

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Sciences pour l'Ingénieur**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Nathalie BAUDET

Thèse dirigée par **Maurice PILLET**
et codirigée par **Jean Luc MAIRE**

préparée au sein du **Laboratoire Systèmes et Matériaux pour la Mécatronique**
dans **l'École Doctorale Sciences et Ingénierie des Systèmes de l'Environnement et des Organisations**

Maîtrise de la qualité visuelle des produits - Formalisation du processus d'expertise et proposition d'une approche robuste de contrôle visuel humain

Thèse soutenue publiquement le **18 décembre 2012**,
devant le jury composé de :

M. Michel TOLLENAERE

Professeur, INPG, Président

M. Joël RECH

Professeur, ENISE, Rapporteur

M. Patrick CHARPENTIER

Professeur, ENSTIB, Rapporteur

M. Jacques JACOT

Professeur, EPFL, Examineur

M. Serge SAMPER

Professeur, Université de Savoie, Examineur

M. Christian FARAT

Directeur Qualité-Environnement, Fournier, Examineur

M. Maurice PILLET

Professeur, Université de Savoie, Directeur de Thèse

M. Jean Luc MAIRE

Maître de Conférences, Université de Savoie, co-Directeur de Thèse



Remerciements

Je souhaiterais adresser mes remerciements aux personnes qui m'ont fait l'honneur de participer à mon jury, Messieurs Patrick Charpentier, professeur de l'Université de Lorraine et Joël Rech, professeur de l'École Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne, en qualité de rapporteurs et Messieurs Jacques Jacot, professeur de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Michel Tollenaere, professeur de l'Université de Grenoble, Serge Samper, professeur de l'Université de Savoie et Christian Farat, directeur qualité-environnement de l'entreprise Fournier, en qualité d'examineurs.

Je souhaiterais dire un grand merci à mon directeur de thèse, Monsieur Maurice Pillet et à mon co-encadrant de thèse Monsieur Jean Luc Maire, pour m'avoir donné l'opportunité de mener ces travaux, pour leur soutien, pour les discussions enrichissantes ou, tout simplement, pour le plaisir de travailler avec deux personnes incroyables.

Mes remerciements également aux personnes qui m'ont accueilli au sein de chaque entreprise : Mesdames Myriam Guttin (S.T. Dupont) et Myriam Pujos (NTN-SNR), Messieurs Michel Cauquoz (Fournier), Paul Provence (S.T. Dupont), Brice Lautout (S.T. Dupont), Anthony Bousseau (S.T. Dupont), Arnaud Barre-Pennec (S.T. Dupont), Thierry Daviet (Eudica), David Gomes (Eudica), Jean Charles Luthy (Eudica) et Franck Peaquin (NTN-SNR).

Je tiens à remercier également Collette, Annabelle et Chantal, contrôleuses chez S.T. Dupont, qui m'ont beaucoup aidé dans la compréhension de ce métier difficile, en plus de rendre le travail plus agréable, grâce à leur sympathie et humeur.

Merci plus particulièrement à Jonathan, Mathieu, Boukar et Sébastien, pour les moments de fou rire. Jonathan, continue à prendre soin de Caro et du petit Evan. Mathieu... bref! Nom de Dieu, Boukar!

Merci à mes amis, Sandrine, Juliana, Sandro, Fernanda, Stefanie, Paula, Raquel qui ont été toujours là.

Merci, mami, gordo, véio et macacão. Vous me rendez dingue, mais je vous aime énormément! Macacão, ta passion pour ton travail est un exemple pour moi. Mami, merci d'être toujours à côté de moi lors de mes décisions, même si elles m'amènent loin de toi... Véio, merci pour les corrections d'anglais et pour ton soutien.

À mon Bo, un énorme merci! Merci pour être toujours à mes côtés, pour ton soutien, pour ta compagnie, ... enfin... pour rendre la vie plus belle! Je t'aime.

TABLE DE MATIÈRES

Table de Matières.....	I
Table des Figures.....	VII
Introduction.....	3
1. Problématique et démarche	3
2. La démarche de la recherche.....	4
3. Structuration du document	5
Chapitre 1	7
Qualité perçue et Perception	7
1. De Qualité à Qualité perçue	7
1.1. La Qualité	7
1.2. Qualité perçue	15
1.2.1. Définition.....	15
1.2.2. Le processus de perception.....	16
1.2.3. Satisfaction et qualité perçue.....	17
2. La perception	19
2.1. Fonctionnement	19
2.2. Quelques approches de la perception.....	20
2.2.1. La psychophysique	20
2.2.2. L'inférence inconsciente.....	22
2.2.3. Le behaviorisme	23
2.2.4. La théorie de Gestalt.....	23
2.2.5. La théorie écologique.....	24

2.2.6.	L'approche cognitiviste	24
3.	La perception visuelle.....	25
3.1.	Les éléments du système visuel	25
3.2.	Les mécanismes de la perception visuelle	27
3.2.1.	Exploration visuelle	27
3.2.2.	Sensibilité à la lumière.....	28
3.2.3.	Détection d'un stimulus	29
3.2.4.	Fiabilité de la perception	30
3.2.5.	Qualité de la perception	30
3.3.	Ce qui est perçu.....	32
3.3.1.	Perception des formes.....	32
3.3.2.	Perception d'objets	36
3.3.3.	Perception de la profondeur.....	37
4.	Conclusion	38
Chapitre 2		41
Le Contrôle visuel : de la détection à la caractérisation des anomalies		41
1.	Le Contrôle Visuel	41
1.1.	Les Objectifs d'un Contrôle Visuel.....	42
1.2.	Les Pratiques en Contrôle Visuel	44
2.	Contrôle visuel - esthétique	49
2.1.	Qu'est-ce qui doit être détecté ?	49
2.2.	Caractérisation d'une anomalie	51
2.3.	Profil sensoriel d'une anomalie	53
2.3.1.	Types d'anomalie	53
2.3.2.	Les Attributs d'une anomalie	54
3.	Le Standard de l'entreprise	62
3.1.	La grille d'évaluation Critères/Niveaux.....	64
3.2.	La grille d'évaluation arborescente	65
3.3.	La grille d'évaluation indexée	66
3.4.	La grille d'évaluation hiérarchique corrigée	67
4.	Conclusion	69

Chapitre 3	71
Le Contrôle visuel : Mise en œuvre et mesure d'efficacité	71
1. Le contrôle visuel : un cadre méthodologique	71
2. Le contrôle visuel : mesure de son efficacité	74
2.1. La Théorie du Signal	74
2.2. Le Test $R^2&E^2$	75
2.3. Deux exemples d'utilisation du test $R^2&E^2$	83
2.3.1. Fournier.....	83
2.3.2. Eudica.....	84
3. Conclusion	86
Chapitre 4	87
Contrôle visuel : Maîtriser l'Exploration.....	87
1. Les facteurs d'influence en exploration	87
1.1. Facteurs Matériel	88
1.2. Facteurs Milieu	88
1.3. Facteurs Moyen.....	89
1.4. Facteurs Méthode	90
1.5. Facteurs Main d'œuvre.....	91
2. Les actions en exploration.....	93
2.1. Actions Moyen.....	93
2.2. Actions Méthode	98
2.3. Actions Main d'œuvre.....	102
2.3.1. Mémoire et Exploration visuelle	103
2.3.2. Mémoire et Apprentissage	103
3. Recommandations pour améliorer la performance de l'exploration.....	104
3.1. Recommandations Moyen	104
3.1.1. Poste de contrôle.....	104
3.1.2. Système d'éclairage.....	105
3.2. Recommandations Méthode.....	106
3.3. Recommandations Main d'œuvre	107
4. Application	109

