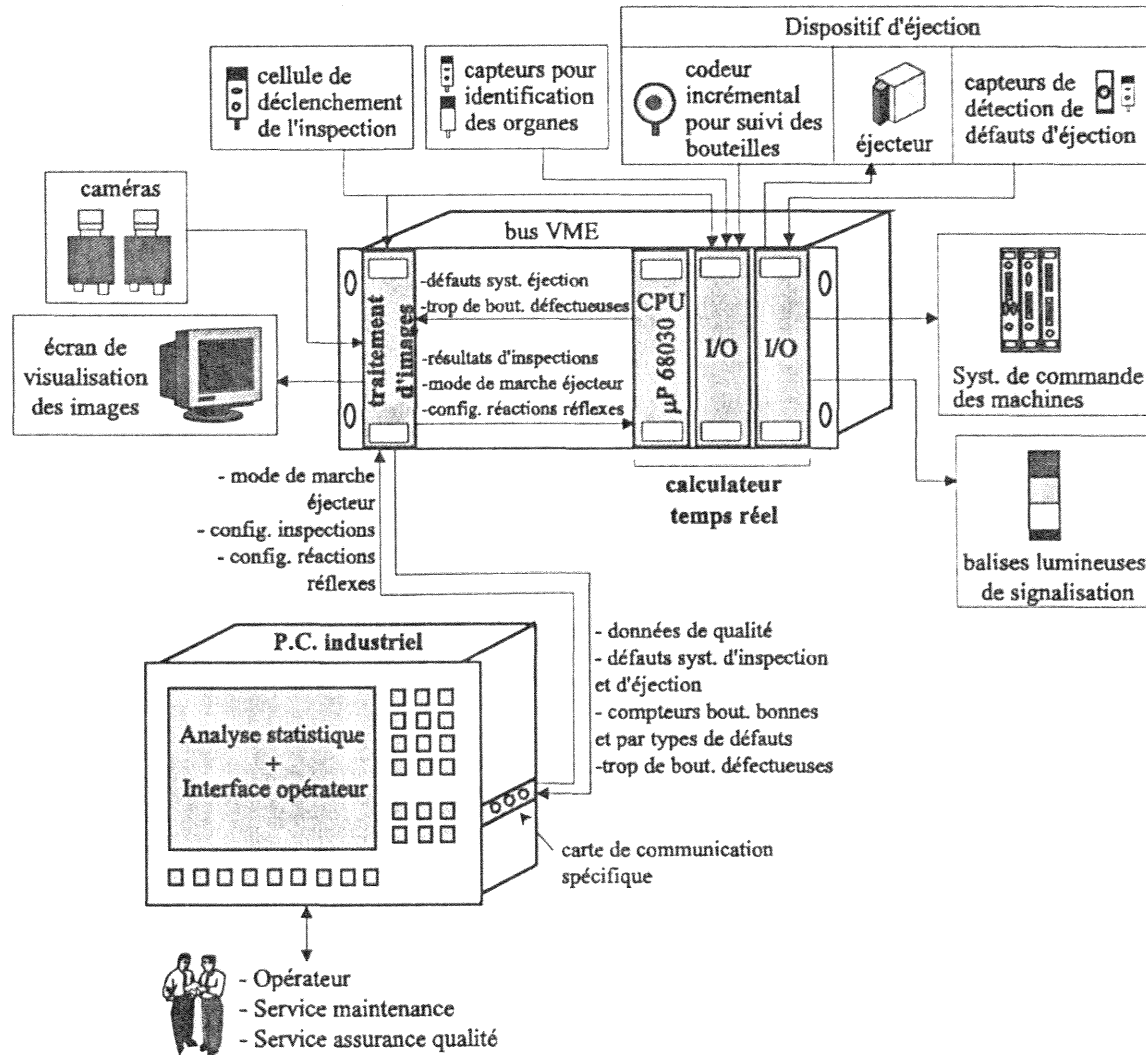


Figure IV.1 : Architecture du système réalisé

- L'environnement temps réel nécessaire à la réalisation des activités d'exécution (inspection/qualification et tri des produits, réactions sur le procédé) est supporté par un calculateur piloté par le système d'exploitation temps réel OS-9 de Microware Systems Corporation [DIB92][MIC91]. Ce calculateur dispose d'un bus de communication VME sur lequel viennent se connecter une carte C.P.U. (Control Process Unit) à base d'un processeur 68030 à 40MHz de Motorola, ainsi que des cartes d'entrées/sorties, l'ensemble étant du

matériel de la Société PEP [PEP95]. Une carte fille spécifique, que nous avons fait spécialement développer pour notre application, vient s'ajouter à ces dernières, elle est utilisée pour le pilotage du système d'éjection comme nous l'expliquerons ultérieurement.

- **Le système informatique réalisant les traitements évolués des informations**, qui sont l'analyse statistique des données et l'interface opérateur, est un P.C. (processeur Intel) de type industriel (façade étanche, intégrable dans un bâti métallique) piloté par le système d'exploitation WINDOWS 95 de Microsoft. Le module de diagnostic (non développé pour le moment) devra être implanté par la suite dans ce P.C. industriel conformément à l'architecture fonctionnelle présentée au chapitre précédent (figure III.16).

- **Le système d'inspection des produits** est constitué d'une carte de traitement d'images de la Société Acuity [ACU96] se connectant sur un bus VME, cette carte vient donc s'insérer dans le rack du calculateur temps réel.

La communication entre le système temps réel et le P.C. industriel a été réalisée par l'intermédiaire de la carte de traitement d'images car celle-ci dispose d'une liaison facile de mise en oeuvre avec une carte spécifique venant s'insérer dans le P.C. industriel. De ce fait, les données de qualité obtenues par l'inspection des produits ne sont pas regroupées en échantillons dans le système temps réel, mais sont transmises pour chaque bouteille directement au P.C. industriel qui se charge du calcul des moyennes et écarts types. Les autres informations échangées entre les deux systèmes informatiques sont celles spécifiées précédemment dans l'architecture fonctionnelle (figure III.16).

A terme, la communication entre le système temps réel et le P.C. industriel devra être effectuée par une liaison série indépendante du moyen d'inspection afin de respecter l'architecture fonctionnelle définie précédemment.

Le calculateur temps réel est connecté à plusieurs éléments de partie opérative composés, d'une part du dispositif d'éjection, et d'autre part d'un ensemble de capteurs nécessaires pour déterminer l'organe de fabrication de la bouteille inspectée, pour suivre le déplacement des bouteilles entre le moment de l'inspection et celui de l'éjection, ainsi que pour auto-détecter un défaut du système d'éjection. De plus, le calculateur temps réel transmet, dans le cadre de réactions réflexes, des ordres d'arrêt de production au système de commande de la machine d'embouteillage. Il pilote également des feux de signalisation pour alerter l'opérateur ou signaler la marche normale.

Quant à la carte de traitement d'images, elle reçoit des signaux de caméras, ainsi que l'ordre d'inspection d'une cellule photo-électrique détectant le passage des bouteilles. Elle transmet les images à un moniteur pour visualisation.

2.2 - Intégration dans la ligne de production

Les deux systèmes informatiques, ainsi que le dispositif d'inspection, sont intégrés dans un bâti en inox en forme de pont, placé sur le convoyeur unifilaire de sortie d'une machine d'embouteillage que nous souhaitons maîtriser. Ce pont de contrôle ne perturbe pas le flux des produits et peut s'implanter sur une ligne d'embouteillage sans modification de celle-ci. Il constitue pour l'opérateur un poste de maîtrise de la qualité ergonomique de par la disposition du P.C. industriel (incliné, à hauteur de mains d'homme pour faciliter la saisie), de l'écran de visualisation des images des bouteilles (positionné à hauteur d'yeux), et de l'emplacement des balises lumineuses de signalisation (placées en hauteur).

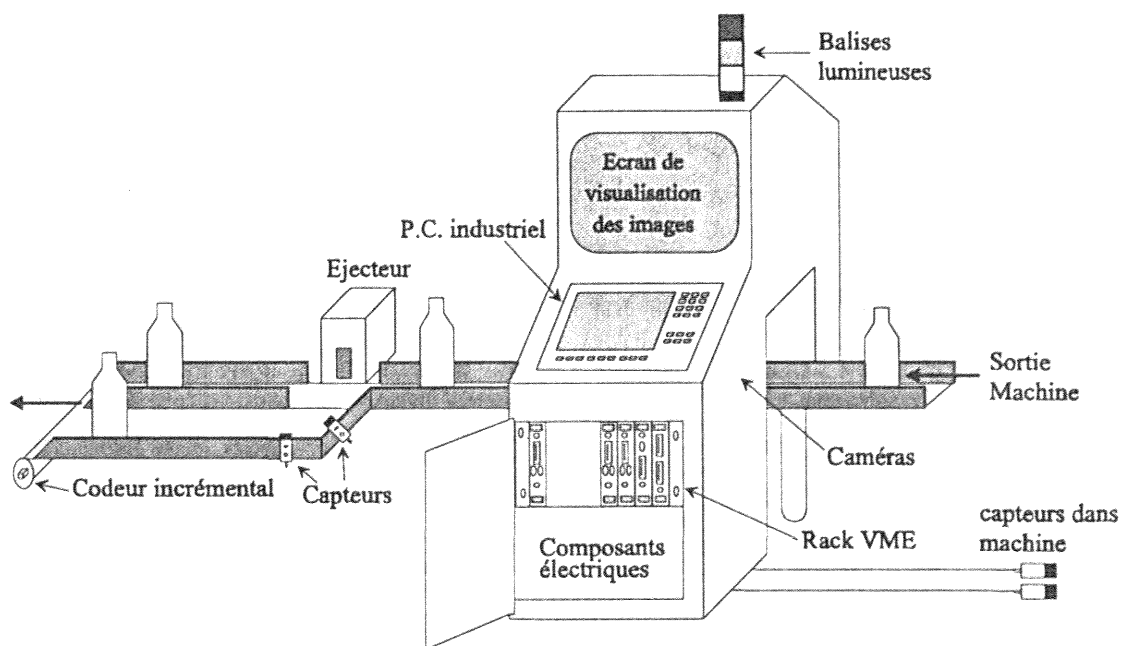


Figure IV.2 : Intégration du système dans la ligne de production

Après avoir présenté de manière synthétique la structure générale du système réalisé, décrivons maintenant plus précisément les opérations effectuées par les trois entités le constituant, à savoir, le système d'inspection des bouteilles, le système de traitements temps réel, et le P.C. industriel. Cette description permettra en outre d'explicitier les flux informationnels entre ces trois composants, flux présentés sur la figure IV.1.

3 - L'inspection des produits

Pour réaliser l'inspection des produits, nous avons choisi la vision artificielle comme technologie principale. Notre choix est justifié par la polyvalence et la performance de cette technologie tel que nous l'avons exposé au chapitre III. Nous pouvons souligner que son utilisation dans l'industrie de l'embouteillage tend à se généraliser. A ce titre, notons qu'en

1995, le domaine de l'agro-alimentaire était le troisième secteur d'investissements en vision avec 10% du marché derrière les industries de l'électronique (16%) et de la mécanique/métallurgie (17%) [ROB96].

Nos applications d'inspection, comme toute application de vision artificielle, se décomposent d'une part en un dispositif d'acquisition des images, et d'autre part en une partie informatique et électronique de traitement de celles-ci.

3.1 - L'acquisition des images

La prise d'images est en général réalisée en sortie d'une machine d'embouteillage lorsque les produits sont transportés sur un convoyeur unifilaire. Il est alors essentiel de veiller à se positionner après une portion suffisante de circuit en ligne droite de manière à ce que le niveau de remplissage soit stabilisé.

La figure suivante, explicitée ci-après, présente la configuration du dispositif de prise d'images la plus couramment employée.

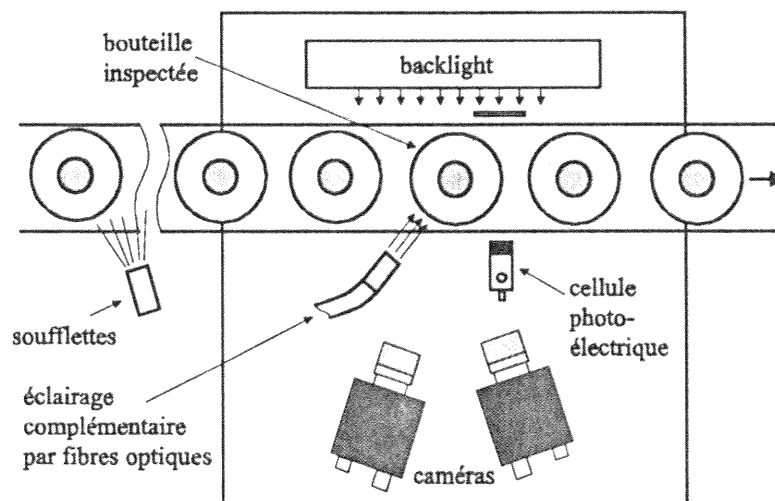


Figure IV.3 : Vue de dessus du dispositif d'inspection

L'acquisition d'images des bouteilles est effectuée par caméras matricielles CCD (Charge Coupled Device), et est déclenchée lors du franchissement du faisceau lumineux d'une cellule photo-électrique infrarouge (figure IV.3). En général, plusieurs caméras sont nécessaires pour obtenir un maximum de précision et observer à la fois le bouchon, le niveau de remplissage et les étiquettes. Notre expérience dans les diverses installations industrielles réalisées (cf. §6) nous montre que dans la majorité des cas, deux caméras sont suffisantes.

L'éclairage des produits est un problème essentiel des applications de vision artificielle [COL91][DUF92]. Dans notre cas, et afin de faire ressortir avec un maximum de contraste les

éléments à inspecter, la solution la plus judicieuse est un éclairage de type *backlight*, c'est à dire un fond blanc émettant une lumière diffuse (figure IV.3). Pour sa réalisation nous utilisons une plaque blanche translucide rétro-éclairée par plusieurs tubes néons à haute fréquence.

Pour certains produits, des éclairages localisés additionnels sont parfois nécessaires pour faire apparaître des éléments non mis en évidence par la source de lumière *backlight*. Les cas d'application que nous avons mis en oeuvre sont par exemple, la distinction d'une étiquette sur une bouteille opaque car remplie de Coca-Cola, ou la mise en évidence de capsules de bouteilles de bière. Ces éclairages additionnels sont effectués par fibres optiques ou par simples spots.

Pour éviter les problèmes de flou de l'image dus aux déplacements rapides des produits et à l'emploi de sources de lumière continue, nous utilisons des caméras permettant d'obtenir des temps d'intégration courts. Néanmoins, pour une minorité des cas où les vitesses de déplacement sont trop importantes pour cette solution (correspondant généralement à des cadences supérieures à 65000 bouteilles/h), un éclairage stroboscopique est nécessaire.