4.1.	Application Moyen	109
4.2.	Application Méthode	110
4.2.1.	Eudica.....	112
4.2.2.	S.T. Dupont	113
4.3.	Application Main d'œuvre.....	113
5.	Conclusion	115
	Chapitre 5	117
	Contrôle visuel : Maîtriser l'Évaluation/Décision.....	117
1.	Le choix des attributs	118
1.1.	Condition à remplir – Test de classement par rang.....	119
1.1.1.	Conditions du test.....	119
1.1.2.	Coefficient de concordance de Kendall W.....	120
1.2.	Comment choisir les attributs d'évaluation	122
1.2.1.	Première étape.....	123
1.2.2.	Deuxième étape.....	123
1.2.3.	Troisième étape.....	123
1.2.4.	Quatrième étape.....	123
2.	Construction du standard écrit	126
2.1.	Corrélation linéaire	126
2.2.	Réseau de neurones.....	129
2.2.1.	Principes de fonctionnement	129
2.2.2.	Application du réseau de neurones au contrôle visuel.....	130
3.	Vérification de la capacité d'évaluation.....	133
4.	Application	137
4.1.	Contrôle visuel avec objectif technique.....	137
4.2.	Contrôle visuel avec un objectif esthétique.....	139
5.	Conclusion	144
	Conclusion Générale.....	145
	Bilan et Perspectives	145
1.	Bilan Global de la thèse	145
2.	Les perspectives de la recherche.....	147

2.1. Sur le travail réalisé.....	147
2.2. Dans le prolongement du travail réalisé	149
Références bibliographiques.....	151
Annexe 1	163
Projet Interreg IV France – Suisse.....	163
1. Les participants.....	163
2. Descriptif résumé du projet	164
2.1. Les actions.....	164
2.2. Résultats attendus.....	164
2.3. Les Moyens	165
Annexe 2	167
Les partenaires Industriels.....	167
1. Eudica	167
2. NTN-SNR Roulements	170
3. Fournier	172
4. S.T. Dupont.....	174
Annexe 3	177
Module de Formation au Contrôle Visuel – Exploration Fournier	177
Annexe 4	187
Réseaux de Neurones.....	187
1. Les modèles d’apprentissage.....	187
2. Mode supervisé	188
3. Algorithme de rétro-propagation	193
Annexe 5	195
Réseau de Neurones Données – S.T. Dupont.....	195
1. Création du modèle de corrélation	195
2. Test du modèle	199

TABLE DES FIGURES

Figure 1.1 Les deux facettes de la qualité [Rolland 03].....	14
Figure 1.2 Le Quadrant de la Qualité [Oude Ophuis 95].....	16
Figure 1.3 Modèle du processus de perception de la qualité [Steenkamp 89].....	16
Figure 1.4 Écart de perception [Giordano 06].....	18
Figure 1.5 Niveau de qualité perçue et niveau de prix [Giordano 06].....	18
Figure 1.6 Diagramme de Kano [Duret 03].....	19
Figure 1.7 Fonction psychométrique [Bagot 99].....	21
Figure 1.8 Processus de perception selon Von Helmholtz.....	22
Figure 1.9 Exemples de défaillance de la perception [Bagot 99].....	23
Figure 1.10 Processus de perception - Théorie des hypothèses.....	23
Figure 1.11 Schéma illustrant la perception dans l'approche écologique [Luyat 09].....	24
Figure 1.12 Notion de niveau de traitement pour la perception visuelle [Bagot 99].....	25
Figure 1.13 L'œil.....	26
Figure 1.14 Le cerveau dans le contexte du système visuel [Lieury 11].....	27
Figure 1.15 Exemple de saccades et fixation, dans la lecture [O'Regan 78].....	28
Figure 1.16 Sensibilité à la longueur d'onde [Bagot 99].....	29
Figure 1.17 Courbe d'adaptation à l'obscurité [Bonnet 03].....	29
Figure 1.18 Renforcement de contraste [Bagot 99].....	31
Figure 1.19 Exemple de ségrégation figure-fond.....	32
Figure 1.20 Le vase de Rubin.....	33
Figure 1.21 Deux exemples de la loi de la bonne forme [Rookes 00].....	34
Figure 1.22 Deux exemples de la loi de bonne continuité (a. [Goddefroid 01], b [Bagot 99]) ...	34

Figure 1.23 Deux exemples de la loi de proximité [Lieuury 11]	35
Figure 1.24 Deux exemples de la loi de similitude [Rookes 00]	35
Figure 1.25 Deux exemples de la loi de clôture [Weil-Barais 05].....	35
Figure 1.26 Exemples de « géons » et d'objets construits à partir de ces géons [Bagot 99].....	36
Figure 2.1 Contrôle visuel d'une soudures.....	45
Figure 2.2 Un exemple de panoplie pour le contrôle visuel d'un stylo	45
Figure 2.3 Un exemple de photographie illustrant les défauts sur une jonction sur un tube en inox	46
Figure 2.4 Un exemple d'écart par rapport à la référence (Source Fournier)	50
Figure 2.5 Un exemple d'écarts par rapport aux intentions du concepteur [Forslund 09]	50
Figure 2.6 Deux exemples d'écart local.....	50
Figure 2.7 La même anomalie dans différentes situations [Baudet 12].....	52
Figure 2.8 Perception de l'anomalie par le contrôleur.....	55
Figure 2.9 Les trois effets lumière [Baudet 12]	56
Figure 2.10 Loi de similitude	58
Figure 2.11 Perception de l'anomalie dans le cas d'objets similaires	59
Figure 2.12 Perception de l'anomalie dans le cas d'objets non similaires	59
Figure 2.13 Loi de proximité.....	59
Figure 2.14 Perception de l'anomalie selon la loi de proximité.....	60
Figure 2.15 Loi de la bonne continuité	60
Figure 2.16 Perception d'une anomalie selon la loi de bonne continuité.....	60
Figure 2.17 Loi de clôture	61
Figure 2.18 Perception de l'anomalie selon la loi de la clôture	61
Figure 2.19 Le contraste de couleur dans la perception - Loi de similitude	62
Figure 2.20 Grille arborescence pour une anomalie de type « Marque » [Guerra 08]	65
Figure 3.1 Modèle de contrôle visuel [Rebsamen 10]	72
Figure 3.2 Modèle général du contrôle visuel avec un objectif esthétique	73
Figure 4.1 Primitives et phase pré-attentive [Treisman 85]	99
Figure 4.2 Détection - Phase pré-attentive	99
Figure 4.3 Phase pré-attentive - Présence de plusieurs textures (adapté de [Treisman 85])	100

Figure 4.4 Détection - conjonction de primitives (adapté de [Treisman 85]).....	100
Figure 4.5 Deux stratégies d'exploration.....	102
Figure 4.6 Exemples de parcours des yeux.....	107
Figure 4.7 Exemples de mouvement angulaire	107
Figure 4.8 Mode opératoire - EUDICA.....	112
Figure 4.9 Procédure d'exploration - S.T. DUPONT	114
Figure 5.1 De l'exploration à l'évaluation.....	118
Figure 5.2 Base de construction du standard écrit	119
Figure 5.3 Développement du profil sensoriel adapté au contrôle visuel (adapté [ISO 03a]) ..	122
Figure 5.4 Rapport entre les attributs et la décision.....	124
Figure 5.5 Exemple de questionnaire (rempli) pour la génération de mots utilisés par les sujets lors du contrôle visuel (adapté de [Depledt 09]).....	125
Figure 5.6 Démarche de décision réalisée par les experts	126
Figure 5.7 Grille d'évaluation hiérarchique corrigée.....	127
Figure 5.8 Chemin de perception-évaluation de l'anomalie	128
Figure 5.9 Analogie entre un réseau de neurones biologiques et un réseau de neurones artificiel (adapté de [Younes 10]).....	130
Figure 5.10 Réseau de neurone - contrôle visuel [Baudet 12].....	131
Figure 5.11 Réseau de neurone.....	131
Figure 5.12 Mode opératoire - EUDICA.....	138
Figure 5.13 Nouvelle spécification pour les surfaces non-fonctionnelles - NTN-SNR Roulements.....	140
Figure 5.14 Nouvelle spécification pour les surfaces fonctionnelles - NTN-SNR Roulements	140
Figure 5.15 Grille d'évaluation hiérarchique corrigée - FOURNIER	141
Figure A2.1 Les anomalies à détecter par le contrôle visuel (objectif technique) - EUDICA .	167
Figure A2.2 Les anomalies à détecter par le contrôle visuel (objectif esthétique) - EUDICA .	168
Figure A2.3 Exemple d'un modèle de mode opératoire - EUDICA.....	169
Figure A2.4 Exemple d'anomalies de surface - SNR-NTN Roulements.....	170
Figure A2.5 Exemple d'une spécification - NTN-SNR Roulements.....	171
Figure A2.6 Exemples d'anomalies - FOURNIER.....	172