Les difficultés majeures pour l'acquisition d'images que nous avons rencontré dans nos différentes applications industrielles, sont:

- De très légères mais assez fréquentes projections de liquide sur les vitres de protection placées devant les caméras (liquide de lubrification, de remplissage resté sur les bouteilles). Il est alors primordial de sensibiliser l'opérateur à nettoyer régulièrement ces vitres et à détecter ces problèmes par l'observation des images obtenues par les caméras.
- La formation sur la bouteille de gouttes de surplus de liquide de remplissage. Aussi, nous avons mis en place des dispositifs de soufflettes à air comprimé permettant de sécher les zones d'inspection des bouteilles avant la prise d'images (figure IV.3).
- D'autre part, les bouteilles n'étant pas orientées car libres en rotation sur le convoyeur, il est très difficile d'inspecter des éléments localisés tels qu'une étiquette en médaillon par exemple. Aussi, pour ces applications il est nécessaire d'effectuer la prise d'image dans l'étiqueteuse où les bouteilles sont maintenues et donc positionnées. L'inspection du niveau ne pourra néanmoins être réalisée simultanément car trop chahuté dans la machine. Nous avons mis en oeuvre un tel dispositif d'inspection dans une étiqueteuse d'une usine de la Société Coca-Cola pour le contrôle du recouvrement du début et de la fin d'étiquettes entourant le corps des bouteilles.

3.2 - Le traitement des images

Actuellement, les systèmes industriels de vision artificielle tendent à se simplifier dans leur mise en oeuvre. Auparavant, la majorité d'entre eux fournissaient des outils de traitement d'images de base, il était alors nécessaire d'effectuer des développements souvent assez longs de programmes plus ou moins complexes pour obtenir une application d'inspection même assez simple. Maintenant, ils deviennent paramétrables, et fournissent des outils plus évolués pour des traitements spécifiques, permettant ainsi le développement d'applications en un temps bien moindre. Néanmoins, la contrepartie de ce gain de temps est une perte en flexibilité, car ces systèmes sont généralement dédiés à un type d'inspection particulière (mesures dimensionnelles, analyses de formes) et rendent alors difficile, voire impossible, la réalisation d'inspections plus complexes ou non prévues par le système.

Pour notre application, nous avons choisi un système de cette génération, d'une part car les traitements que nous avons à réaliser sont relativement simples et généralement apparentés à des mesures dimensionnelles, et d'autre part car il nous permet de faire très rapidement des études de faisabilité, ou des démonstrations, aux clients potentiels pour lesquels le facteur temps est très souvent une contrainte forte. Ce système est le système IVS (Intelligent Visual Sensor) de la Société Acuity [ACU96].

Celui-ci est constitué d'une carte électronique se connectant sur un bus de communication VME. Un logiciel fonctionnant sur P.C. sous environnement WINDOWS permet de réaliser les paramétrages du traitement d'images, ainsi que de configurer les liens de communication de la carte. L'ensemble du programme est ensuite téléchargé dans cette dernière.

Le système permet de traiter des images d'une résolution de 320*240 pixels sur 64 niveaux de gris.

3.2.1 - La configuration de l'analyse d'images

Les outils d'analyse d'images mis à notre disposition par le logiciel de configuration sont entièrement paramétrables et sont constitués des trois éléments suivants:

- Des lignes de mesures qui permettent d'obtenir la position d'un contour dans l'image, ou une distance séparant deux d'entre eux.
- Des fenêtres permettant de sélectionner des zones de l'image et d'y effectuer des opérations de filtrage, de seuillage et de calcul de surfaces.
- Un outil de localisation du produit dans l'image, utilisé pour repositionner les outils précédents sur la forme de la bouteille à inspecter.

Les valeurs de hauteurs du bouchon, de l'étiquette, et du niveau de remplissage, sont obtenues

en utilisant des lignes de mesures, comme le montre l'exemple de la figure IV.4. Nous remarquerons sur cet exemple que la bouteille apparaît couchée afin d'avoir une meilleure résolution dans le sens de sa hauteur (320 pixels dans la dimension horizontale de l'image, contre 240 en vertical), la majorité des mesures étant effectuées dans cette direction.

Le niveau étant souvent incliné à cause du mouvement en translation des produits, une moyenne de plusieurs mesures relevées sur toute la largeur de la bouteille est généralement effectuée. Par ailleurs, afin de s'affranchir des variations de position en hauteur des bouteilles, il est nécessaire de prendre référence sur un élément du corps de celle-ci, la collerette est souvent utilisée à cet effet.

Nous avons souligné auparavant l'importance, pour la garantie des produits livrés, de la mise en oeuvre de moyens d'auto-détection de dysfonctionnements du système (cf. Chapitre III, § 2.5.2). Pour la phase d'inspection, nous détectons un défaut de luminosité des images en positionnant judicieusement des fenêtres mesurant la moyenne des niveaux de gris des pixels qu'elles contiennent. Un dysfonctionnement du système d'éclairage, des caméras, ou de leur liaison avec la carte de traitement d'images, sera mis en évidence par ce procédé. Il sera alors signalé, d'une part à la carte CPU du système temps réel qui, en réaction réflexe sur le procédé, demandera l'arrêt de la production au système de commande de la machine d'embouteillage, et qui avertira l'opérateur par l'activation d'une balise lumineuse. D'autre part, l'information de dysfonctionnement sera transmise au P.C. industriel pour affichage d'un message en clair à l'opérateur (figure IV.1).

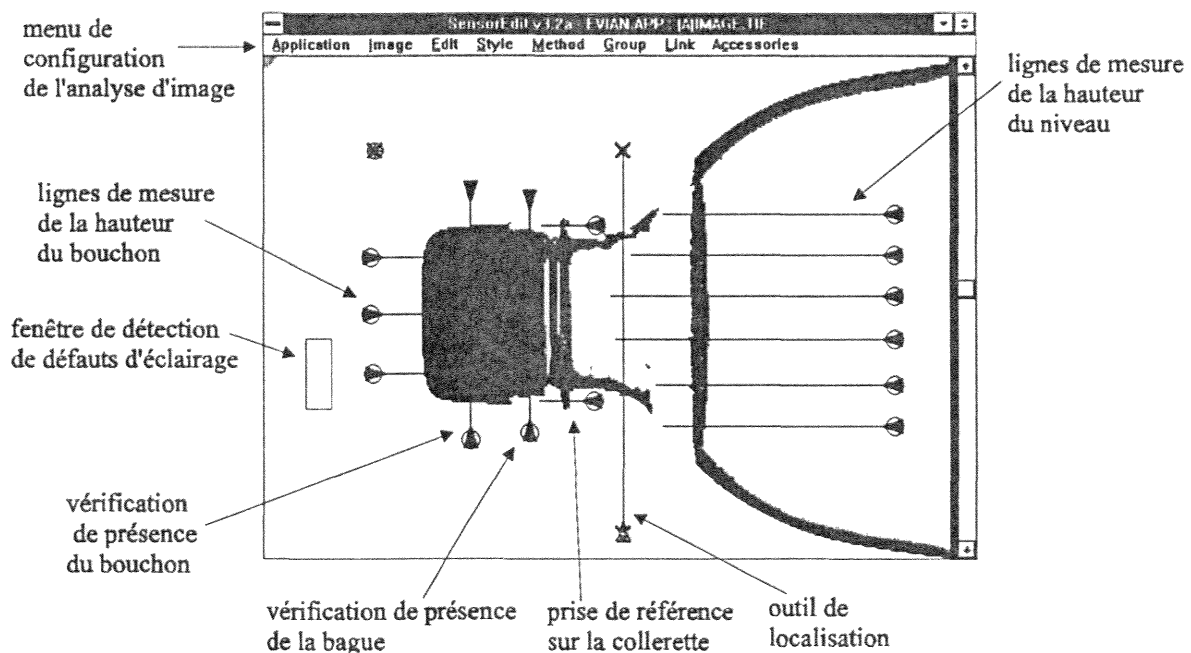


Figure IV.4 : Exemple de configuration de traitement d'une image d'une bouteille d'eau minérale

Une caractéristique importante du système est que le nombre de lignes de mesures disponibles et la dimension des fenêtres sont limités (mais suffisants pour nos applications) de manière à toujours garantir une fréquence possible de traitement des images de 60 par seconde. Cette fréquence nous permet d'effectuer l'inspection des produits avec deux caméras à une cadence maximale de 108000 bouteilles/h, ce qui couvre largement nos besoins.

3.2.2 - Détermination de la conformité du produit

Une fois les outils d'analyse d'images configurés, nous disposons de deux feuilles de calculs, se présentant sous la forme de tableaux de type EXCEL, permettant d'effectuer des opérations mathématiques simples à partir des résultats obtenus par ces outils. Dans ces tableaux nous calculons tout d'abord les mesures des différentes caractéristiques de qualité des bouteilles qui seront transmises au P.C. industriel pour traitements statistiques. Ensuite, ces mesures sont comparées à des limites d'acceptabilité du produit afin de déterminer si la bouteille inspectée doit être éjectée. La détermination des limites d'acceptabilité fait l'objet du paragraphe suivant.

	A	B	C	D	E	F
1		=if(dim27.done,dim27.dfound,999)			=e30 or b30	
2		=if(dim5.done,dim5.dfound,999)			=abs(dim8b) not e1	
3		=if(dim24.done,dim24.dfound,999)			dim18.done	
4		=if(dim25b.o,dim4.done,dim4.dfound,999)			dim15b.den	
5		=if(dim26b.o,min(b1,b2)			dim16b.den	=ifirst or h3
6		=if(dim2b.ok,min(b3,b4)			=abs(dim20b)	e5=10
7		=if(dim3b.ok,abs(b5-b6)			=abs(dim21b)	
8		=if(dim4b.ok			=abs(dim22b)	
9		=if(dim5b.ok dim7.dfound				
10		=if(dim6b.ok			=if(dim31b.di	
11		=max(A6:A8, dim25			=if(dim9b.do	=ifirst.0,if(c
12		=max(A7:A9, dim26			=max(d10,d1	=ifirst.0,if(c
13		=abs(A11-A12)/				=ifirst.0,if(c
14		=abs(A13-F6) b7>3				=ifirst.0,if(c
15		=dim10b<50 or dim10=100 or dim1			=d12>4) and	=ifirst.0,if(c
16		=dim11b<50			=dim15b.do	=ifirst.0,if(c
17		=abs(A14-N15)/ (dim25>6) or (dim26>6)			=dim16b.do	=ifirst.0,if(c
18		=not dim7b.i			=d6>134) or	=ifirst.0,if(c
19		=A17 or A18			=not(dim32B	=ifirst.0,if(c

Figure IV.5 : Exemple de feuille de calcul

3.2.3 - Modèle d'acceptabilité des produits

Afin de pouvoir garantir avec une forte probabilité qu'une bouteille non conforme sera éjectée, il est nécessaire de tenir compte de la variabilité du procédé d'inspection pour définir, à partir des limites de conformité fournies par le service assurance qualité, des limites d'acceptabilité plus restrictives dont le franchissement entraînera l'éjection du produit. L'incertitude sur la Mesure (IM), définie au chapitre II, représentant, au niveau de confiance total de 99.8% (soit un niveau de confiance unilatéral de 99.9%), l'étendue des valeurs dans laquelle se situe la valeur vraie de la grandeur mesurée [VAC90], nous définissons les limites d'acceptabilité supérieure et inférieure par les formules suivantes:

Limite d'acceptabilité sup. = limite de conformité sup - IM

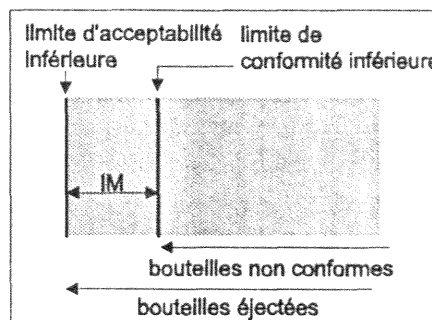


Figure IV.6 : Limite d'acceptabilité inférieure

Limite d'acceptabilité inf. = limite de conformité inf. + IM

Ces limites d'acceptabilité ont donc pour objectif de garantir à 99.9% qu'une bouteille présentant une non conformité sera éjectée (dans des conditions normales de fonctionnement), ce qui correspond généralement aux exigences de qualité des usines d'embouteillage. La contrepartie de cette garantie, jugée généralement non primordiale par rapport à une assurance de la qualité des produits livrés, est que leur utilisation provoquera l'élimination de quelques produits conformes dont les mesures sont situées entre les limites de conformité et d'acceptabilité.

Afin de pallier à de futurs changements dans les proportions acceptables de produits défectueux non éjectés et produits conformes évacués, ou à d'éventuels dérèglages du système d'inspection, le service maintenance ou assurance qualité a la possibilité de modifier, via l'interface opérateur, les valeurs des seuils d'acceptabilité pour les diverses caractéristiques des bouteilles. Ces nouvelles valeurs sont alors transmises par le P.C. industriel à la carte de traitements d'images.

3.3 - La communication de la carte de traitement d'images

- **Avec le système de traitements temps réel**

La communication entre la carte CPU du système temps réel et la carte de traitement d'images IVS s'effectue par le bus VME à des adresses fixées par cette dernière. Un mécanisme de sémaphore permet d'indiquer le rafraîchissement des données transmises.

Du côté de la carte de traitement d'images, le fonctionnement de cette communication est totalement transparent. Les données à émettre sont configurées de manière très simple et celles réceptionnées sont stockées directement dans des variables prédéfinies, utilisables dans les feuilles de calcul précédemment décrites.

- **Avec le P.C. industriel**

La carte de traitement d'images utilisée dispose d'un lien de communication spécifique haut débit (4Mbds) avec une carte au format du bus ISA, insérée dans le P.C. industriel. Ce lien de communication, fourni avec le système IVS, est également transparent et facilement paramétrable du côté de la carte de traitement d'images. Sa mise en oeuvre du côté P.C. est réalisée par l'utilisation de fonctions DLL (Dynamic Link Library) livrées avec le système.

D'autre part, cette liaison permet, lors d'un changement de format de bouteilles produites, de transférer dans la carte IVS le programme de traitement d'images correspondant au nouveau format, programme qui est stocké dans le P.C..

4 - Le système de traitements temps réel

Le système de traitements temps réel réalise les fonctions suivantes:

- La gestion du système d'éjection des bouteilles déterminées non conformes et la détection de certains de ses défauts de fonctionnement.
- L'identification de l'organe de la machine d'embouteillage ayant fabriqué la bouteille inspectée.
- Des réactions réflexes simples sur le procédé.

4.1 - La gestion du système d'éjection

L'éjection des bouteilles défectueuses s'effectue, soit en faisant tomber le produit de la chaîne de convoyage dans un bac de récupération, soit en déviant sa trajectoire sur une table d'éjection qui sera vidée régulièrement par l'opérateur.

Trois modes de marche sont prévus:

- Ejection automatique: c'est le mode de fonctionnement normal, les bouteilles détectées défectueuses sont éjectées.
- Ejection désactivée: aucune bouteille n'est éjectée. Ce mode peut être mis en oeuvre lors d'un dysfonctionnement du système.
- Ejection forcée: toutes les bouteilles, bonnes ou non conformes, sont éjectées. Ce mode est par exemple employé en conditionnement d'eau minérale, pour éliminer par mesure d'hygiène les premières bouteilles produites lors du démarrage d'une soutireuse.

Ces deux derniers modes peuvent être activés par l'intermédiaire de l'interface opérateur uniquement par des personnes habilitées (protection par mots de passe).

La figure suivante, que nous allons détailler ci-après, présente l'ensemble du dispositif utilisé pour la gestion de l'éjection.