Figure A2.7 Fiche d'instructions - FOURNIER.....	173
Figure A2.8 Exemple de pièces arrêtées lors de l'audit	174
Figure A2.9 Exemples d'anomalies - S.T. DUPONT.....	175
Figure A4.1 Exemple d'un réseau de neurones	187
Figure A4.2 Fonction Heaviside	189
Figure A4.3 Fonction sigmoïde ($k=5$)	189

« Quand un client achète une chose, il en achète deux : premièrement, celle qu'il croit avoir achetée, deuxièmement celle que réellement on lui a vendue » (Quino)

*« Les perceptions des sens et les jugements de l'esprit sont des sources d'illusion et des causes d'incertitude. »
(Anatole France)*

INTRODUCTION

1. PROBLÉMATIQUE ET DÉMARCHE

On définit souvent la qualité d'un produit comme son aptitude à répondre aux attentes des clients. Si cette interprétation est généralement bien partagée et résume à elle seule des années d'évolution de la qualité, la question qui se pose désormais est plutôt de savoir ce que l'on doit entendre par "attentes des clients". Là encore, sur cette question, c'est toute une évolution de la qualité qui est en train de s'opérer. Ces attentes ont été longtemps axées sur les fonctionnalités principales à remplir par le produit. Désormais, le client intègre dans ses attentes d'autres éléments comme, par exemple, celles de disposer d'un produit incluant d'autres fonctionnalités que celles de base, celle d'avoir accès à un ensemble de services disponibles après l'acquisition du produit, ou encore celle de disposer d'un produit à l'aspect irréprochable.

Aujourd'hui, non seulement, les attentes des clients deviennent de plus en plus exigeantes, mais les satisfaire ne suffit même plus à garantir à l'entreprise que le client fera l'acquisition du produit. Bien plus que ses attentes, ce sont les perceptions du client qui sont déterminantes dans son choix. Dit autrement, tout l'enjeu pour l'entreprise est de passer d'une recherche de l'obtention d'une qualité attendue à celle d'une qualité perçue.

Dans ce contexte, l'aspect du produit, nous venons de l'évoquer, joue un rôle déterminant. On comprend que cela soit déjà le cas pour des entreprises dont les produits ont vocation à répondre à des qualités autant techniques qu'esthétiques, comme les entreprises horlogères par exemple. C'est en revanche plus inhabituel pour d'autres types d'entreprises. Le client attend par exemple d'un roulement de NTN-SNR Roulements qu'il réponde techniquement aux spécifications d'utilisation définies, mais ce client attend également que ce roulement ait un "bel" aspect. L'explication à cette attente est parfois simple. La perception d'un aspect irréprochable est le gage d'une qualité technique irréprochable.

La recherche d'une qualité perçue pose cependant bien des problèmes. Contrairement à une qualité attendue qui peut être évaluée, du moins en partie, sur des critères objectifs, la qualité perçue l'est bien souvent sur des critères, du moins en grande partie, très subjectifs.

Nos travaux, et plus globalement, ceux menés du projet INTERREG IV dans lequel nos travaux se sont inscrits (le descriptif du projet et donné dans l'Annexe 1), visent à apporter des contributions dans le domaine de la qualité perçue, et plus précisément, dans le contrôle d'aspect des surfaces d'un produit. Comment l'entreprise peut-elle s'assurer que l'aspect d'un produit est satisfaisant, i.e. que la qualité qui sera perçue par le client est satisfaisante ?

La maîtrise de la qualité passe par la mesure. Concernant la qualité de la surface d'un produit, cette mesure reste souvent manuelle, faute de pouvoir automatiser cette tâche très complexe. Le contrôle visuel d'aspect a ainsi une part importante parmi l'ensemble de tous les contrôles dans de très nombreuses entreprises. Bien que le coût de ce type de contrôle soit très important pour des résultats obtenus très variables d'un contrôleur à l'autre, le contrôle d'aspect des produits par une inspection humaine a été assez peu étudié de manière académique.

Pourtant, ce contrôle visuel d'aspect pose plusieurs questions qui sont à la base du travail de recherche présenté dans ce document.

On peut dès à présent comprendre qu'il n'existe pas de produit exempt de toute anomalie d'aspect, puisqu'à un niveau de grossissement donné, il est toujours possible de détecter un écart par rapport à une surface idéale. Qu'est-ce qu'une anomalie d'aspect, comment la décrire pour que le contrôleur puisse bien comprendre ce qu'il doit contrôler ?

Un contrôle visuel suppose ensuite, c'est une étape incontournable, d'être capable de détecter ces anomalies. Quelles sont les conditions à retenir pour détecter efficacement une anomalie d'aspect ? Comment l'entreprise peut-elle maîtriser cette étape d'exploration du produit ?

Toute anomalie détectée n'est pas nécessairement un défaut. Deux anomalies identiques par exemple, présentes à deux endroits différents sur le produit, n'auront pas nécessairement le même impact sur la perception qu'aura le client de ce produit. Comment évaluer une anomalie en prenant en compte son impact sur la qualité perçue par le client ?

Enfin, en prenant en compte ces différents paramètres, comment construire une approche globale du contrôle visuel des produits capable de réduire la variabilité de jugement entre les différents acteurs ?

2. LA DÉMARCHE DE LA RECHERCHE

Pour apporter des éléments de réponse à ces questions, notre démarche de recherche s'est appuyée sur deux approches complémentaires et menées en parallèle :

- une approche académique touchant des disciplines aussi variées que la qualité, le marketing ou encore la psychologie, ces disciplines ayant en commun de s'intéresser à la problématique de la perception.
- une approche expérimentale menée dans des entreprises dont les produits sont très différents, ces entreprises ayant en commun l'objectif d'améliorer le contrôle visuel de leurs produits.

L'approche expérimentale a été facilitée par notre participation au projet INTERREG IV réalisé en collaboration avec l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) et 10 entreprises françaises et suisses. Ces entreprises ont fourni un terrain d'expérimentation très large, autant du côté de la variété des produits à contrôler que celui de la variété des types d'anomalies à détecter.

L'approche académique partait de l'expertise du laboratoire SYMME dans le domaine. Une première thèse sur le sujet avait été soutenue en 2008 [Guerra 08]. Nos travaux se sont également utilement inspirés des travaux d'analyse sensorielle dans d'autres secteurs industriels comme l'alimentaire, ainsi que des travaux réalisés sur les théories sur l'interprétation des signes, comme la théorie de Gestalt par exemple.

La démarche de recherche a suivi une boucle itérative partant de l'observation du terrain industriel et passant successivement par la conceptualisation, la formalisation et la création d'outils, l'expérimentation et l'évaluation. Cette boucle itérative appliquée sur différents domaines d'activités nous a permis d'évaluer la robustesse, dans différents secteurs industriels, de nos propositions. L'objectif de nos travaux, associé à ces deux approches, était de tirer des enseignements conceptuels et pratiques pour aboutir à la proposition d'une méthode de contrôle visuel d'aspect qui soit générique, robuste et adaptable à tout type de produits.

3. STRUCTURATION DU DOCUMENT

Pour présenter nos travaux, nous avons structuré ce mémoire en cinq chapitres.

La notion de "qualité perçue" correspond, nous l'avons dit, à une évolution importante de la qualité et se positionne dans le prolongement de "qualité attendue". Le premier chapitre vise à situer plus précisément la qualité perçue par rapport aux approches, dimensions et types de qualité proposés jusqu'à présent. Pour mieux comprendre ce qu'est une qualité perçue, nous résumons ensuite plusieurs approches qui ont été proposées en psychologie pour décrire et/ou modéliser le processus de perception. Nos travaux portant sur le contrôle visuel d'aspect, nous terminons par une présentation des mécanismes de notre système visuel avec l'objectif de montrer ce que ce système est en capacité de percevoir.

C'est à partir de sa perception visuelle qu'un contrôleur effectue un contrôle d'aspect des produits. Le chapitre 2 est donc axé sur le contrôle visuel avec une présentation des différents objectifs associés à ce contrôle et les pratiques utilisées par les entreprises pour le réaliser. Nous décrivons le contrôle visuel avec un objectif esthétique en listant d'abord les types d'écarts qu'un contrôleur est susceptible de détecter et qui sont à l'origine d'une anomalie d'aspect. Nous montrons ensuite comment l'analyse sensorielle peut être utilisée pour identifier et caractériser toute anomalie. Nous listons pour cela un ensemble d'attributs pouvant caractériser une anomalie tout en prenant en compte, nous l'avons évoqué plus haut, l'impact visuel de

l'anomalie sur la perception que pourra en avoir le client. Nous terminons par une présentation des standards écrits qui peuvent être utilisés par le contrôleur lorsqu'il effectue cette caractérisation.

Le chapitre 3 vise à proposer un cadre méthodologique général pour la mise en place et la maîtrise d'un contrôle visuel. Nous détaillons pour cela l'ensemble des actions d'un contrôle visuel en les positionnant par rapport aux trois étapes suivies par le contrôleur : exploration, évaluation et décision. Nous décrivons ensuite comment mesurer l'efficacité d'un contrôle visuel et comment l'entreprise peut décider des premières actions spécifiques à mener pour augmenter cette efficacité.

L'étape d'exploration est la première étape d'un contrôle visuel, une étape déterminante si l'on considère que les étapes d'évaluation et de décision ne s'appliquent que si, au préalable, une anomalie a été détectée. Le chapitre 4 a pour objectif d'étudier comment une entreprise peut parvenir à maîtriser au mieux cette étape. Nous listons d'abord les facteurs qui ont une influence sur l'exploration. Nous détaillons ensuite les actions liées à la maîtrise des facteurs liés à la Méthode, au Moyen et à la Main d'œuvre. Nous terminons par la proposition d'un ensemble de recommandations contribuant à minimiser l'influence de ces facteurs et nous montrons comment elles ont été appliquées dans les entreprises EUDICA, FOURNIER et S.T. DUPONT.

Le chapitre 5 présente une formalisation des étapes d'évaluation et de décision d'un contrôle visuel avec un objectif esthétique. Nous décrivons ainsi un type de standard écrit, la grille hiérarchique corrigée, pouvant accompagner les contrôleurs dans la réalisation de ces étapes et nous détaillons comment construire ce standard. Nous décrivons également comment s'assurer de la performance en évaluation des contrôleurs utilisant cette grille. Nous montrons enfin comment l'approche de formalisation que nous avons proposée a été appliquée dans les entreprises EUDICA, S.T. DUPONT, FOURNIER et NTN-SNR Roulements.

Nous terminons enfin par un bilan sur les résultats obtenus et évoquons quelques pistes de recherche possibles pour prolonger ces résultats.

CHAPITRE 1

QUALITÉ PERÇUE ET PERCEPTION

La notion de "qualité perçue" occupe aujourd'hui une place de plus en plus importante dans la maîtrise de la qualité des produits. Avec le rappel de quelques définitions de la qualité, nous montrons d'abord comment la qualité perçue se positionne parmi ces définitions.

La qualité perçue est le résultat d'une "perception". Nous résumons quelques approches ou théories, principalement développées en psychologie, qui ont étudié et décrit comment une perception s'effectue.

Nous nous intéressons ensuite plus spécifiquement à la perception visuelle. Nous détaillons d'abord les principaux éléments qui constituent notre œil, ainsi que les mécanismes utilisés par notre système visuel pour élaborer sa perception. Nous décrivons enfin ce que notre système visuel est en mesure de percevoir.

1. DE QUALITÉ À QUALITÉ PERÇUE

1.1. LA QUALITÉ

La qualité est un terme abstrait qui, encore aujourd'hui, est difficile à définir.

Certains décrivent par exemple la qualité comme une supériorité ou une excellence, d'autres comme une absence de défauts de fabrication, d'autres encore la relient à ensemble des caractéristiques d'un produit, techniques ou économiques, à obtenir.

Une enquête¹, menée en 2009 auprès de 86 industriels américains, illustre bien cette difficulté à définir de manière précise ce qu'est la qualité. L'enquête délivrait en effet des définitions très différentes avec des termes aussi différents que :

- Perfection
- Consistance
- Élimination de gaspillages

¹ <http://www.scribd.com/adammulmi/d/13926561-Quality-Concepts>

- Rapidité de livraison
- Application et respect des procédures
- Réalisation d'un « bon » produit
- « Faire bon » du premier coup
- Rendre satisfait le client
- Rendre content le client et lui plaire
- Obtenir un bon service client et sa satisfaction

Cette définition est d'autant plus difficile à obtenir que la qualité s'applique à des domaines très variés dont les préoccupations peuvent s'avérer complètement différentes. À titre d'exemple, à la question de savoir sur ce qui doit obligatoirement figurer dans cette définition, une banque citera la qualité du service, un hôpital la qualité des soins, un restaurant la satisfaction de ses clients et une entreprise manufacturière la qualité d'un produit. Disons, pour simplifier, que la qualité peut aussi bien couvrir, séparément ou ensemble, une dimension technique (des caractéristiques à obtenir pour le produit), une dimension humaine (la satisfaction des clients à garantir) et une dimension économique (des coûts à minimiser ou à réduire).

Mieux définir la qualité semble cependant essentiel si l'on veut pouvoir être en situation de la mesurer et de l'évaluer.

Pour y parvenir, une autre approche simple consiste à faire la distinction entre deux types de qualité : une qualité orientée vers la recherche d'améliorations en interne (par exemple, rechercher une meilleure productivité, une standardisation des pratiques, la réduction des gaspillages, etc.) et une qualité orientée vers la recherche d'améliorations en externe (par exemple, une meilleure satisfaction des clients, une fidélisation des clients, etc.).

Dans le premier cas, la qualité se réfère principalement au produit ou service fourni, la qualité consistant à se distinguer qualitativement et quantitativement sur l'un des attributs requis pour ce produit ou service.

Dans le deuxième cas, la qualité se réfère principalement à l'utilisateur (l'utilisateur ou le client) du produit ou du service fourni, la qualité consistant à satisfaire du mieux possible ses besoins, ses attentes ou ses préférences.

Mais, le plus souvent, les définitions de la qualité proposées intègrent les deux approches :

“Quality is the total product and service characteristics of marketing, engineering, manufacturing and maintenance through which the product and service in use will meet the expectation of the customer.”
[Feigenbaum 83]

“...the totality of features and characteristics of a product or service that bears on its ability to satisfy a given need.” [IEEE 83]

De son côté, la norme ISO a fait évoluer la définition de la qualité pour prendre en compte la manière dont elle s'est transformée dans l'entreprise :

« ...l'aptitude d'un produit ou d'un service à satisfaire, au moindre coût et dans les moindres délais les besoins des utilisateurs » [ISO 82]

« ...l'ensemble des propriétés et caractéristiques d'un produit ou d'un service qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés ou implicite » [ISO 87]

« ...l'ensemble des caractéristiques d'une entité qui lui confère l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés et implicites » [ISO 94b]

« ... l'aptitude d'un ensemble de caractéristiques intrinsèques à satisfaire des exigences » [ISO 00b]

Avec cette évolution, deux types d'application de la qualité se sont développés, le contrôle qualité et l'assurance qualité. Le premier type définit la qualité comme une conformité aux spécifications. Le second type met quant à lui en avant la maîtrise et l'optimisation des processus (notamment dans les normes ISO 9000 : 2000, ISO 9001 : 2000, ISO 9004 : 2000, ISO 19011) [ISO 00b] [ISO 00a] [ISO 00c] [ISO 11b]. Même différents, l'assurance qualité rendant en théorie inutile le contrôle qualité, ces deux types d'application de la qualité ont en commun de privilégier l'approche utilisateur dans la définition de la qualité.