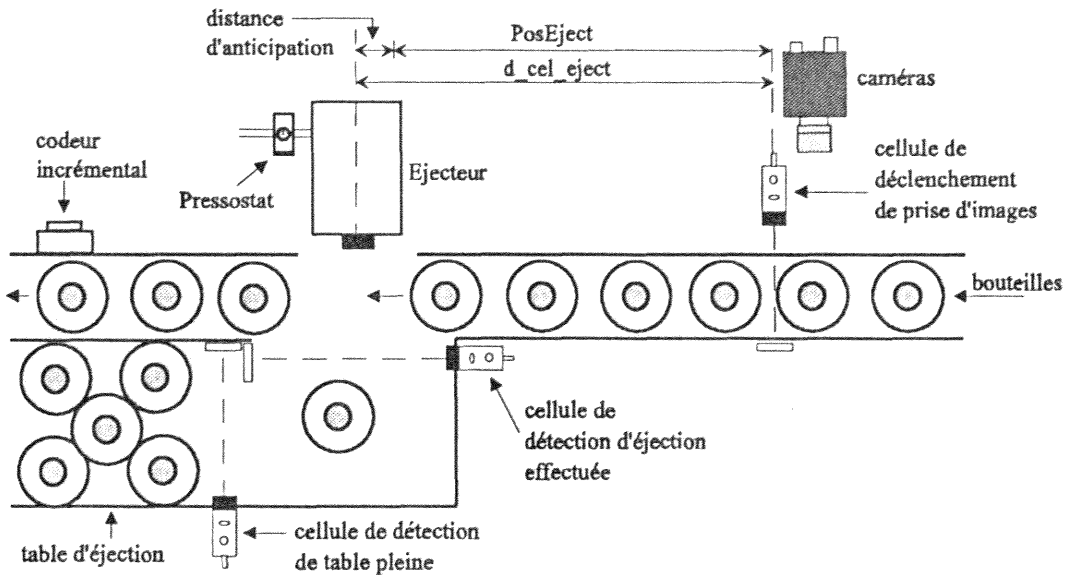


Figure IV.7 : Le système d'éjection

Les difficultés de la réalisation de l'éjection sont, d'une part la définition du principe mécanique de l'éjecteur, et d'autre part la synchronisation de l'action d'éjection.

4.1.1 - Le principe mécanique de l'éjecteur

Etant donné les vitesses importantes de déplacement des produits (le plus souvent entre 1 et 1.5m/s) et le peu d'espace entre deux bouteilles consécutives (généralement de 3 à 5cm), la difficulté est d'évacuer la bouteille défectueuse sans perturber le déplacement des produits voisins.

L'éjecteur que nous avons défini après de nombreux essais et mis en oeuvre sur plusieurs lignes d'embouteillage (voir §6), est constitué d'un petit vérin pneumatique suffisamment rapide, de course maximale adaptée à la taille et au poids des bouteilles. Sur celui-ci est fixé un embout de section rectangulaire dont la surface en contact avec les bouteilles est composée d'une épaisseur de caoutchouc recouverte d'une feuille de plastique rigide et lisse. Les dimensions de l'embout, ainsi que sa hauteur par rapport au plan de convoyage, sont déterminées en fonction de la forme des bouteilles (notamment leur hauteur) et de la position de leur centre de gravité.

Ce type d'éjecteur est très satisfaisant pour faire tomber les produits dans un bac de récupération. S'il faut les dévier sur une table d'éjection, et il est généralement nécessaire dans ce cas de conserver les bouteilles debout, cet éjecteur convient uniquement pour les produits suffisamment stables (centre de gravité bas), les bouteilles plus effilées se renversant.

Aussi, pour pallier à ce problème, nous menons actuellement des recherches pour définir un principe mécanique d'éjection plus sophistiqué permettant, non plus d'éjecter les bouteilles à

la manière d'un "coup de poing" comme cela est fait actuellement, mais en les déviant progressivement tout en les accompagnant dans leur mouvement.

4.1.2 - La synchronisation de l'action d'éjection

- **Principe**

La difficulté dans la synchronisation de l'éjection est que, l'éjecteur étant placé à une certaine distance (généralement de l'ordre d'un mètre) du lieu d'inspection, il faut suivre la bouteille défectueuse depuis l'instant de la prise d'images jusqu'au mécanisme d'éjection. Par ailleurs, les vitesses de déplacement des produits étant importantes, et le mécanisme d'éjection ayant une certaine inertie, il est nécessaire de donner l'ordre d'éjection par anticipation, c'est à dire légèrement avant que la bouteille non conforme soit positionnée devant l'éjecteur.

Pour réaliser le suivi des bouteilles, nous utilisons un codeur incrémental, placé sur l'arbre d'entraînement du convoyeur (figure IV.7), qui génère des impulsions lors du déplacement de celui-ci, c'est à dire lors du déplacement des bouteilles. Le comptage de ces impulsions nous permet donc de connaître avec exactitude la position de la bouteille à éjecter.

La difficulté est alors de déterminer, en tenant compte de la vitesse instantanée de déplacement du produit (v) et du temps nécessaire à l'éjecteur pour être actionné ($tps_éject$), la position de la bouteille à laquelle l'ordre d'éjection doit être donné. Cette position ($PosEject$, figure IV.7) mesurée en nombre d'impulsions générées depuis l'instant de prise d'image, nous est donnée par la formule suivante:

$$PosEject = [d_cel_eject + (diam_bout/2) - (tps_éject * v)] / résol_codeur$$

où,

⇒ d_cel_eject est la distance en millimètres entre la position de franchissement du faisceau de la cellule de déclenchement de la prise d'images, et le centre de l'éjecteur (figure IV.7).

⇒ $diam_bout$ est le diamètre de la bouteille en millimètres, il faut ajouter un rayon de bouteille à la distance précédente car le basculement de la cellule de déclenchement de l'inspection s'effectue sur le bord de la bouteille alors que l'éjecteur doit frapper celle-ci en son milieu.

⇒ $résol_codeur$ est la distance en millimètres parcourue entre deux impulsions. Elle est obtenue en divisant la distance parcourue par la chaîne de convoyage en un tour de son arbre d'entraînement (donnée par le constructeur de l'arbre), par le nombre d'impulsions générées

en un tour du codeur. Afin d'avoir une précision suffisante sur la position des bouteilles, nous choisissons en général un codeur tel que *résol_codeur* soit de l'ordre de 2mm.

⇒ La valeur v de la vitesse instantanée de déplacement est calculée en permanence à partir du temps nécessaire à l'obtention d'un certain nombre d'impulsions du codeur. Ce temps est déterminé par une carte spécifique dédiée à cette fonction, et que nous avons spécialement fait développer pour notre application afin de décharger la carte CPU de cette tâche.

Notons que la réactualisation permanente de v fait varier constamment la valeur de *PosEject*.

⇒ Le temps *tps_éject* nécessaire à l'éjecteur pour être actionné est mesuré sur un banc d'essais en relevant le temps écoulé entre l'émission d'un ordre de sortie de celui-ci, et le franchissement du faisceau d'une cellule photo-électrique placée à l'endroit de contact virtuel avec la bouteille. Les mesures que nous avons obtenues nous montrent que ce temps est en moyenne de 15ms. Aussi, si v vaut 1.3m/s (valeur courante), la bouteille à évacuer se déplace de 19.5mm pendant le temps de réaction de l'éjecteur, ce qui est considérable et justifie donc le besoin d'anticipation de l'émission de l'ordre d'éjection.

Un autre paramètre important dans l'action d'éjection, est le temps de sortie du vérin de l'éjecteur (*tps_sortie*), celui-ci doit être ajusté afin d'être suffisamment court de manière à ne pas gêner, à vitesse maximale, le passage des bouteilles suivant celle évacuée.

• Algorithme

L'algorithme de suivi des produits, de l'instant de la prise d'images à l'éjecteur, est schématisé par la figure IV.8. Il met en oeuvre deux files dans lesquelles sont mémorisées les positions courantes des bouteilles (en nombre d'impulsions du codeur). La première file, appelée file de retard, prend en compte les bouteilles prises en images pour lesquelles le résultat de l'inspection n'est pas encore connu. Lorsque ce dernier est transmis par la carte de traitement d'images, la position de la bouteille au sommet de la file de retard, affectée de l'état bon ou défectueux du produit, est mise en queue de la seconde file, appelée file principale. Lorsque la position de la bouteille en tête de celle-ci est supérieure ou égale à *PosEject*, l'ordre de sortie de l'éjecteur est donné. L'ordre de rentrée sera émis lorsque le temps *tps_sortie* sera écoulé.

Cet algorithme est programmé en assembleur pour des raisons d'optimisation de temps de traitement. Le programme est lancé par interruption à chaque impulsion du codeur. Les valeurs *PosEject* et *tps_sortie* sont transmises par un autre module que nous présenterons ultérieurement.

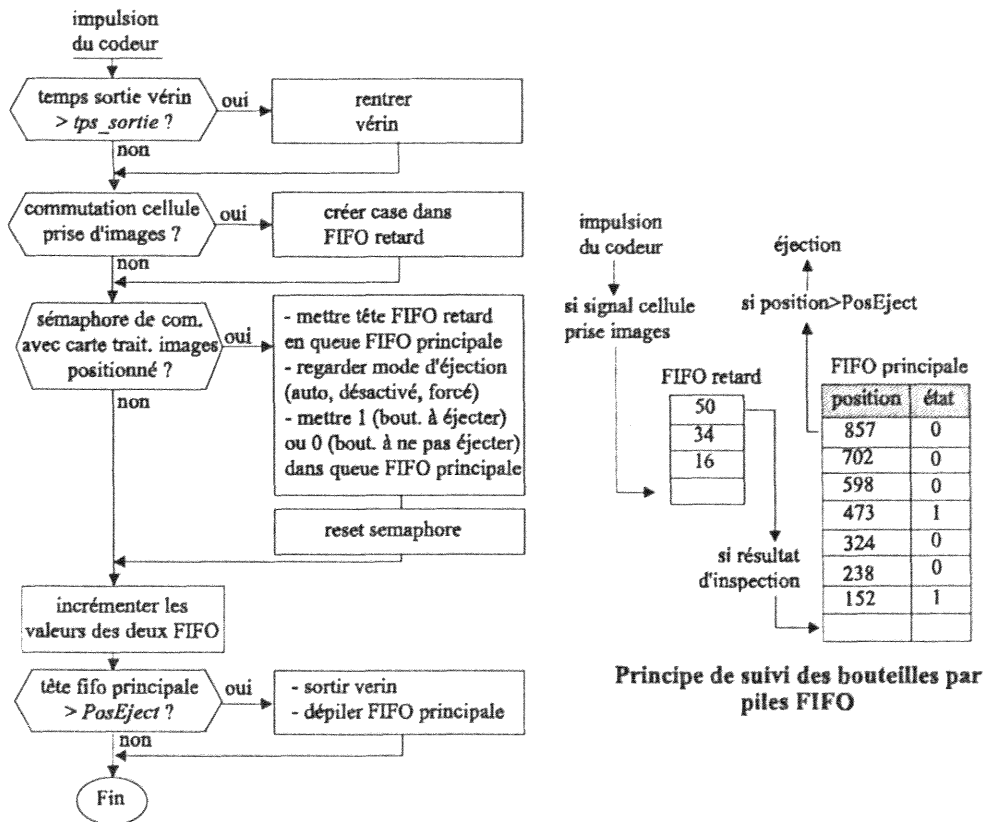


Figure IV.8 : Algorithme de suivi des bouteilles

4.1.3 - Auto-détection des défauts d'éjection

Comme nous l'avons souligné auparavant (cf. Chapitre III, §2.5.2), il est essentiel d'auto-détecter un maximum de dysfonctionnements du système d'éjection. Pour cela, nous avons mis en oeuvre deux dispositifs (figure IV.7):

- Un pressostat renvoie un signal lors d'un manque de pression de l'air alimentant l'éjecteur. En général, la pression doit être supérieure ou égale à 5 bars.

- Une cellule photo-électrique détecte le passage des bouteilles éjectées, si le faisceau de cette cellule n'est pas franchit dans la seconde suivant un ordre d'éjection, le système est alors supposé en défaut.

Comme dans le cas d'un défaut de luminosité d'images pour l'inspection des bouteilles, si un de ces dispositifs signale un dysfonctionnement de l'éjection, une demande d'arrêt de la machine d'embouteillage sera émise vers le système de commande de celle-ci, une balise lumineuse sera activée pour alerter le personnel, et un message sera transmis au P.C. industriel via la carte de traitement d'images pour gestion de l'interface opérateur.

Par ailleurs, une deuxième cellule photo-électrique détecte si la table d'éjection est pleine (figure IV.7). Dans ce cas, les bouteilles ne pouvant plus être correctement évacuées, il est également nécessaire de provoquer l'arrêt réflexe de la production et de prévenir l'opérateur.

4.2 - Réactions réflexes sur le procédé

Outre les réactions réflexes lors d'un dysfonctionnement auto-déecté des systèmes d'inspection et d'éjection présentées précédemment, le système temps réel demande également l'arrêt de la production lors de la fabrication d'un nombre inacceptable de bouteilles non conformes. Pour réaliser cela, il utilise une fenêtre glissante comme cela a été expliqué au chapitre II, § 8.3.2.. La taille de cette fenêtre, ainsi que le seuil critique de pourcentage de défauts contenus dans celle-ci, sont paramétrables par l'interface opérateur. Lors du dépassement de ce seuil critique, une sortie TOR (Tout Ou Rien) connectée à l'automate de commande de la machine est basculée, et l'opérateur est alerté par signal lumineux ainsi que par affichage d'un message.

4.3 - Identification des organes de fabrication

Afin de permettre un diagnostic optimal de défaillances, nous avons souligné au chapitre II la nécessité d'effectuer un suivi individuel de chaque organe des machines de soutirage et de bouchage. Pour y parvenir, nous devons donc identifier les organes de ces machines ayant fabriqué chaque bouteille inspectée.

Cette identification est possible si le flux des bouteilles entre l'entrée des machines et le poste d'inspection est unifilaire (pas de "mélange" des bouteilles), ce qui est quasiment toujours le cas lorsque l'inspection est effectuée immédiatement en sortie de la boucheuse. Si le contrôle des produits est réalisé après l'étiqueteuse, il est alors indispensable qu'il n'y ait pas de convoyage de vrac entre la boucheuse et l'étiqueteuse.

La difficulté dans la réalisation de l'identification des organes est due au fait que d'une part, lors d'un tour de rotation d'une machine, un organe peut ne pas se voir attribuer de bouteilles, et d'autre part, des bouteilles peuvent exploser en cours d'opération entraînant ainsi leur disparition.

Ce phénomène d'explosion est assez fréquent dans le cas de bouteilles en verre fragilisées par de légers défauts, il se rencontre très peu avec des bouteilles en matière plastique.

Par ailleurs, lors d'une explosion, des débris de verre peuvent s'être fixés sur l'organe de fabrication ainsi que sur ceux voisins. Aussi, plusieurs responsables de production d'usines d'embouteillage nous ont émis leur souhait de déclencher dans ce cas une procédure préventive provoquant l'éjection, sur plusieurs tours de machine, des bouteilles produites par les organes incriminés. Notre système doit alors identifier ces organes afin de permettre la réalisation de cette procédure.

Pour réaliser l'identification des organes, la méthode que nous avons définie nécessite l'utilisation de six capteurs, capacitifs, inductifs ou cellules photo-électrique, dont quatre sont positionnés sur la soutireuse et deux sur la boucheuse. L'ensemble du dispositif est représenté sur la figure suivante:

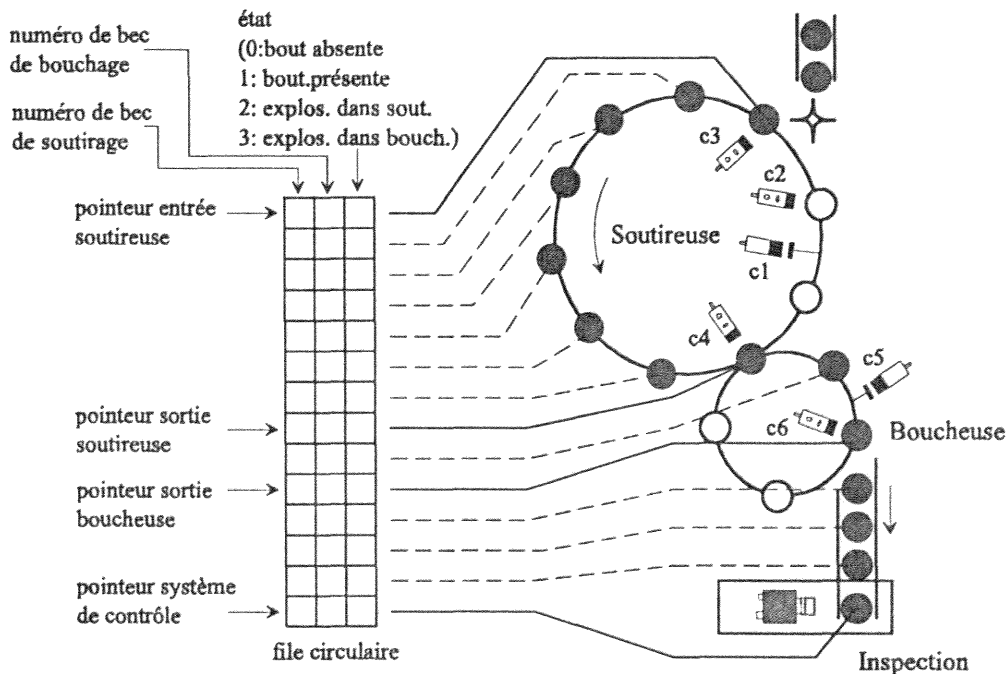


Figure IV.9 : Principe d'identification des organes

L'instrumentation placée sur la soutireuse est la suivante:

- Deux capteurs sont utilisés pour effectuer la numérotation des organes de cette machine. Le premier (c1, figure IV.9) détecte le passage d'un repère fixé sur le carrousel, il permet l'initialisation de la numérotation. Le second (c2) permet d'incrémenter celle-ci en émettant un signal à chaque passage d'un organe.
- Deux capteurs informent sur la présence d'une bouteille aux emplacements des organes en entrée de la machine (c3), et à la sortie (c4) pour détection des explosions. Le capteur en sortie de la soutireuse permet également de déterminer la présence d'une bouteille en entrée de la boucheuse.

Au niveau de la boucheuse, les mêmes fonctions sont nécessaires: un capteur (c5) est utilisé pour initialiser la numérotation des organes de cette machine, un second (c6) placé en sortie de celle-ci permet de déterminer les explosions qui se sont produites lors de l'opération de bouchage. L'incrémentation de la numérotation est déclenchée par le capteur c2, la soutireuse et la boucheuse ayant leurs mouvements liés.

Pour suivre chaque bouteille lors du processus d'embouteillage et lui affecter les numéros d'organes, une file circulaire est mise en oeuvre (figure IV.9). Sa taille est égale au nombre de

bouteilles pouvant se trouver entre l'entrée de la soutireuse et le poste d'inspection. Chaque élément de cette file contient trois informations: le numéro de l'organe de soutirage, le numéro de l'organe de bouchage, ainsi qu'une valeur d'état informant sur la présence de la bouteille et si celle-ci a explosé dans la soutireuse ou dans la boucheuse. Trois pointeurs indiquent les emplacements de cette file correspondant aux bouteilles se présentant en entrée et en sortie des machines, leur position est incrémentée à chaque signal du capteur c2. Un quatrième pointeur désigne l'emplacement de la bouteille inspectée, sa position est incrémentée à chaque inspection.

La phase d'identification des organes étant réalisée, les développements à venir auront notamment pour objet la réalisation d'un module de création d'échantillons de mesures par organes, nécessaire pour réaliser le suivi statistique de chacun d'eux de manière individuelle.

4.4 - Développement informatique

La programmation du calculateur temps réel a été réalisée avec l'atelier de programmation ISaGRAF de la Société CJ International [CJI94].

Cet atelier de programmation, fonctionnant sur P.C. sous environnement Windows 3.1, permet, à l'aide d'un éditeur graphique, de développer des applications en langages normalisés du métier d'automaticien (norme internationale CEI 1131-3), c'est à dire en Grafset, en schémas à relais et en schémas de blocs fonctionnels. Il offre également la possibilité de lier des modules écrits en C aux programmes écrits dans ces langages. Le code correspondant à l'application développée est ensuite généré et transféré par liaison série dans le calculateur cible contenant le noyau d'exécution ISaGRAF.

Des outils performants de simulation et de mise au point en ligne permettent la mise au point de l'application et d'effectuer les tests d'intégration.

Pour notre système, l'utilisation d'ISaGRAF permet d'avoir un programme source compréhensible par des non informaticiens, pouvant être ainsi modifié par des automaticiens intervenant sur les lignes d'embouteillage, personnels de la Société GEBO Automatique ou de la Société cliente. En effet, les langages disponibles sous ISaGRAF correspondent à la majeure partie des traitements réalisés par notre système qui sont essentiellement basés sur la gestion d'entrées/sorties. La partie spécifique de synchronisation du système d'éjection est quant à elle programmée en assembleur et interfacée en C. Elle apparaît vis à vis des programmes ISaGRAF comme "une boîte noire" avec laquelle des paramètres sont échangés. ISaGRAF nous permet également un accès et une modification aisés, par menus et boîtes de dialogues, des constantes de configuration de l'installation et du procédé d'embouteillage

(nombre d'organes des machines, distance entre poste d'inspection et l'éjecteur,...), et ainsi de rendre notre système paramétrable pour les différents cas d'implantation.

La structure hiérarchique du programme de notre application sous ISaGRAF est représentée par la figure suivante:

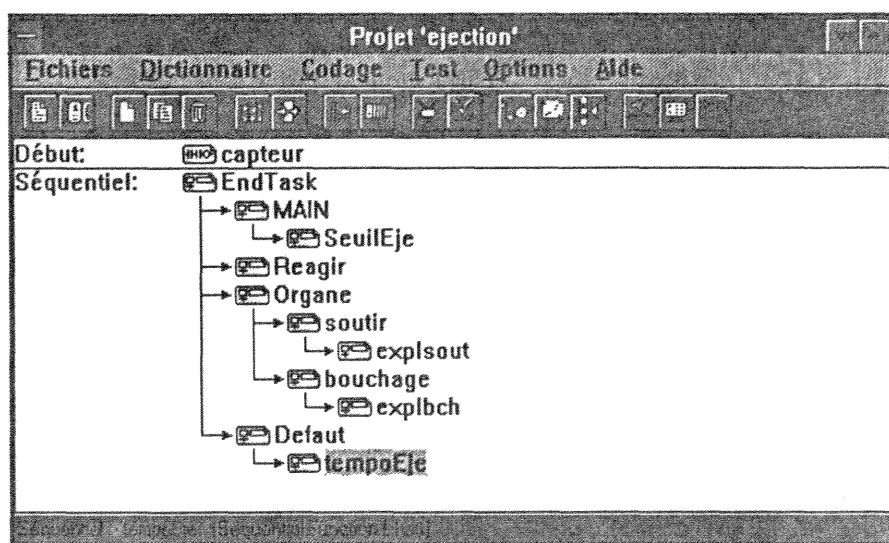


Figure IV.10 : Structure hiérarchique du programme

Le programme ne sera pas listé dans ce document en respect de la confidentialité des travaux de la Société GEBO Automatique. Nous nous contenterons de présenter les divers modules le constituant.

- Le module "capteur" gère les défauts de fonctionnement de l'éjecteur de manque de pression d'air, et de table d'éjection pleine, il transmet à la carte de traitement d'images les informations relatives à ceux-ci. Il pilote également les balises lumineuses de signalisation. Ce module est écrit en schémas à relais et en blocs fonctionnels, il est exécuté dans sa totalité à chaque cycle du noyau ISaGRAF.

L'ensemble des modules contenus dans la section "Séquentiel" sont écrits en Grafcet.

- Le Grafcet "EndTask" est le Grafcet père du projet, il est chargé d'initialisation de variables, de configurer les différentes cartes d'entrées/sorties et de lancer les autres Grafcets de l'application.
- Le Grafcet "Main" gère le système d'éjection, il initialise le module écrit en C et assembleur de synchronisation de l'éjecteur qui sera exécuté sur interruptions à chaque impulsion du codeur incrémental (cf. §4.1.2). Les valeurs *PosEject* et *tps_sortie* nécessaires à ce module sont calculées par le Grafcet fils "SeuilEje".

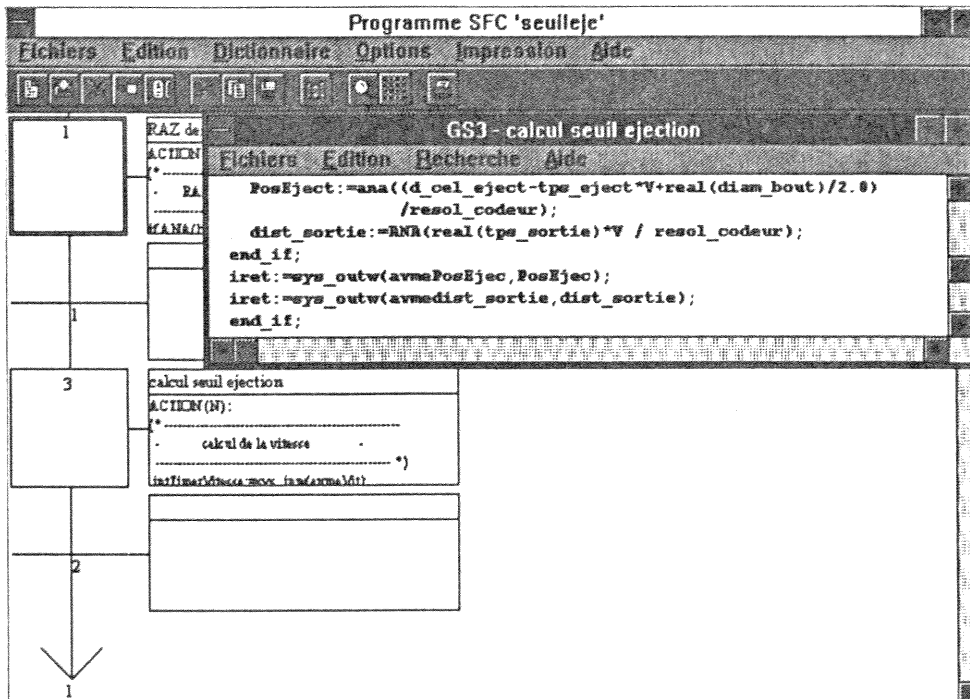


Figure IV.11 : Le Grafcet "SeuilEje" de calcul des paramètres de l'éjection

- Le Grafcet "Réagir" détecte si le seuil critique du pourcentage de produits défectueux est dépassé et génère les réactions réflexes sur le procédé (cf. §4.2).
- Le Grafcet "Organes" réalise, à l'aide de plusieurs Grafquets fils, l'identification des organes de la soutireuse et de la boucheuse ainsi que la détection des explosions de bouteilles dans ces machines.
- Le Grafcet "Defaut" ainsi que son Grafcet fils "tempoEje" sont chargés d'observer si une bouteille détectée non conforme a bien été éjectée (cf. §4.1.3).

Il est à noter que l'ensemble des fonctions de gestion du système d'éjection et de ses défauts, de réactions réflexes sur le procédé, et de pilotage des balises lumineuses, ainsi que l'instrumentation associée, ont été mis en oeuvre avec succès sur sites industriels (voir §6). Seule l'identification des organes n'a pas été testée et mise au point sur site, mais a été entièrement simulée sous ISaGRAF.

5 - Interface opérateur et traitements statistiques

5.1 - Description de l'interface et des traitements statistiques

Dans sa version actuelle, l'interface opérateur mise en oeuvre sur le P.C. industriel réalise deux fonctions principales:

- Elle remplit tout d'abord un rôle informationnel en mettant à la disposition du personnel, d'une part des indicateurs de qualité de la production en cours (cartes de contrôle, indices de capacité, compteurs...), et d'autre part des informations sur les modes de fonctionnement du système (états d'activation des différentes inspections, modes de marche du système d'éjection, ...). En outre, elle informe des réactions réflexes déclenchées sur le procédé et indique leur cause.

- Ensuite, l'interface opérateur permet la modification des modes de marche du système ainsi que la configuration de l'analyse statistique. Les intervenants, composés de l'opérateur de production et de personnes des services maintenance et assurance qualité, n'ayant pas le même niveau de responsabilité, il est possible de définir des mots de passe pour permettre l'accès à ces diverses modifications. Les paramètres de configuration ainsi modifiés sont mémorisés dans un fichier de mise à jour, il sont récupérés lors des initialisations de l'interface opérateur et à chaque mise sous tension du système.

L'interface opérateur est composée d'une succession d'écrans dont l'arborescence est représentée par la figure suivante:

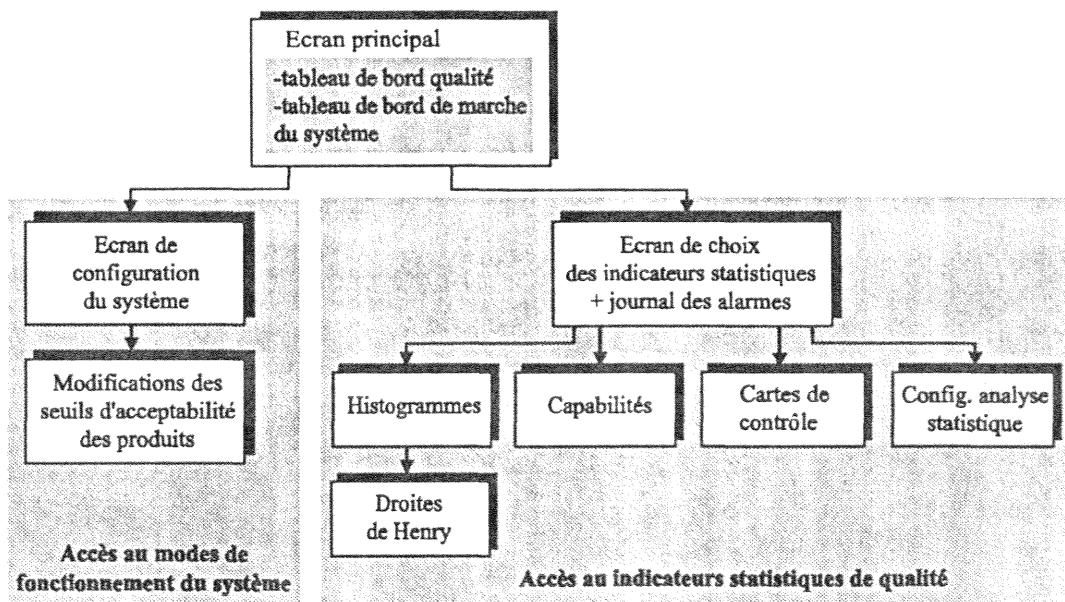


Figure IV.12 : Arborescence des écrans de l'interface opérateur

Une étude de la composition des divers écrans a été menée en tenant compte de l'avis du personnel de production d'usines d'embouteillage. Cette étude nous a conduit à porter nos efforts sur l'aspect ergonomique de présentation des différentes vues, en utilisant notamment des symboles graphiques, règles et mécanismes d'avertissement tel que le préconise Ch. Kolski [KOL93].