Si l'on examine encore plus en détail les définitions proposées dans la littérature, elles émanent en fait de courants de pensées présents dans quatre disciplines : philosophie, marketing, économie et gestion opérationnelle. Garvin, dans son livre *Managing Quality* [Garvin 88], citait déjà les cinq approches possibles de la qualité utilisées dans ces disciplines et à partir desquelles des définitions ont été proposées jusqu'à maintenant : une approche transcendante (philosophie), une approche axée sur le produit (économie), une approche axée sur l'utilisateur (marketing et gestion opérationnelle), une approche axée sur la production ou une approche axée sur la valeur ajoutée (gestion opérationnelle).

*** Approche 1 : Vue transcendante de la qualité**

Ceux qui partagent cette approche disent ne pas être capables de définir la qualité, mais en revanche être capables de savoir quand elle est présente. Le terme de qualité renvoie pour eux à une idée « d'excellence », à une notion absolue et universellement identifiable. C'est une propriété du produit (ou du service) que l'on peut apprendre à reconnaître seulement à travers l'expérience que nous avons de ce produit (ou de ce service). Cette propriété est souvent sujette à une appréciation très subjective.

"Quality is neither mind nor matter, but a third entity independent of the two... Even through Quality cannot be defined, you know what it is." [Pirsig 74]

"...a condition of excellence implying fine quality as distinct from poor quality... Quality is achieving or reaching for the highest standard as against being satisfied with the sloppy or fraudulent." [Tuchman 80]

* *Approche 2 : Produit*

Dans les définitions basées sur cette approche, la qualité est vue comme une variable précise et mesurable. Elle peut s'apprécier en fonction de la quantité d'ingrédients ou d'attributs que possède le produit par rapport au nombre désiré et attendu. La qualité peut ainsi être évaluée de manière objective.

"Differences in quality amount to differences in the quality of some desired ingredient or attribute."
[Abbott 55]

"Quality refers to the amounts of the unpriced attributes contained in each unit of the priced attribute."
[Leffler 82]

* *Approche 3 : Utilisateur*

Avec cette approche, la qualité est définie comme l'aptitude du produit à répondre au mieux aux préférences et aux attentes des utilisateurs. Ces préférences pouvant varier significativement, cette approche de la qualité peut induire deux stratégies différentes pour l'entreprise : s'orienter vers un marché de niche où sont privilégiés les produits possédant des attributs répondant parfaitement à un nombre réduit de clients, ou s'orienter vers un marché plus large où sont privilégiés les produits possédant des attributs qui satisfont les attentes d'un plus grand nombre de clients.

"Quality consists of the capacity to satisfy wants." [Edwards 68]

"Quality is the degree to which a specific product satisfies the wants of a specific consumer." [Gilmore 74]

"Quality is any aspect of a product, including the services included in the contract of sales, which influences the demand curve." [Dorfman 54]

"In the final analysis of the marketplace, the quality of a product depends on how well it fits patterns of consumer preferences." [Kuehn 62]

"Quality consists of the extent to which a specimen a product-brand-model-seller combination possesses the service characteristics you desire." [Terleckyj 76]

"Quality is fitness for use." [Juran 74]

"The core of a total quality approach is to identify and meet the requirements of both internal and external customers." [Oakland 89]

* *Approche 4 : Production*

Les définitions proposées avec cette approche concernent principalement les pratiques utilisées en production et/ou en industrialisation. Elles ont généralement en commun de faire référence à la conformité du produit, ou du service, par rapport aux spécifications qui ont été définies. Basée sur l'idée que toute dérive par rapport à ces spécifications induit une réduction de la qualité, ce n'est pas tant l'excellence en production qui est recherchée mais plutôt un rapprochement par rapport aux standards définis par l'entreprise. Le plus souvent,

l'accent est mis sur la fiabilité de la conception et de la production avec un objectif de réduction des coûts et avec la recherche d'un "bon du premier coup".

"Quality is the degree to which a specific product conforms to a design or specification" [Gilmore 74]

"Quality means conformance to requirements." [Crosby 79]

"Quality is the degree to which a specific product conforms to a design or specification" [Feigenbaum 83]

*** Approche 5 : Valeur**

Avec cette approche, la qualité est le plus souvent définie en termes de coût et de prix. Le principe mis en avant par cette approche est qu'un produit de bonne qualité est, d'une part, un produit performant à un prix acceptable et, d'autre part, un produit conforme aux spécifications définies à un coût acceptable.

"Quality is the degree of excellence at an acceptable price and the control of variability at an acceptable cost." [Broh 82]

"Quality is to satisfy customers' requirements continually; TQM is to achieve quality at low cost by involving everyone's daily commitment." [Kanji 90]

La Tableau 1.1, proposée par Hunt (1992), résume ces cinq approches en donnant pour chacune d'elles comment pourrait être définie la qualité [Hunt 92].

Tableau 1.1 Plusieurs définitions de la qualité [Hunt 92]

Approche de la qualité	Définition de la qualité
1. Transcendantale	Pas de définition possible, mais la qualité est identifiée avec l'expérience que l'on a du produit ou du service
2. Client	Aptitude à l'usage, qui colle aux attentes des clients
3. Production	Conformité à la conception, aux spécifications ou contraintes. Produit ne présentant pas de défauts.
4. Produit	La qualité d'un produit s'apprécie à travers l'absence ou la présence d'attributs qu'il possède
5. Valeur	Bon rapport performance/prix et bon rapport conformité/coût

La qualité se réfère, nous l'avons dit, à un produit ou à un service. En lien avec ces cinq approches, et pour aider encore à mieux définir ce qu'est la qualité, Garvin (1984) liste également les huit dimensions possibles de la qualité d'un produit : performance, caractéristiques, fiabilité, conformité, durabilité, service, esthétique et qualité perçue [Garvin 84].

*** Dimension 1 : Performance**

Elle se réfère aux fonctionnalités de base que le produit est censé assurer, ainsi qu'aux caractéristiques techniques qu'il doit comporter (par exemple, la consommation moyenne pour une automobile).

* ***Dimension 2 : Fonctionnalités secondaires***

Ce sont les fonctionnalités (“*the bells and whistles of the product*”) qui complètent les fonctionnalités de base du produit (par exemple, l'aide à la navigation pour une automobile).

* ***Dimension 3 : Fiabilité***

Elle reflète la probabilité que le produit rencontre une défaillance sur une période spécifiée ou, dit autrement, la capacité du produit à fonctionner correctement sur sa durée d'utilisation définie. Le temps moyen avant la première panne (*Mean Time To First Failure*) et le temps moyen entre deux pannes (*Mean Time Between Failures*) sont les mesures classiquement utilisées pour cette dimension de la qualité du produit.

* ***Dimension 4 : Conformité***

Elle se réfère à la distance qui sépare les caractéristiques techniques et le design du produit des spécifications préétablies. Elle inclut des éléments internes à l'entreprise et des éléments externes. En interne, la conformité est fréquemment mesurée en évaluant le nombre de produits respectant les spécifications et le nombre de ceux nécessitant une action corrective ou une reprise. En externe, elle est mesurée, par exemple, par le nombre de réparations effectuées sur la période de garantie.

* ***Dimension 5 : Durée de vie***

Elle se réfère, sous l'aspect technique, à la durée de vie du produit jusqu'à sa détérioration physique et définitive (réparation impossible) et, pour l'aspect économique, jusqu'à ce qu'il soit remplacé par un produit économiquement plus intéressant pour le client (réparation possible). La durée de vie est associée à la fiabilité du produit (un produit, qui rencontre fréquemment une défaillance, a une durée de vie faible).

* ***Dimension 6 : Service***

Elle se réfère à la vitesse d'exécution, à la réactivité et à la compétence du service en charge de la maintenance du produit. Elle inclut aussi bien des mesures objectives (durée moyenne d'une réparation) que des mesures subjectives (satisfaction du client par rapport à sa demande d'intervention suite à une défaillance).

* ***Dimension 7 : Esthétique***

Elle se réfère à la manière dont l'utilisateur voit, touche, sent ou entend le produit au moment de son choix. Dans cette dimension, la qualité est ainsi vue comme la combinaison des attributs sensoriels qui collent au mieux aux préférences de l'utilisateur.