Décrivons ces différents écrans ainsi que les fonctionnalités associées:

- L'écran principal

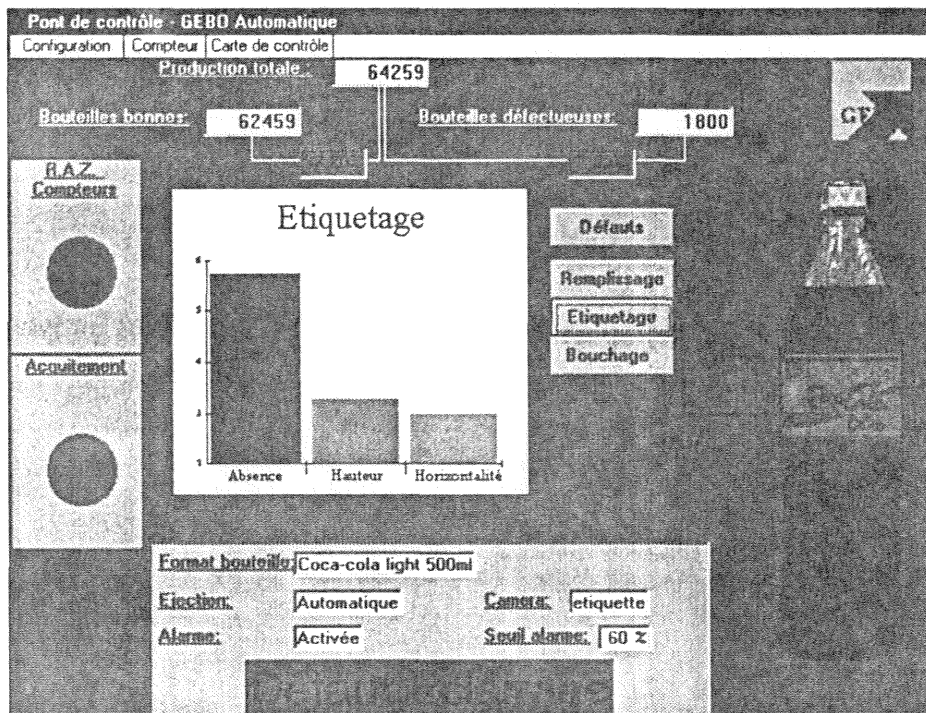


Figure IV.13 : Exemple d'écran principal

Il est essentiel que le contenu informationnel de l'écran principal soit avant tout destiné, et donc adapté, à l'opérateur qui est le premier concerné par le système. Nous avons défini au chapitre III, la nécessité de la communication entre l'opérateur et le système pour:

- L'amélioration de la performance du procédé:

Cet écran présente un tableau de bord qualité de la production, constitué des compteurs de bouteilles conformes et compteurs par types de défauts affichés sous forme chiffrée ou d'histogramme. Ce tableau de bord permet d'apprécier de manière condensée et rapide la performance du procédé qui pourra être affinée par l'observation des cartes de contrôle et indices statistiques présentés sur d'autres vues.

- La surveillance du système:

L'écran principal présente également un tableau de bord de fonctionnement du système, il

informe notamment sur les différentes caractéristiques inspectées des bouteilles, le mode de marche de l'éjection et des réactions réflexes (appelées "alarme" sur la figure IV.13). En outre, il signale sous forme d'un message explicite un défaut de fonctionnement auto-détecté du système (comme un défaut d'éclairage signalé sur l'exemple de la figure IV.13).

- Les phases de diagnostic et de réaction en cas de dérive de qualité de la production:

En cas de dérive de qualité, un message sur l'écran principal indique la carte de contrôle ayant détecté l'instabilité. Il est alors possible d'accéder directement à la visualisation de celle-ci pour réaliser un diagnostic manuel, la phase de diagnostic n'étant pas supportée par le système actuel.

De même, un message informera sur cet écran du déclenchement d'une réaction réflexe sur le procédé (en plus du signal par balise lumineuse).

A partir de l'écran principal, nous pouvons accéder à l'aide d'une barre de menu, soit à l'écran de configuration du système, soit aux indicateurs d'analyse statistique.

- **La configuration du système**

L'écran de configuration du système permet notamment la modification du mode de marche de l'éjection, de l'état d'activation des différentes inspections, et des paramètres de réactions réflexes dans le cas d'un nombre trop conséquent de bouteilles non conformes (taille de la fenêtre glissante et pourcentage critique de défauts, cf. § 4.2).

Cet écran permet également, lors du changement du format de bouteilles produites, de sélectionner le nouveau format et ainsi déclencher le transfert dans la carte de traitement d'images du programme d'inspection correspondant.

A partir de cette vue, nous avons accès à l'écran permettant la modification des seuils d'acceptabilité des diverses caractéristiques des produits (cf. § 3.2.3).

- **L'analyse statistique**

Après avoir étudié un bon nombre de logiciels de M.S.P. du marché, nous nous sommes rendu compte que la majorité d'entre eux ne permettent pas une récupération automatique aisée de données, ceux-ci étant généralement prévus pour une utilisation manuelle sur des procédés à faible cadence de production. Par ailleurs, ces logiciels sont difficilement intégrables dans une structure de programme d'accueil.

Aussi, nous avons décidé de développer nous même les traitements statistiques qui nous sont nécessaires.

Ceux-ci permettent actuellement l'analyse de la qualité des caractéristiques mesurables de la production prise dans sa globalité, telles que la hauteur du niveau de remplissage, de

l'enfoncement du bouchon, ou de positionnement de l'étiquette, le traitement des données de type attribut ainsi que le suivi individuel de chaque organe des machines restant à développer. Pour chacune de ces caractéristiques, il est possible d'obtenir par diverses vues les indicateurs suivants:

- L'histogramme des mesures enregistrées, et le tracé de la droite de Henry permettant de vérifier la normalité du procédé.
- Le tracé des cartes de contrôle de Shewhart classiques de la moyenne et de l'écart type.

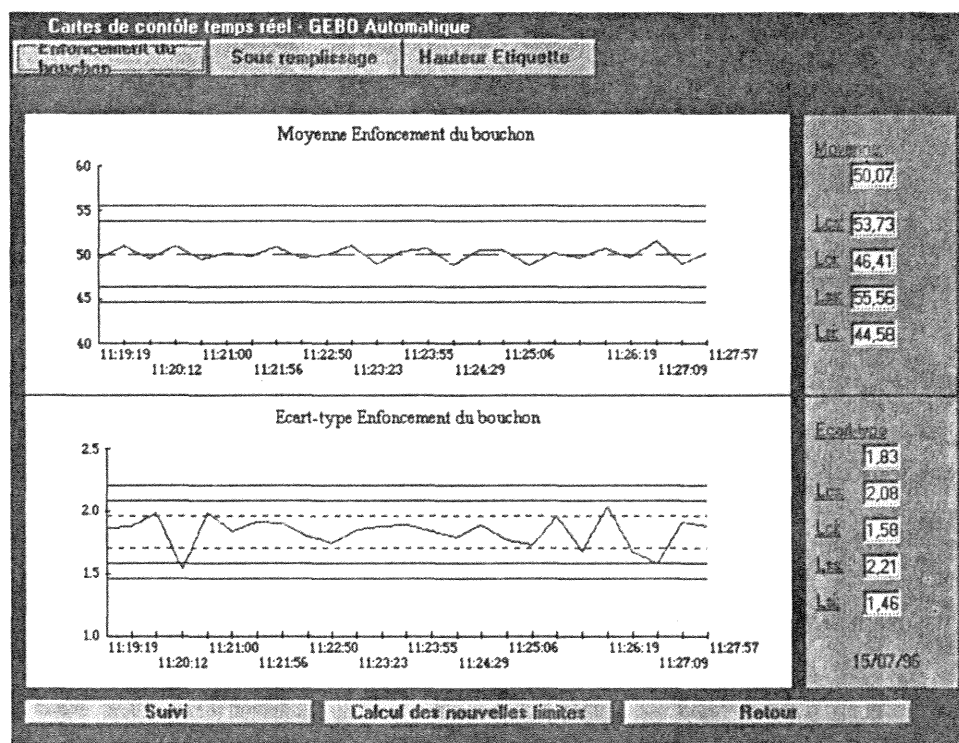


Figure IV.14 : Exemple de tracé de cartes de contrôle

Les limites de contrôle de ces cartes sont calculées une première fois et réactualisées sur demande à partir de la totalité des points visualisés sur le tracé. Lors du premier tracé, constituant la phase d'évaluation du procédé, les limites de contrôle sont donc inexistantes jusqu'à la première demande de calcul. Pendant ce temps, la détection automatique de dérives de qualité est donc inopérante, le tri des produits étant quant à lui toujours actif.

Lorsqu'un point sort des limites de contrôle, une alarme est générée provoquant l'alerte de l'opérateur par balise lumineuse et, comme nous l'avons précisé ci-avant, un message est affiché sur l'écran principal. Un journal mémorise automatiquement toute dérive de qualité détectée en y associant l'heure d'apparition et la désignation de la caractéristique du produit en défaut (figure IV.15). De plus, pour chaque dérive, une cause assignable peut être saisie manuellement, une liste des causes les plus fréquentes est proposée pour faciliter cette tâche.

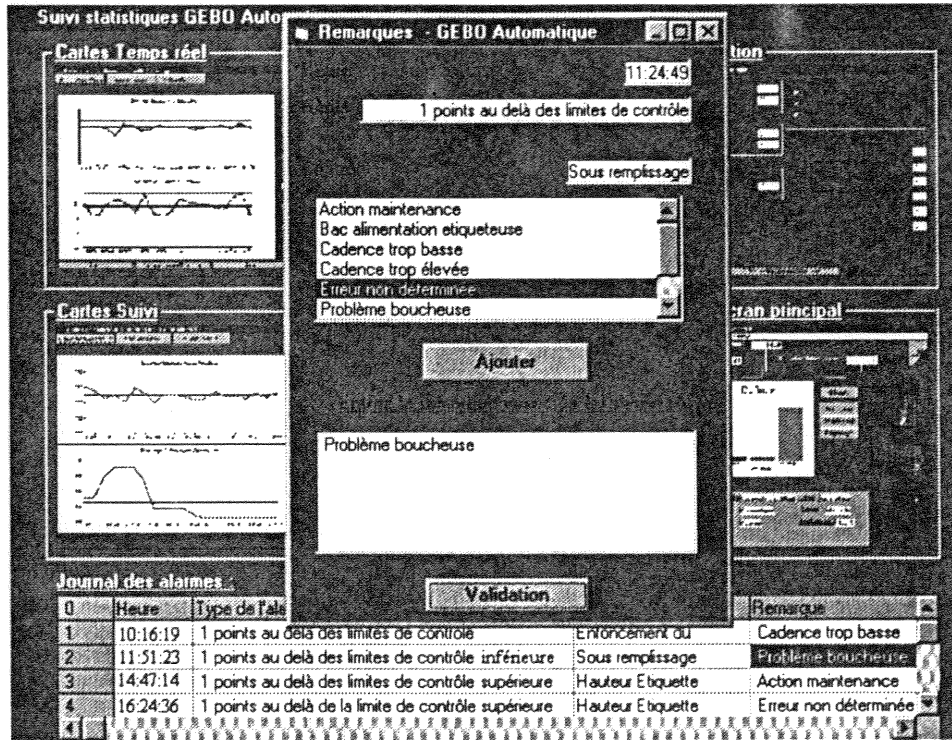


Figure IV.15 : Exemple de journal des alarmes et de saisie de cause assignable

- Les indices de capabilités machine et procédé (figure IV.16).

En plus des valeurs chiffrées de ces indices, il est possible d'obtenir le tracé de leur évolution dans le temps permettant ainsi d'observer les variations de la performance du procédé.

Par ailleurs, nous avons fourni la possibilité d'étudier l'influence d'un paramètre de marche du procédé sur la performance des machines, cela afin d'améliorer notre connaissance du processus pour optimiser sa conduite et faciliter les opérations de diagnostic futures. En effet, nous pouvons obtenir le tracé de l'évolution d'un paramètre de marche en parallèle avec celui de la capacité machine, ainsi qu'un diagramme de corrélation liant ces deux valeurs. Il est alors possible d'observer par exemple l'influence de la cadence de production sur la hauteur du niveau de remplissage ou d'enfoncement du bouchon. La cadence de production peut être directement calculée par le système informatique temps réel à partir de l'instrumentation existante pour la gestion de l'éjection. Les autres paramètres (couple de serrage du bouchon, pression d'alimentation de la soutireuse, température de colle de l'étiqueteuse, ...) nécessitent la mise en oeuvre de capteurs supplémentaires.

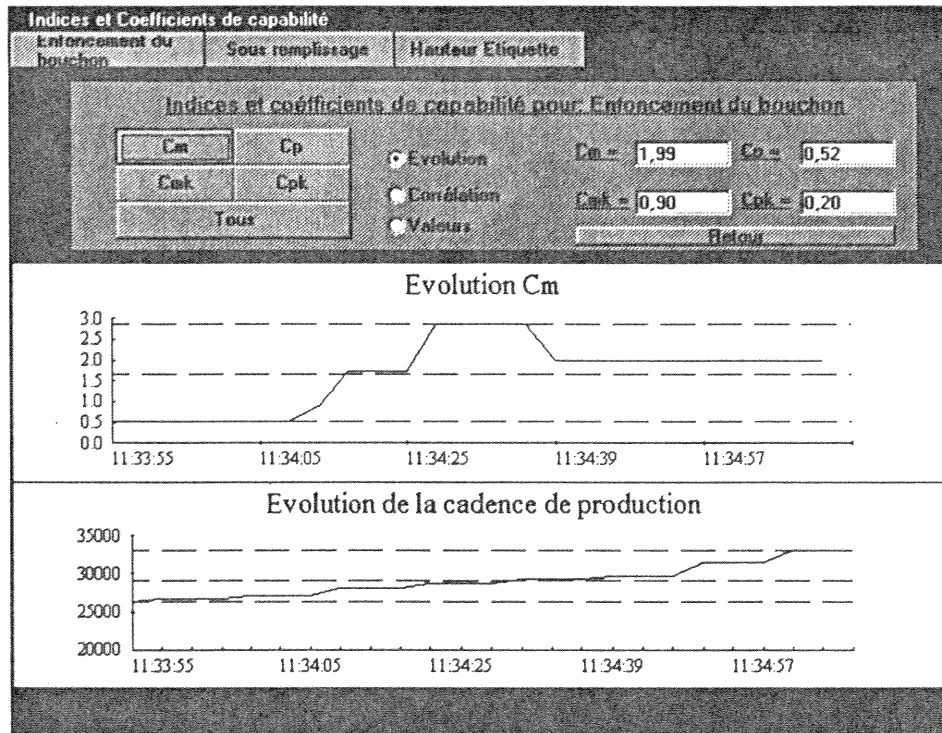


Figure IV.16 : Exemple d'écran de présentation des indices de capacité

Par ailleurs, la configuration de l'analyse statistique s'effectue à partir d'un écran dédié à cette tâche par lequel il est possible de modifier les paramètres d'échantillonnage et d'affichage des divers indicateurs de qualité. La génération d'alarme peut également y être désactivée.

5.2 - Adaptabilité de l'interface

Notre système a vocation à être installé dans diverses usines d'embouteillage. Aussi, devant la diversité, d'une part des produits à inspecter, et d'autre part des exigences des clients concernant l'ergonomie de l'interface opérateur, il nous a paru essentiel de définir une interface adaptable à chaque application industrielle. Une interface est dite adaptable d'après J.P. Meinadier [MEI91] si, sans reprogrammation, elle peut être adaptée à différents utilisateurs.

Cette adaptabilité est obtenue par une génération automatique de l'interface opérateur à partir de fichiers textes contenant l'ensemble des paramètres de configuration de celle-ci. Lors de l'installation du système sur une ligne d'embouteillage, il suffit alors de compléter les différents champs de ces fichiers textes en respectant un modèle défini. Ainsi, il n'est pas nécessaire de toucher au code de programmation de l'interface pour l'adapter à la nouvelle application, ce qui permet de simplifier les reconfigurations clients et de réduire les temps de mise en oeuvre.

Ces fichiers textes sont au nombre de trois pour chaque format de bouteille:

- Le fichier de configuration "*Nom_format.txt*":

Ce fichier contient l'ensemble des paramètres définissant les positions et les contenus des diverses zones d'affichage des éléments graphiques et textes. Il contient également les identificateurs des différentes adresses de communication avec la carte de traitement d'images.

<pre> --- Déclaration des éléments pères --- "Intitulé père 1":("Position X";"Position Y") "Intitulé père 2":("Position X";"Position Y") etc. --- Déclaration des caractéristiques inspectées --- "Intitulé père 1":"Intitulé de caractéristique"*"Numéro champs d'entrée pour le compteur associé"+"Numéro champs d'entrée pour le pourcentage associé" "Numéro champs de sortie pour l'activation/désactivation de l'inspection" --- Déclaration de l'éjection --- "Numéro champs de sortie pour l'éjection" --- Déclaration de l'image du produit --- "Chemin d'accès au fichier image" --- Déclaration des seuils d'acceptabilité --- "Intitulé seuil 1"#"Numéro champs de sortie"+"Valeur initiale du seuil" etc. etc..... </pre> <p style="text-align: center;">Partie du modèle de fichier de configuration</p>	<pre> --- Déclaration des éléments pères --- Remplissage:(8900;2600) Bouchage:(8700;1900) --- Déclaration des caractéristiques inspectées --- Remplissage:Sous-remplissage*2+3 5 Bouchage: Absence bouchon*4+5 6 Bouchage: Enfoncement bouchon*6+7 7 --- Déclaration de l'éjection --- 15 --- Déclaration de l'image du produit --- C:/pontgebo/contrex.bmp --- Déclaration des seuils d'acceptabilité --- Hauteur remplissage#14+61.7 Enfoncement bouchon#16+28.4 etc..... </pre> <p style="text-align: center;">Exemple de fichier de configuration suivant modèle</p>
---	---

Figure IV.17 : Le fichier de configuration

- Le fichier de mots de passe "*Nom_format.pwd*":

Ce fichier contient les mots de passe définissant les droits d'accès aux différentes fonctions de l'interface opérateur.

- Le fichier de mise à jour "*Nom_format.upd*":

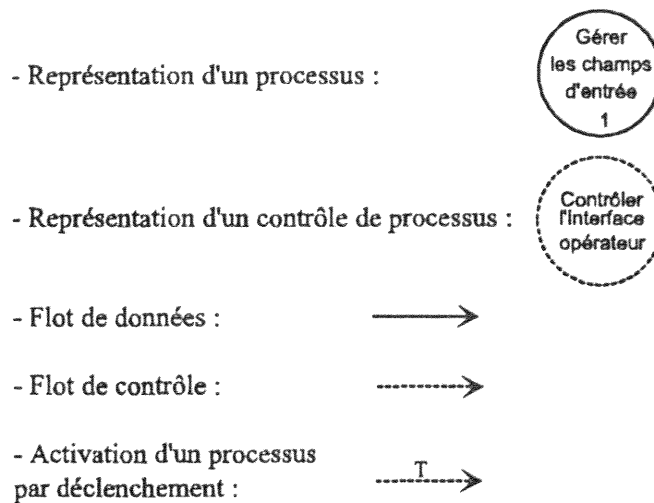
Ce fichier contient les paramètres définissant les modes de marche du système, ainsi que la configuration de l'analyse statistique. Il est mis à jour après chaque modification de ces paramètres par l'interface opérateur, permettant ainsi de remettre le système dans sa dernière configuration après un arrêt de celui-ci ou une coupure de courant.

Un quatrième fichier, nommé "config.txt", définit pour chaque format de produit, son intitulé, les trois fichiers précédents associés, ainsi que le fichier contenant le programme de traitement d'images correspondant. Le fichier "config.txt" permet ainsi de déterminer les éléments à charger lors d'un changement de format de bouteille.

5.3 - Développement informatique

L'analyse des traitements informatiques a été effectuée en utilisant la méthode S.A.R.T. (Structure Analysis Real Time) [HAT91]. Cette méthode permet de décrire de manière structurée les tâches, ou processus logiciels, par une décomposition hiérarchique de ceux-ci, de spécifier les modes de déclenchement de leur activation, ainsi que les flux informationnels entre ces processus et avec l'extérieur.

Rappelons brièvement le formalisme de la méthode S.A.R.T. pour les diagrammes de flots de données et de contrôles:



La décomposition de premier niveau de l'ensemble des traitements informatiques effectués sur le P.C. industriel est représentée sur le diagramme suivant. Celle-ci fait apparaître cinq processus principaux, que nous détaillons ci-après, ayant pour charge d'une part l'analyse statistique des données, et d'autre part la gestion de l'interface opérateur et des flux informationnels qu'elle met en oeuvre.

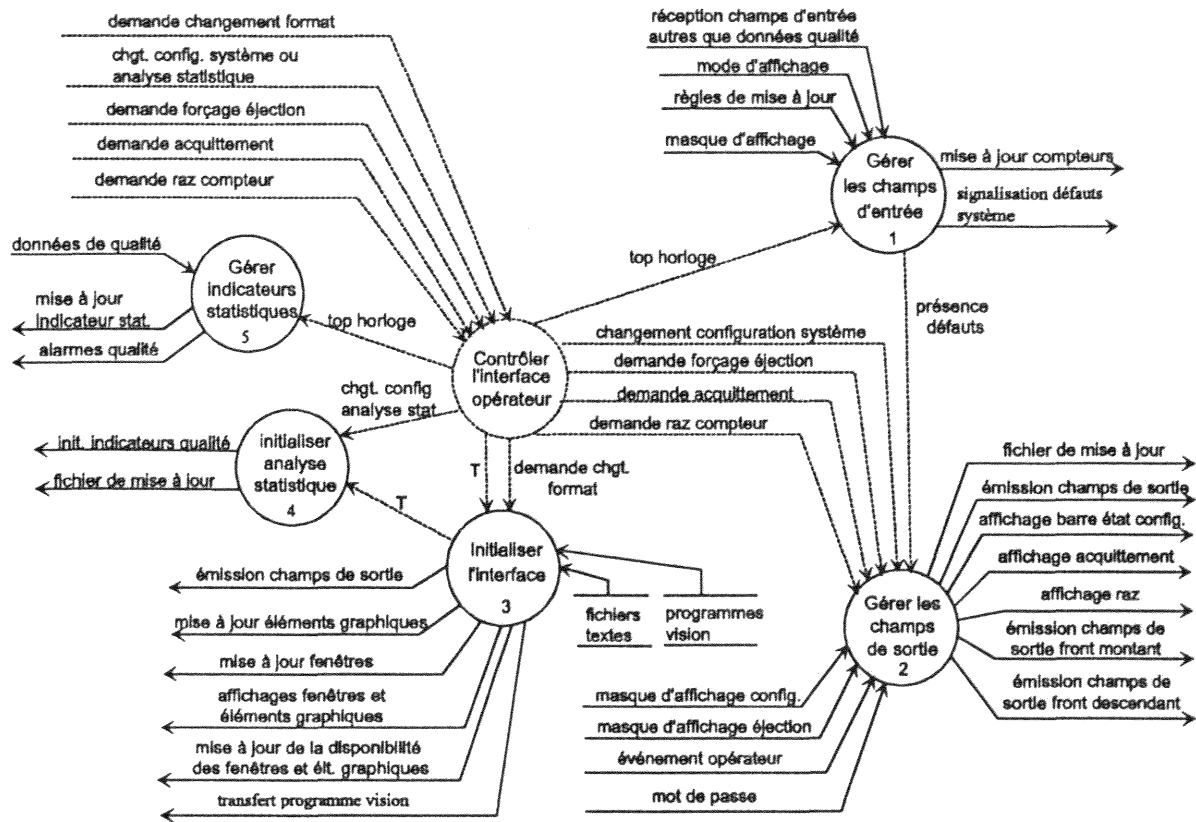


Figure IV.18 : Diagramme S.A.R.T. 0
"Gérer l'interface opérateur et l'analyse statistique"

- Deux processus sont chargés d'initialiser le système:

Le processus "Initialiser l'interface" est activé soit par déclenchement lors de la mise sous tension du système, soit lors d'un changement de format de produit. Il lit les fichiers textes décrits précédemment, les interprète et range les données ainsi récupérées dans des tableaux de travail. Il génère ensuite l'affichage des différents éléments graphiques et textes de l'interface, transfère le programme de vision dans la carte de traitement d'images, et initialise la communication avec cette dernière en transmettant les données (ou champs de sortie) contenues dans le fichier de mise à jour "Nom_format.upd". Enfin, il lance le processus d'initialisation de l'analyse statistique.

Le processus "Initialiser analyse statistique" peut également être activé lors d'une modification par l'interface opérateur des paramètres des indicateurs statistiques de qualité. Il initialise ces divers indicateurs et stocke les nouveaux paramètres dans le fichier de mise à jour.

- Le processus "Gérer les champs de sortie" est chargé de réceptionner et d'identifier les actions de l'opérateur, puis de réaliser les opérations demandées comme par exemple la modification des modes de marche de l'éjection ou de l'inspection, la mise à zéro des

compteurs, ... Sa tâche principale est de transmettre à la carte de traitement d'images les informations nécessaires à la réalisation de ces opérations.

- **Le processus "Gérer les champs d'entrée"** a pour tâche de réceptionner les informations transmises par la carte de traitement d'images autre que les données de qualité, et d'afficher les symboles graphiques ou textes correspondant à ces informations (nouvelles valeurs de compteurs, messages de défaut de fonctionnement de l'éjection, ...).

- **Le processus "Gérer les indicateurs statistiques"** réceptionne les données de qualité transmises par la carte de traitement d'images, constitue les échantillons et calcule pour chacun d'eux les valeurs de la moyenne et de l'écart type. Ces valeurs sont stockées dans deux files circulaires dont la taille est égale au nombre de points affichés sur les cartes de contrôle. C'est à partir des données contenues dans ces files que les cartes de contrôle sont tracées et que les indices de capabilité sont calculés. Quant aux valeurs des fréquences des classes des histogrammes, elles sont réactualisées à réception de chaque nouvelle donnée de qualité, et stockées dans un tableau spécifique.

Ce processus teste également si une valeur de moyenne ou d'écart type dépasse les limites de contrôle auquel cas il génère une alarme.

Le développement des traitements informatiques a été réalisé en Visual Basic 4.0 de Microsoft [MIC94], car ce langage est particulièrement adapté au développement d'interfaces utilisateurs. En effet, il permet par des commandes simples de gérer des fenêtres, menus, boîtes de dialogue et éléments graphiques.

L'interface opérateur telle que définie ci-dessus a été implantée sur un système prototype au sein de la Société GEBO Automatique, elle est actuellement en phase de validation et de tests.

6 - Mise en oeuvre industrielle

Le système, tel que présenté dans ce chapitre, a tout d'abord été réalisé sous forme de prototype et installé dans le centre d'essais de la Société GEBO sur un circuit de convoyage de bouteilles en boucle fermée. Ce prototype nous a permis d'effectuer des tests et mises au point avec différents formats de produits se déplaçant à divers paliers de vitesse.

Les figures suivantes présentent des photos de ce système sur lesquelles nous retrouvons les différents composants présentés sur la figure IV.2.



Figure IV.19 : Photo de la face avant du système

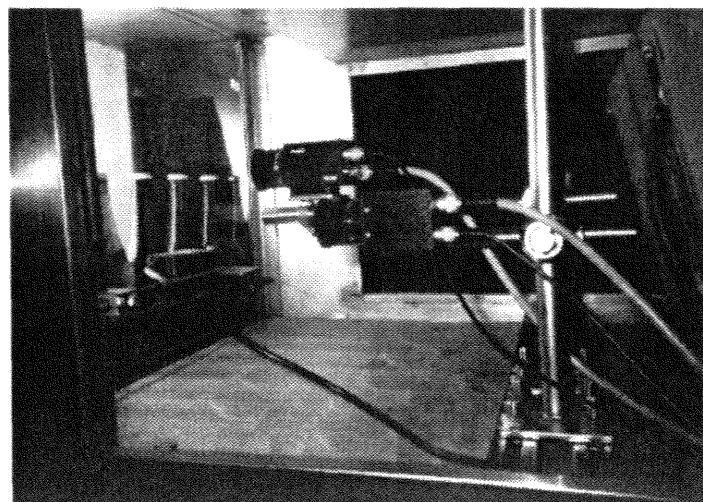


Figure IV.20 : Photo de l'implantation des caméras

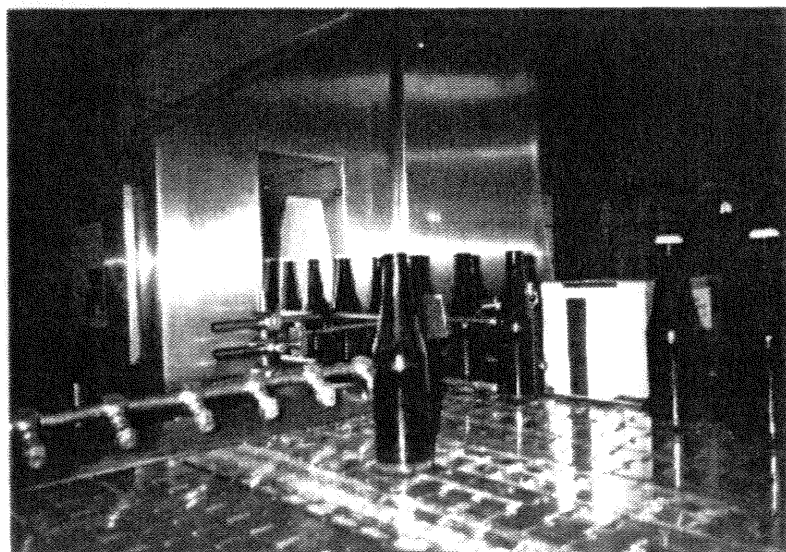


Figure IV.21 : Photo de l'éjecteur en sortie du pont de contrôle

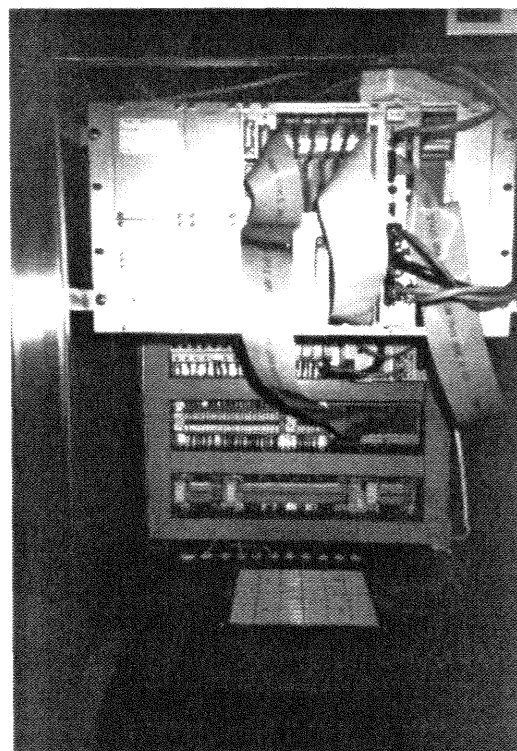


Figure IV.22 : Photo du calculateur temps réel et des divers composants électriques

Nous avons ensuite installé et mis en oeuvre plusieurs exemplaires de ce système dans diverses usines d'embouteillage référencées sur la figure suivante. Néanmoins, ceux-ci ne

comportent pas de suivi par cartes de contrôle, car comme nous l'avons indiqué auparavant, le développement réalisé des traitements correspondants vient d'être achevé et est en cours de validation sur le système prototype.