* ***Dimension 8 : Perception***

Elle se réfère à la manière dont l'utilisateur perçoit le produit durant son utilisation. Elle se distingue de la dimension précédente par le fait qu'elle ne peut s'apprécier qu'après que l'utilisateur ait eu une expérience de ce produit.

Le Tableau 1.2 résume chaque dimension en donnant sa définition, ainsi que des exemples de mesures qui peuvent lui être associées.

Le même type de décomposition en plusieurs dimensions a également été proposé pour la qualité d'un service par Garvin [Garvin 84]. Le Tableau 1.3 résume ces dimensions.

Tableau 1.2 Les 8 dimensions de la qualité d'un produit (adapté de [Garvin 84])

Dimension	Définition	Exemples de mesures
1. Performance	Les caractéristiques opérationnelles du produit qui lui permettent d'assurer ses fonctionnalités de base	Délai, coût, qualité de fabrication
2. Fonctions secondaires	Les caractéristiques du produit qui complètent ses fonctionnalités de base	Attrait du produit, créativité dans le design
3. Fiabilité	La probabilité que le produit ait une défaillance	Temps moyen entre deux défaillances (MTBF), temps moyen avant l'apparition de la première défaillance (MTTF)
4. Conformité	Le degré avec lequel les caractéristiques opérationnelles ou de design du produit répondent aux spécifications initialement définies	Taux de produits ne répondant pas aux spécifications, nombre de retours clients dans la période de garantie
5. Durabilité	Le temps d'utilisation du produit jusqu'au point à partir duquel son remplacement est préférable à sa réparation	Nombre d'utilisations du produit avant détérioration définitive du produit
6. Service	La vitesse, la compétence et la facilité de réparation	Temps moyen à corriger une défaillance (MTTR)
7. Esthétique	Le look du produit, son odeur, son bruit, sa sensation au toucher	Préférence, jugement personnel
8. Qualité Perçue	L'impact de la marque, de l'image de l'entreprise et de la publicité	Réputation de l'entreprise, image du produit

Tableau 1.3 Les 5 dimensions de la qualité d'un service (adapté de [Garvin 84])

Dimension	Définition
1. Valeurs matérielles	Aspect des équipements, du personnel et des moyens physiques de communication.
2. Fiabilité	Capacité à assurer le service avec précision.
3. Réponse	Capacité à répondre rapidement et efficacement au client
4. Confiance	Connaissances et capacité à rassurer et à inspirer confiance au client
5. Empathie	La société fournit un soin et une attention individualisée à ses clients.

Notons dès à présent que la dimension 7, l'esthétique du produit, fait également référence à une qualité perçue, comme l'indique explicitement la dimension 8. La distinction exprimée par Garvin (1984) entre ces deux dimensions provient de l'instant où cette qualité est perçue, au moment du choix du produit pour la dimension 7 et après une période d'utilisation du produit pour la dimension 8 [Garvin 84].

Notons également, nous y reviendrons plus tard, que ces deux dernières dimensions de la qualité d'un produit sont les moins développées dans la littérature et les moins formalisées dans l'entreprise. Ce constat s'explique par la nature très subjective que prend l'évaluation de ces deux dimensions. Cela nous amène ici à citer la distinction, courante en marketing, qui peut s'opérer entre deux types de qualité [Zeithaml 88] [Evrard 93] :

La qualité objective, ou **qualité réalisée** (celle fondée sur le processus ou le produit), que nous définirons comme le degré de conformité d'un processus ou de son produit par rapport à un ensemble d'attributs prédéterminés par l'entreprise indépendamment de la perception que peut en avoir le client. C'est une qualité qui se mesure à l'aide d'éléments parfaitement quantifiables, comme la performance, la fiabilité, la durabilité, etc. [Mitra 06] [Quattelbaum 12].

La qualité subjective, ou **qualité perçue** (celle fondée sur l'utilisateur), que nous définirons comme le niveau de valeur perçue par l'utilisateur du processus ou de son produit. C'est une qualité qui se mesure à l'aide d'éléments plus difficilement quantifiables, qui comportent des dimensions émotionnelles et affectives du client.

Cette différence peut s'illustrer schématiquement par la Figure 1.1 [Rolland 03].

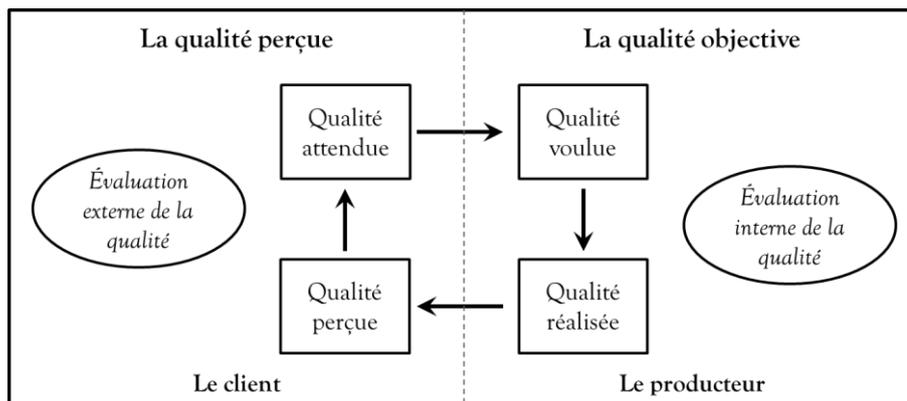


Figure 1.1 Les deux facettes de la qualité [Rolland 03]

Si l'on se limite à la vision produit, la qualité peut donc être définie de manière différente selon l'approche choisie (parmi les 5 possibles), selon la dimension choisie (parmi les 8 possibles) et selon le type de qualité (parmi les 2 possibles). En se basant sur cette distinction, la qualité pourrait ainsi en théorie être définie de 80 façons différentes (5 approches x 8 dimensions x 2 types).

En réalité, chacune des approches tend à privilégier certaines dimensions parmi celles citées. Ainsi l'approche de la qualité basée sur le produit cible plutôt la performance, les fonctions secondaires et la durabilité, l'approche basée sur la production cible plutôt la conformité et la fiabilité et l'approche basée sur l'utilisateur plutôt l'esthétique et la qualité perçue.

Le type de qualité est également très lié à la dimension de la qualité du produit ainsi qu'à l'approche choisie puisque, par exemple, la qualité subjective fait principalement référence à deux dimensions sur les huit possibles de la qualité d'un produit, esthétique et qualité perçue.

Au final, la définition de la qualité peut se construire à partir d'une représentation du type de celle du Tableau 1.4 combinant approches, dimensions et types

Tableau 1.4 Définition schématique de la qualité

Définition de la Qualité		
Approche	Dimension	Type
Transcendantale		
Produit	Performance	Objective (réalisée)
	Fonctions secondaires	
Production	Durabilité	
	Conformité	
Valeur	Fiabilité	
	Durabilité	
Utilisateur	Service	Subjective (perçue)
	Esthétique	
	Qualité Perçue	

Le contrôle qualité induit donc des approches, des dimensions et des types différents de la qualité selon l'objectif défini pour ce contrôle. En ce qui concerne nos travaux, ils ont ciblé plus spécifiquement la qualité avec l'approche client, la dimension esthétique du produit (au sens, de qualité du produit perçue par le client au moment de son acquisition) et la dimension de qualité perçue. Le paragraphe suivant détaille cette notion de « qualité subjective », plus généralement nommée « qualité perçue ».

1.2. QUALITÉ PERÇUE

1.2.1. DÉFINITION

La qualité perçue est déterminante dans la décision d'achat d'un produit par le client. Mais qu'est-ce qu'une qualité perçue ? Plusieurs définitions ont été proposées jusqu'à présent.

En se référant à ce que nous avons décrit précédemment, nous pouvons la définir comme la réunion des deux dimensions subjectives de la qualité proposées par Garvin (les dimensions 7 et 8 du Tableau 1.2) [Garvin 84].