Ligne de conditionnement	Format des bouteilles	Caractéristiques inspectées	Cadence maxi. de production	Vitesse maxi de déplacement des bouteilles
VOLVIC ligne 5	- 2 formats de 0.5l PET - 1 format de 0.5l PVC	bouchage, sur-bouchage, remplissage, étiquetage	25 000 bout./h	65 m/mn
VOLVIC ligne 9	2 formats de 0.5l PET	bouchage, sur-bouchage, remplissage, étiquetage	36 000 bout./h	70 m/mn
VOLVIC ligne 1	- 2 formats de 1.5l PET - 1 format de 1.5l PVC	bouchage, sur-bouchage, remplissage, étiquetage	30 000 bout./h	66 m/mn
VOLVIC ARVIE	1.5l PET	bouchage, remplissage, étiquetage	25 000 bout./h	86 m/mn
COCA-COLA Grigny	- 1 format de 1.5l PET - 1 format de 2l PET	étiquetage (par caméra déportée dans l'étiqueteuse)	36 000 bout./h	115 m/mn
VITTEL ligne N4	1.5l PET	bouchage, remplissage	30 000 bout./h	58 m/mn
VITTEL ligne N6	1.5l PET	bouchage, remplissage	30 000 bout./h	58 m/mn
CONTREX ligne 19	1.5l PET	bouchage, remplissage	36 000 bout./h	60 m/mn
CONTREX ligne 22	1.5l PET	bouchage, remplissage	36 000 bout./h	60 m/mn
CONTREX ligne 21	1.5l PET	bouchage, remplissage	36 000 bout./h	60 m/mn

Figure IV.23 : Principales installations industrielles

Les systèmes installés donnent satisfaction aux différentes sociétés d'embouteillage, comme nous pouvons l'évaluer au travers de la forte demande en installations nouvelles.

Les apports de notre travail se manifestent par une fiabilisation du contrôle de la production permettant une meilleure assurance de la conformité des produits livrés.

La mise en place du système permet également un net désengagement des opérateurs de contrôle dans la gestion de la ligne, bien que la prudence industrielle ait été observée sur deux lignes de conditionnement par le maintien d'un opérateur d'inspection. Ceci se justifie par la capacité d'adaptation à l'imprévu des opérateurs humains, que nous avons évoquée au chapitre III (§2.2.1), et que ne possède pas un système automatisé.

D'autre part, le système fournit des indicateurs de tableau de bord qualité à travers notamment de compteurs de production et compteurs par type de défauts. Ces indicateurs prennent une place importante dans la gestion de la ligne en ce qui concerne la détermination

des réglages du procédé, des interventions de maintenance, et des changements de matières premières.

Par ailleurs, de par les réactions réflexes qu'ils mettent en oeuvre, les systèmes installés permettent d'éviter la production en masse de produits défectueux lors d'importants dérèglages du procédé. Notre approche permet en outre d'envisager une plus grande réactivité de la qualité de la production sur la conduite du processus, au travers du suivi statistique et des modes de réaction préventifs tels que nous les avons analysés dans le chapitre III.

7 - Conclusion

Le système réalisé est construit suivant l'architecture fonctionnelle définie au chapitre précédent, il est composé d'un calculateur temps réel communiquant par bus VME, et d'un PC industriel.

Pour effectuer l'inspection des produits, nous avons choisi comme technologie principale la vision artificielle pour sa polyvalence et sa précision. Les conditions industrielles défavorables, ainsi que la variabilité des formats et des caractéristiques des produits, nous ont amené à définir des solutions particulières d'acquisition d'images.

Les principales difficultés dans les traitements effectués par le calculateur temps réel ont été rencontrées pour la synchronisation du système d'éjection, de par les vitesses importantes de déplacement des produits, et le peu d'espace entre chacun d'eux. Sa réalisation nous a conduit à l'utilisation d'un codeur incrémental pour suivre la position ainsi que la vitesse des bouteilles, et après divers essais, à définir un temps d'anticipation de déclenchement de l'éjection.

L'identification des organes de fabrication a nécessité la mise en place de divers capteurs sur la machine de conditionnement, afin notamment de prendre en compte d'éventuelles explosions de bouteilles.

L'interface opérateur implantée sur le PC a été réalisée avec un souci d'ergonomie des divers écrans et d'adaptabilité aux différentes configurations industrielles. Elle fournit aux opérateurs de production, services maintenance et assurance qualité, des tableaux de bord composés d'indicateurs de qualité (compteurs, cartes de contrôle, histogrammes, capacités) et d'informations sur le fonctionnement du système (modes de marche, défauts). Par ailleurs, un suivi statistique par cartes de contrôle de Shewhart de la production globale permet le déclenchement d'alarmes lors de la détection d'instabilités du procédé. Les indicateurs et

alarmes de qualité constituent, comme précisé au chapitre précédent (§5.2.1), une aide à la conduite du processus d'embouteillage.

Plusieurs systèmes réalisant les fonctions d'inspection et de tri à 100% des produits, ainsi que des réactions réflexes sur le procédé, ont été installés dans différentes usines d'embouteillage et donnent satisfaction aux industriels. Ils améliorent l'assurance de la conformité des produits livrés tout en réduisant le nombre d'opérateurs d'inspection nécessaires. Ils limitent par ailleurs le nombre de produits défectueux fabriqués en cas de dérèglages importants du procédé. En outre, de par les indicateurs de qualité qu'ils fournissent, les systèmes installés permettent une meilleure gestion du procédé.

Les développements futurs du système devront permettre tout d'abord d'établir un lien de communication par liaison série entre le calculateur temps réel et le PC industriel, de manière à être indépendant du système d'inspection. Ensuite, le suivi individuel de chaque organe de fabrication des machines de conditionnement, ainsi que l'observation des caractéristiques de type attribut, devront être mis en place. En parallèle, des travaux de recherche et développement devraient être menés concernant les phases de diagnostic et de décision de réactions, afin notamment d'approfondir les propositions émises au chapitre III de mise en oeuvre d'un système expert, et d'aboutir à la réalisation de réactions automatiques sur la commande du procédé.

Conclusion Générale et Perspectives

Actuellement dans l'industrie de l'embouteillage, les contraintes économiques de plus en plus fortes générées par la pression des marchés et de la concurrence, ainsi que l'émergence ces dernières années de normes d'assurance qualité ISO 9000, nécessitent d'une part une augmentation de la productivité, et d'autre part une amélioration de la qualité des produits.

Or, les modes de gestion actuels de la qualité en embouteillage permettent difficilement d'atteindre ces objectifs car ils sont essentiellement basés sur une démarche curative, et ne sont pas adaptés aux contraintes générées par les cadences très élevées de production.

Pour y parvenir, la complémentarité entre une inspection à 100% des produits et la maîtrise temps réel du procédé de fabrication est nécessaire. Aussi, nous avons proposé d'appliquer la Méthode de Maîtrise Statistique des Procédés (MSP) au processus d'embouteillage.

Ce procédé, de par ses particularités principales qui sont une haute, voire très haute, cadence de production, et des machines composées d'un nombre important d'organes de fabrication, nécessite des modes spécifiques d'application de la MSP. Notamment, les cadences élevées de production amènent à assimiler ce processus discontinu aux procédés à dynamique continue, et obligent alors la détection des dérives de qualité à la fois lentes et rapides.

Aussi, après avoir comparé les performances des différentes cartes de contrôle et testé leur efficacité sur des données prélevées sur une ligne de conditionnement réelle, nous avons proposé une stratégie de mise en oeuvre de celles-ci permettant un suivi optimal du procédé d'embouteillage. Cette stratégie suggère l'utilisation de cartes de contrôle de Shewhart et EWMA, permettant ainsi la détection de tous types de dérives de qualité, et fournissant également des informations pertinentes pour la phase de diagnostic des causes assignables. Par ailleurs, elle propose des méthodes visant à réagir de manière réflexe dans les cas d'urgence de proportions importantes de produits défectueux fabriqués.

Compte tenu du besoin de suivi en temps réel du processus, ainsi que d'une inspection/tri fiable à 100% des produits, et devant les cadences importantes de production, nous avons proposé un système automatisé de maîtrise de la qualité du procédé d'embouteillage.

L'analyse fonctionnelle de ce système a montré qu'il doit réaliser deux boucles de réaction sur la ligne de conditionnement.

La première s'attache au produit en effectuant l'inspection/tri des bouteilles par une agrégation de plusieurs mesures issues de capteurs utilisant différentes technologies. Cette première boucle a pour objectif de réduire les coûts importants dus aux produits défectueux livrés.

La seconde a pour objet de garantir la qualité des produits fabriqués en réagissant au plus vite sur la conduite et le fonctionnement du processus lors de dérives de qualité détectées.

Pour réaliser cette seconde boucle, le système met en oeuvre la stratégie de suivi du procédé proposée précédemment. Il réalise également la phase de diagnostic des causes de dérives de qualité, pour laquelle nous avons préconisé l'emploi d'un système expert utilisant notamment des informations provenant de l'analyse statistique du comportement du procédé.

Les réactions du système sur les machines de conditionnement s'effectuent soit de manière automatique, soit par l'intermédiaire de l'opérateur, des services maintenance ou assurance qualité. L'interaction du système avec ces divers intervenants est donc d'une importance majeure, aussi nous avons modélisé les flux informationnels échangés.

Les réactions sur le procédé constituent d'une part une aide à la conduite de celui-ci, permettant notamment la réduction du nombre de produits défectueux fabriqués, ainsi que des quantités de matière première utilisées. Et d'autre part, elles apportent une aide à la maintenance, et permettent ainsi de réduire les pertes de production en augmentant la disponibilité du procédé.

Le système réalisé correspond à l'analyse fonctionnelle. Il constitue ainsi un système prototype de base à partir duquel pourront être développées et testées l'ensemble des fonctionnalités proposées. Il est composé d'un calculateur temps réel communiquant par bus VME, et d'un PC industriel. Comme technologie principale d'inspection des produits, nous avons choisi la vision artificielle pour ses performances en termes de précision de mesure et de polyvalence. Par ailleurs, les difficultés engendrées par les cadences élevées de production nous ont amené à définir des algorithmes aboutissant à une synchronisation parfaite du dispositif d'éjection des bouteilles défectueuses. L'interface opérateur implantée sur le PC a été réalisée avec un souci d'ergonomie des divers écrans, et d'adaptabilité aux différentes configurations industrielles. Les traitements statistiques effectués par le PC calculent et tracent un ensemble d'indicateurs qualité, ils génèrent également des alarmes lors de la détection de dérèglages ou dysfonctionnements des machines de conditionnement. Ces indicateurs et alarmes de qualité ont pour objet de constituer une aide à la conduite du procédé d'embouteillage.

Plusieurs systèmes ont été mis en place avec succès dans d'importantes usines d'embouteillage. Ils permettent une plus grande assurance de la qualité livrée, génèrent des réactions réflexes sur la ligne de conditionnement, et améliorent la gestion du procédé de par les indicateurs de qualité qu'ils fournissent.

Finalement, des trois niveaux fonctionnels du système définis au chapitre III, figure III.17, le niveau inférieur, correspondant à l'inspection/tri des produits, et suscitant actuellement la demande la plus forte du milieu industriel, a été réalisé et implanté avec succès dans plusieurs usines d'embouteillage.

Le niveau intermédiaire, correspondant au suivi temps réel de la qualité des produits, a été en partie réalisé. Il nécessite des développements complémentaires, ainsi que des campagnes de tests et essais sur lignes de conditionnement réelles afin de valider en milieu industriel les stratégies de suivi du procédé d'embouteillage proposées au chapitre II.

Quant au dernier niveau, constituant l'aide à la maintenance, il requiert des travaux de recherche et de développement approfondis pour définir plus précisément les phases de diagnostic et de prises de décisions de réactions.

Bibliographie

1 - Bibliographie Scientifique

- [AFI90] **AFIM/AFNOR**
Actes de conférences
Journée AMDEC, Lyon, 1990
- [BON93] **A. De Bonneval**
"Mécanismes de reprise dans les systèmes de commande à évènements discrets"
Thèse de l'Université Sabatier de Toulouse, spécialité Informatique Industrielle, 1993
- [COL91] **R. Collignon**
"Analyse de Séquences d'Images de Scènes Fortement Contrastées"
Rapport de Recherche de D.E.A. en Métrologie électronique, Automatique, Electrotechnique (M.A.E.), option Automatique - Centre de Recherche en Automatique de Nancy (C.R.A.N.), Laboratoire d'Automatique de l'E.N.S.E.M., 1991
- [COL96a] **R. Collignon, E. Bajic, Ch. Voltz**
"La Gestion de la Qualité par la Méthode de M.S.P."
Process, n°1119, pp. 24-28, ISSN 0998-6650, Sept. 1996
- [COL96b] **R. Collignon, E. Bajic, Ch. Voltz**
"Maîtrise Statistique Temps Réel d'un Procédé Discret à Haute Cadence: Cas d'une Ligne d'Embouteillage"
Revue Pratique de Contrôle Industriel, n°201, pp. 58-63, ISSN 0033-5142, Nov. 1996
- [COL96c] **R. Collignon, E. Bajic, Ch. Voltz**
"Maîtrise Statistique Temps Réel d'une Ligne d'Embouteillage"
BIOS, n°263, pp. 21-28, ISSN 1252-1248, Nov. 1996
- [CRO89] **S.V. Crowder**
"Design of Exponentially Weighted Moving Average Schemes"
Journal of Quality Technology, vol. 21, n°3, july 1989
- [DAU91] **J.J. Daudin**
"Cartes de contrôle moyennes mobiles avec pondération exponentielle"
Journées Agro-Industrie et Méthodes Statistiques, Nantes, 1991
- [DAU92] **J.J. Daudin**
"Double sampling \bar{X} charts"
Journal of Quality Technology, n°24, pp 78-87, 1992

- [DOI92] **Ch. Doiteaux**
"Auto-contrôle de cellule flexible d'usinage: étude et réalisation du système de pilotage"
Thèse de l'Université de Nancy I, spécialité Production Automatisée, 1992
- [DUF92] **M. Dufaut, R. Collignon, R. Husson**
"Traitement d'Images de Scènes très Contrastées, Application au Guidage de Robot Mobile"
Congrès ISA sur l'Automatisation Industrielle, Montréal, 1-3 juin 1992
- [EVA88] **J.R. Evans, W.M. Lindsay**
"A framework for expert system development in statistical quality control"
Computers and Industrial Engineering, vol. 14, n°3, pp. 335-343, 1988
- [EWA63] **W.D. Ewan**
"When and How to Use CU-SUM Charts"
Technometrics, vol. 5, n°1, pp 1-22, february 1963
- [GOL61] **P.L. Goldsmith, H. Whitfield**
"Average Run Lengths in Cumulative Chart Quality Control Schemes"
Technometrics, vol. 3, pp. 11-20, 1961
- [GON84] **M. Gondran, J.C. Laleuf**
"La représentation des connaissances en fiabilité: L'analyse Fonction Composants Paramètres"
4ème colloque international sur la fiabilité et la maintenabilité, France, 1984
- [GUY92] **Ch. Guyard**
"L'irrésistible ascension de la certification"
Industries et Techniques, n°724, pp 42-47, avril 1992
- [HUN86] **J.S. Hunter**
"The Exponentially Weighted Moving Average"
Journal of Quality Technology, vol. 18, n°4, pp 203-210, october 1986
- [HWA91] **H.B. Hwang, N.F. Hubele**
"X-bar chart pattern recognition using neural nets"
ASQC Quality Congress Transactions, Milwaukee, pp 884-889, 1991
- [ISH84] **K. Ishikawa**
"Le TQC ou la qualité à la japonaise"
Editions AFNOR gestion, ISBN 2-12-465211-7, 1984
- [KOL93] **Ch. Kolski**
"Ingénierie des interfaces homme-machine"
Editions HERMES, ISBN 2-86601-377-8, 1993
- [LAM89] **JL. Lamouille, B. Murry, Ch. Potié**
"La Maîtrise Statistique des Procédés, démarche et outils"
Editions AFNOR gestion, ISBN 2-12-477411-5, 1989
- [LEA96] **S. Leaper**
"Hazard Analysis is nothing new - or is it ? "
The European Food & Drink Review, pp. 71-75, ISSN 0955-4416, winter 1996

- [LEF95] **N. Lefebvre**
"Le SPC dans les processus continus à événements discrets"
Rapport bibliographique de D.E.A. en Production Automatisée, Centre de Recherche en Automatique de Nancy, 1995
- [LEV89] **P.Lévine, J.C. Pomerol**
"Systèmes interactifs d'aide à la décision et systèmes experts"
Editions Hermès, ISBN 2-86601-188-0, 1989
- [LOV89] **P.L. Love, M. Simaan**
"A knowledge-based approach for detection and diagnosis of out-of-control events in manufacturing processes"
IEEE, pp. 736-741, 1989
- [LUC76] **J.M. Lucas**
"The Design and Use of V-Mask Control"
Journal of Quality Technology, vol. 8, n°1, pp. 1-12, January 1976
- [LUC82a] **J.M. Lucas**
"Combined Shewhart-CUSUM Quality Control Schemes"
Journal of Quality Technology, vol. 14, n°2, April 1982
- [LUC82b] **J.M. Lucas**
"Fast Initial Response for CUSUM Quality-Control Schemes : Give Your CUSUM a Head Start"
Technometrics, vol. 24, n°3, August 1982
- [LUC90] **J.M. Lucas, M.S. Saccucci**
"Exponentially Weighted Moving Average Control Schemes : Properties and Enhancements"
Technometrics, vol. 32, n°1, pp 1-12, February 1990
- [MEI91] **J.P. Meinadier**
"L'interface utilisateur"
Editions Dunod, ISBN 2-10-000160-4, 1991
- [MIL93] **P. Millet**
"L'embouteillage dans le contexte industriel européen"
BIOS, vol. 24, n°9-10, pp 35-40, Sept. 1993
- [MOQ95a] **E. Moquard**
"Une MSP qui évolue, se diversifie: ses utilisateurs témoignent"
Revue Pratique de Contrôle Industriel, n°192, pp 14-23, April 1995
- [MOQ95b] **E. Moquard**
"Les utilisateurs MSP témoignent"
Revue Pratique de Contrôle Industriel, n°193, pp 16-23, June 1995
- [NCU94] **M.M. Neube**
"Cumulative Score Quality Control Procedures for Process Variability"
International Journal of Quality and Reliability Management, vol. 11, n°5, pp 38-45, 1994

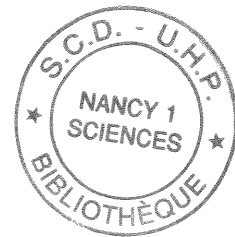
-
- [NEL84] **L.S. Nelson**
"The Shewhart control chart, tests for special causes"
Journal of Quality Technology, n°16, pp 237-239, 1984
- [NOD93] **F. Nodé-Langlois**
"L'embouteillage des boissons"
Emballages Magazine, pp 53-73, juin 1993
- [ODIL92] **M. Odile**
"La qualité? Considérez la comme un investissement..."
Mesures, n°644, pp 28-34, avril 1992
- [PAL93] **M. Palsky**
"La maîtrise des procédés continus"
Document Rhone Poulenc, 1993
- [PEY94] **J.F. Peyrucat**
"La Maîtrise Statistique de Processus"
Mesures, n°664, pp 87-91, avril 1994
- [PHU93] **G. Phung**
"Gestion des appareils de mesure assistée par ordinateur"
Revue Pratique de Contrôle Industriel, n°180, pp 44-50, avril 1993
- [PIL89] **M. Pillet**
"Le S.P.C., surveillance des procédés en continu"
Contrôle industriel et qualité, n°157, pp 56-64, juin 89
- [PIL93] **M. Pillet**
"Contribution à la maîtrise statistique des procédés, cas particulier des petites séries"
These de l'Université de Savoie, 1993
- [PRA93] **Prabhu, Runger, Keats**
" \bar{X} chart with adaptative sample sizes"
International Journal of Production Research, vol. 31, n° 12, pp 2895-2909, 1993
- [PUG91] **G.A. Pugh**
"A comparison of neural networks to SPC charts"
Proceedings of the 13th Annual Conference on Computers and Industrial Engineering,
vol. 21, n°1-4, pp. 253-255, 1991
- [ROB78] **P.B. Robinson and T.Y. Ho**
"Average Run Lengths of Geometric Moving Average Charts by Numerical Methods"
Technometrics, vol. 20, pp 85-93, 1978
- [ROB96] **Revue CiMax, Edition RobAut**
dossier: "La vision s'exporte"
CiMax: Edition RobAut, n°13, mars-avril-mai 1996
- [RUN91] **G.C. Runger, J.J. Pignatiello**
"Adaptative Sampling for Process Control"
Journal of Quality Technology, vol. 23, n°2, pp 135-155, 1991
-

-
- [SCH84] **G.H. Schaffer**
"Statistical Quality Control"
American Machinist, Special report 762, pp 97-108, january 1984
- [SHE31] **W.A. Shewhart**
"Economic Control of Quality of Manufactured Product"
D.Van Nostrand Co., Inc., New York, NY, 1931
- [SMI94] **A.E. Smith**
"X-bar and R control chart interpretation using neural computing"
International Journal of Production Research, vol. 32, n°2, pp 309-320, 1994
- [SNE94] **SNECMA**
"Plans d'expérience, un outil dans le cadre du plan AQCOR"
Document SNECMA, 1994
- [SOM92] **J.L. Sommer**
"La méthode Taguchi"
Rapport bibliographique de D.E.A. Production Automatisée, Centre de Recherche en Automatique de Nancy, 1992
- [SOU86] **P. Souvay**
"La statistique, outil de la qualité"
Editions AFNOR gestion, ISBN 2-12-475-811-X, 1986
- [TOR65] **J. Torrens-Ibern**
"Les méthodes statistiques de contrôle dans les processus industriels continus"
Revue de Statistique Appliquée, vol XIII,n°1, pp 65-93, 1965
- [VAC90] **JL. Vachette**
"Amélioration continue de la qualité"
Les Editions d'Organisation, ISBN 2-7081-1151-5, 1990
- [VAN85] **P. Vandeville**
"Gestion et contrôle de la qualité"
Editions AFNOR gestion, ISBN 2-12-475-111-5, 1985
- [WES58] **Western Electric Company**
Statistical Quality Control Handbook
Western Electric Company, IN, 1958
- [ZUM88] **P. Zumegen**
"Task 2.2.2: Knowledge Based Quality Information System for Consumer Electronics Production"
Esprit 932 interim report, RWTH Aachen, oct. 1988
- [ZWI95] **G. Zwingelstein**
"Diagnostic des défaillances, théorie et pratique pour les systèmes industriels"
Editions Hermes, ISBN 2-86601-463-4, 1995

2 - Bibliographie Technique

- [ACU96] **Société ACUITY**
Manuels de mise en oeuvre des cartes de traitement d'images IVS, et du logiciel de configuration Sensedit, 1996
- [AFN70] **A.F.N.O.R.**
Norme NF X06-031, "*Contrôle en cours de fabrication, Cartes de contrôle*"
Juillet 1970
- [AFN92] **A.F.N.O.R.**
Norme NF X06-030, "*Guide pour la mise en place de la Maîtrise Statistique des Processus*"
Septembre 1992
- [AFN96] **A.F.N.O.R.**
Norme NF XP X07-020, "*Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*"
Juin 1996
- [CAP96] **Société CAP SESA**
Logiciel UNIQUE, document de présentation, 1996
- [CJI94] **Société CJ International**
Manuel d'utilisation du logiciel ISaGRAF, 1994
- [DIB92] **P. Dibble**
"*OS-9 Insights, An advanced programmer's guide to OS-9*"
Edition MICROWARE, ISBN 0-918035-03-1, 1992
- [GAB92] **J. Gabay**
"*Apprendre et pratiquer MERISE*"
Editions MASSON, 1992
- [HAT91] **D.J. Hatley, I.A. Pirbhai**
"*Stratégies de spécifications des systèmes temps réel (SA-RT)*"
Editions MASSON, ISBN 2-225-82229-8, 1991
- [IGL89] **I.G.L.**
"*SADT un langage pour communiquer*"
Editions EYROLLES, 1989
- [MAR92] **Société MARS**
"*La maîtrise des risques microbiologiques*"
Document de formation, 1992
- [MIC91] **Microware**
"*Language Manuals OS-9 Advanced System Software*"
Editions MICROWARE, 1991
- [MIC94] **Microsoft**
Manuels d'utilisation du langage Visual Basic 4.0

- [MIT94] **Mitutoyo**
Manuel du logiciel Statpak-3
Société Mitutoyo, 1994
- [PEP95] **Société PEP**
Manuels de mise en oeuvre des cartes VM30, IMOD, PBDIO/3, VMOD/2 - 1995
- [PEU92] **Automobiles PEUGEOT, Automobiles CITROEN**
"Maîtrise statistique du processus, introduction"
Normes qualité Q52 1008, avril 1992
- [REN90] **Renault**
Norme E 41 36 110 R de détermination de la capabilité des moyens de contrôle



Nom: COLLIGNON

Prénom: Roland

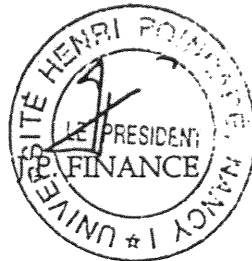
DOCTORAT de l'UNIVERSITE HENRI POINCARÉ, NANCY-I

en PRODUCTION AUTOMATISÉE

VU, APPROUVÉ ET PERMIS D'IMPRIMER

Nancy, le 26 MAI 1997 UHP 032/97

Le Président de l'Université



Résumé :

Les travaux présentés dans ce mémoire ont pour objectif l'amélioration de la qualité dans les processus d'embouteillage à haute cadence. Après avoir montré la nécessaire complémentarité entre une inspection/tri des produits fabriqués et une gestion du procédé de fabrication, nous analysons les causes de variabilité, ainsi que les contraintes engendrées par les cadences de production élevées et les structures multi-postes des machines. Nous proposons alors d'améliorer la qualité de fabrication par la Méthode de Maîtrise Statistique des Procédés (M.S.P.) dont nous rappelons la démarche. L'étude du processus met en évidence la nécessité de détecter à la fois les dérives de qualité lentes et rapides, ce qui nous amène à réaliser une étude comparative des performances des différentes cartes de contrôle existantes que nous expérimentons sur des données provenant d'une ligne de conditionnement industrielle. Nous définissons ensuite une stratégie de gestion et d'amélioration de la qualité du procédé exploitant ces cartes, et permettant le diagnostic des dérives ainsi qu'une réactivité sur la conduite et la maintenance du processus de fabrication.

Face aux contraintes industrielles, nous proposons la mise en œuvre d'un système automatisé pour la réalisation de la maîtrise du procédé. L'analyse fonctionnelle de celui-ci, réalisée à l'aide de la méthode S.A.D.T., met en évidence deux boucles de réaction sur le processus, ainsi que l'importance majeure de l'interaction du système avec les services de l'usine intervenant sur la ligne de production. Ce système permet une augmentation de la productivité, une réduction des coûts, et s'intègre parmi les moyens d'un programme d'Assurance Qualité.

Un prototype a été réalisé et mis en œuvre avec succès sur plusieurs lignes industrielles. Il est composé d'un calculateur temps réel et d'un capteur de vision artificielle pour l'inspection/tri, un second calculateur effectue les traitements statistiques et gère l'interface opérateur.

Mots clés : Contrôle Qualité, Assurance Qualité, Processus discontinus à haute cadence, Maîtrise Statistique des Procédés (M.S.P.), Inspection de produits, Vision industrielle, Embouteillage, Temps réel.

Abstract :

The work presented in this report aims at improving quality in high rate bottling processes. After having proved the necessary complementarity between the inspection and sorting of the manufactured products, on one side, and the control of the manufacturing process, on the other, we analyse the causes of the variability, as well as the restraints generated by the high rates of production and the multi-post structures of the machines. We suggest to improve the quality of the fabrication applying the Statistical Process Control method (S.P.C.), of which we recall the processes. The study of the process makes it obvious that it is necessary to detect both slow and rapid quality variations, which leads us to realize a comparative study of the different existing control charts which we experiment on data taken from an industrial package line. Next, we define a utilization strategy for those charts, which makes it possible to both diagnose the variations and react on the command as well as on the maintenance of the fabrication process.

In view of the industrial constraints, we suggest the setting up of an automated system to implement the control of the process. The functional analysis of this system, carried out with the S.A.D.T. method, puts in a prominent position two feedback loops on the process, as well as the major importance of the interaction of the system with the factory services which intervene on the production line. This system makes it possible to increase the productivity and to reduce the production costs, it is well integrated into a Quality Assurance program.

A prototype has been made and set up with success on different industrial lines. It consists of a real time computer and an artificial vision sensor for the inspection and sorting of the bottles, a second computer performs the statistical processing and manages the operator interface.

Keywords : Quality Control, Quality Assurance, High rate discontinuous process, Statistical Process Control (S.P.C.), Products inspection, Industrial vision, Bottling, Real time.