Giordano (2006) la définit comme « *l'ensemble des impressions sensibles et sensorielles, ainsi que des indices qui séduisent et attirent dès le premier regard, interprétés par le client comme une promesse de qualité lui donnant confiance, et qui satisfont à l'utilisation.* » Le client perçoit la qualité comme « *un tout et un rien* », le tout faisant référence aux impressions sur l'ensemble du produit et le rien faisant référence à un détail qui peut gêner [Giordano 06].

Oude Ophuis et Van Trijp (1995) la définissent quant à eux, comme illustré dans la Figure 1.2, selon quatre modalités (les "4 Ps" du quadrant de la qualité). La qualité perçue est le résultat d'une *Perception*, dépend du *Produit*, dépend de la *Personne* qui perçoit, et dépend de la *Position*, i.e. le contexte, dans laquelle cette perception est réalisée [Oude Ophuis 95].

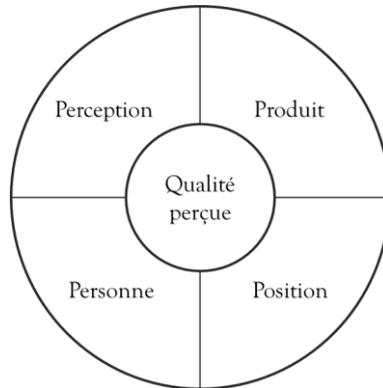


Figure 1.2 Le Quadrant de la Qualité [Oude Ophuis 95].

Retenons de cette définition, que la qualité perçue est avant toute chose le résultat d'une action, la perception. Le paragraphe suivant décrit ce processus.

1.2.2. LE PROCESSUS DE PERCEPTION

Pour aider à mieux comprendre ce qu'est la qualité perçue d'un produit, Steenkamp (1989) a proposé un modèle du processus de perception (Figure 1.3) [Steenkamp 89]. Ce modèle fait référence à deux caractéristiques du produit : les indices de qualité et les attributs de qualité. Les indices de qualité sont donnés par les sens, avant consommation du produit. Ils peuvent être divisés en deux groupes :

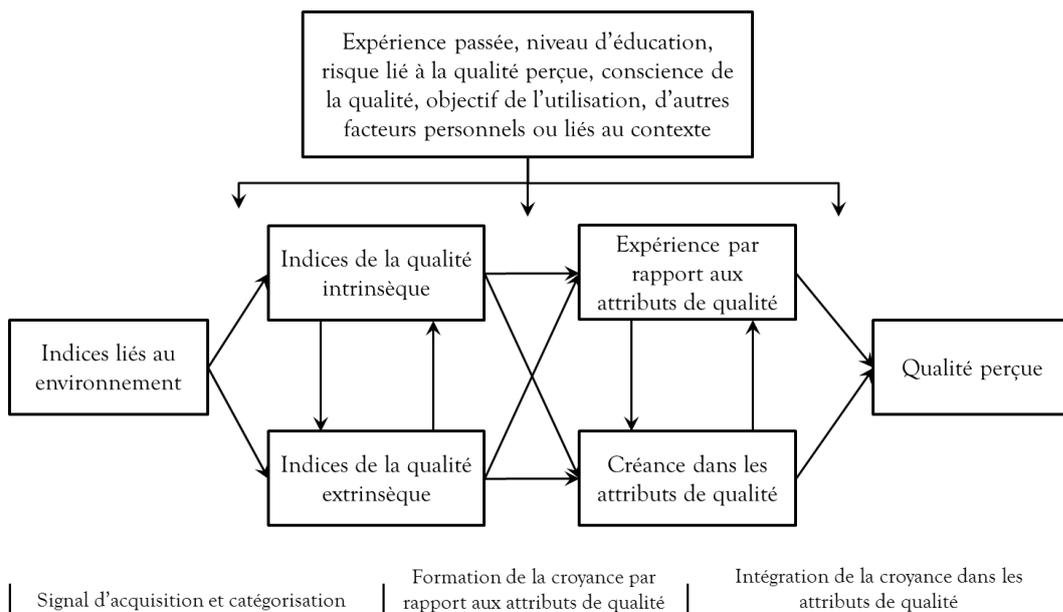


Figure 1.3 Modèle du processus de perception de la qualité [Steenkamp 89]

- Les indices intrinsèques, qui sont liés aux caractéristiques physiques du produit.
- Les indices extrinsèques, qui sont liés à des caractéristiques extérieures au produit, comme sa marque, son prix ou l'image qu'il renvoie.

Les attributs de qualité sont quant à eux les bénéfices apportés par le produit après consommation, ces bénéfices pouvant être influencés par les valeurs personnelles du consommateur. Ils peuvent être impactés par deux facteurs :

- L'expérience, qui est acquise par le consommateur durant la consommation du produit.
- La créance, qui est liée à la désirabilité d'un bénéfice fourni par le produit.

Un processus de perception est ainsi vu comme une interaction entre les indices de qualité (intrinsèques et extrinsèques) et les attributs de qualité (créance et expérience). Ce processus est également influencé par les indices liés à l'environnement, ainsi que par l'expérience et la culture du consommateur.

Ce processus s'active par un contact direct entre le produit et le client, ou un contact indirect (par exemple, le client voit le produit sur une publicité). Lors de ce premier contact, le client développe une première notion de qualité perçue, qui se base sur l'image du produit, sa marque, son prix, etc. Il pourra ensuite confirmer ou infirmer cette notion, avec les indices intrinsèques, après un contact direct avec le produit. À ce stade également, il pourra associer à cette première notion d'autres informations sensorielles et éventuellement une première expérience par rapport à son utilisation. Si cette notion se confirme ou va au-delà de ses attentes, le client pourra passer à l'achat. Le processus se poursuit avec l'expérience du produit que le client va acquérir avec son utilisation. Cette expérience peut selon le cas augmenter ou diminuer la qualité perçue, et cela en fonction de la qualité objective du produit (sa performance durant l'utilisation) et/ou selon la dimension affective que le client porte à ce produit.

Bien évidemment, c'est cette qualité perçue que les entreprises tentent de maîtriser. En effet, la qualité objective d'un produit ne suffit plus à elle-seule à déclencher l'achat. L'enjeu pour l'entreprise est désormais de viser une satisfaction du client qui va bien souvent au-delà de la seule obtention d'une qualité objective du produit mais englobe également une qualité perçue.

1.2.3. SATISFACTION ET QUALITÉ PERÇUE

Mais comment se positionne la qualité perçue dans la satisfaction d'un client ?

Les deux notions sont souvent confondues [Ngobo 97]. Pour Oliver (1981) par exemple, c'est la satisfaction du client, influencée directement par la qualité perçue, qui détermine son achat du produit [Gotlieb 94]. Pour Bagozzi (1992), c'est la qualité perçue, influencée par la satisfaction, qui détermine l'achat. Les deux approches établissent toutes les deux un lien direct entre les deux notions (pour l'un, lorsqu'il y a satisfaction, il y a qualité perçue et, pour l'autre, lorsqu'il y a qualité perçue, il y a satisfaction) [Gotlieb 94].

Pour Giordano (2006) au contraire, la satisfaction du client ne coïncide pas exactement avec la qualité attendue mais s'établit sur un intervalle, comme l'illustre la Figure 1.4, qui sépare la qualité attendue et la qualité perçue [Giordano 06].

$$\text{Satisfaction ou insatisfaction} = \text{Qualité: attendue} - \text{perçue}$$

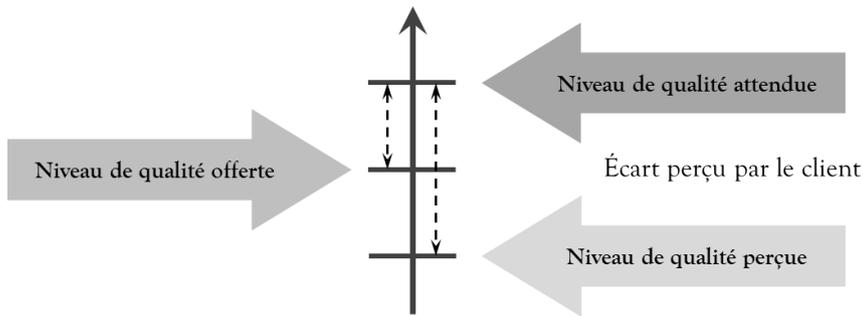


Figure 1.4 Écart de perception [Giordano 06]

En d'autres termes, satisfaire le client ne se limite donc pas à viser, pour un produit, la qualité attendue par ce client, mais c'est également viser une qualité perçue. Aujourd'hui, un produit doit répondre à un niveau minimum de prestations pour être acheté. Giordano (2006) décrit, comme le montre la Figure 1.5, la relation qui s'établit entre le prix de vente du produit et la qualité telle qu'elle sera perçue par le client [Giordano 06].

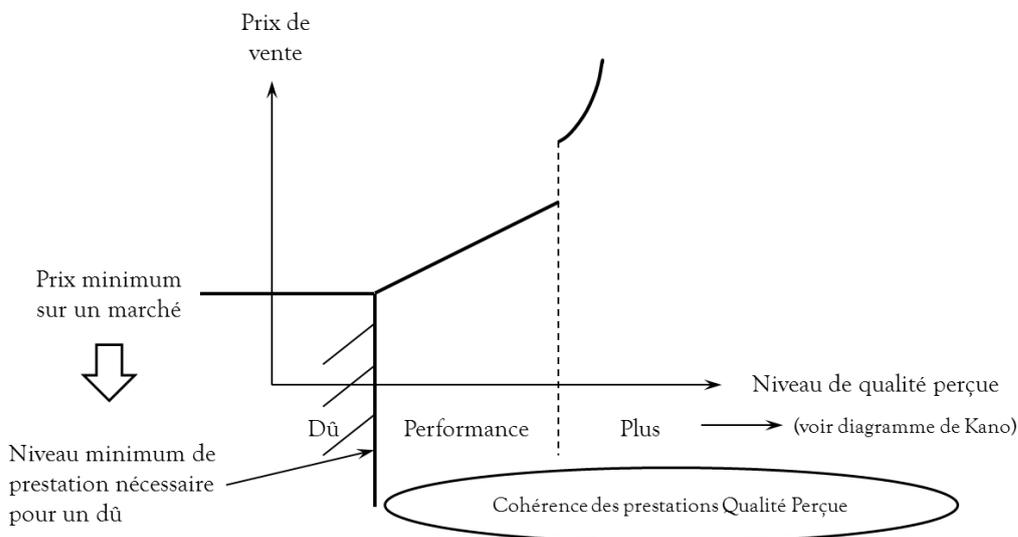


Figure 1.5 Niveau de qualité perçue et niveau de prix [Giordano 06]

Le produit doit donc être proposé pour atteindre le "dû", c'est-à-dire la qualité de base qui couvre les prestations de base attendues par le client. L'entreprise peut ensuite faire le choix d'augmenter le prix de vente de ce produit en augmentant sa performance. Elle passe ainsi d'un produit de niveau moyen à un produit de niveau supérieur avec une augmentation de prix proportionnelle à l'augmentation de la performance. Pour aller encore au-delà de cette qualité,

le client devra s'acquitter d'un prix de vente beaucoup plus élevé et en rupture avec celui d'un produit performant. On retrouve dans cette catégorie les produits d'exception et les produits de luxe dont la qualité va bien au-delà de la qualité de base et de la qualité de performance, et surtout, qui ont un très fort pouvoir de séduction [Duret 03].

En complément, le diagramme de Kano (Figure 1.6) souligne également la relation qui existe entre la réalisation des besoins du client et sa satisfaction. Là encore, cette satisfaction dépasse la qualité de base du produit (la qualité attendue) pour inclure "d'agréables surprises pour le client" (la qualité perçue).

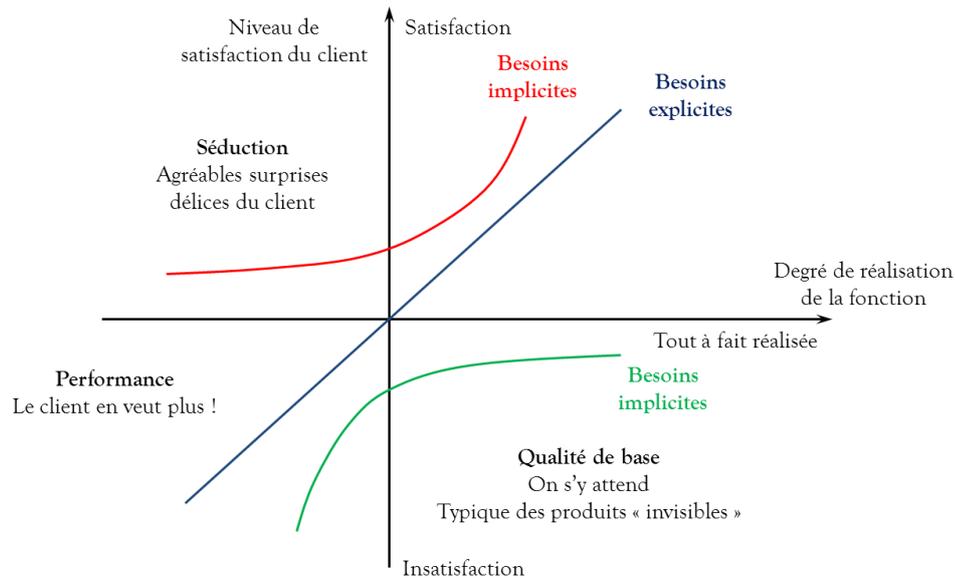


Figure 1.6 Diagramme de Kano [Duret 03]

Atteindre une qualité perçue du produit qui soit élevée nécessite que l'entreprise agisse sur l'ensemble du cycle de réalisation du produit, de sa conception jusqu'à sa livraison, en passant par sa fabrication. Dans nos travaux, nous nous sommes focalisés uniquement sur ce qui peut être fait durant la fabrication du produit.

2. LA PERCEPTION

2.1. FONCTIONNEMENT

La qualité perçue résulte, nous l'avons dit, d'une perception. Mais comment le client perçoit-il le produit ? Comment se déroule son contact avec le produit ?

Le contact entre un individu et un objet se donne grâce aux énergies. Dans l'environnement, il existe plusieurs flux d'énergies : énergie lumineuse, énergie sonore, énergie thermique, énergie mécanique ou énergie chimique. Ces énergies contiennent des informations sur l'environnement [Luyat 09]. Ce sont les récepteurs sensoriels de l'individu qui captent ces énergies.

Ces récepteurs sensoriels sont des cellules, différenciées anatomiquement d'une modalité sensorielle à une autre, et qui ont deux propriétés majeures [Luyat 09] :

- Elles sont spécialisées, elles ne traitent chacune qu'une forme d'énergie.
- Pour un type d'énergie donnée, elles ne sont sensibles qu'à une gamme de valeurs particulières de l'énergie (par exemple, l'œil ne capte que les ondes lumineuses comprises entre 400 et 700 nanomètre).

L'énergie captée par les récepteurs sensoriels est ensuite transmise sous forme d'influx nerveux au cerveau, plus précisément au cortex cérébral, qui renvoie à l'individu les informations contenues dans cette énergie.

Avant d'expliquer comment se déroule la perception, il convient de préciser la différence qui existe entre « *sensation* » et « *perception* ». Bien que très liés, ces deux mots désignent en effet des choses différentes. La sensation est la réponse aux stimuli des récepteurs sensoriels, tandis que la perception est le processus en charge de reconnaître et interpréter la sensation².

Comme le résume le Tableau 1.5, il existe cinq sensations différentes, chacune d'elles étant associée à l'un de nos cinq sens, à un type d'énergie, à un récepteur et à un organe sensoriel spécifique.

Tableau 1.5 Les principales modalités sensorielles [Luyat 09]

Sens	Type d'énergie	Récepteurs	Organe
Toucher	Mécanique	Récepteurs tactiles	Main - Peau
Vision	Électromagnétique	Photorécepteurs (cônes et bâtonnets)	Œil
Audition	Sonore	Cellules ciliées de la cochlée	Oreille
Goût	Chimique	Papilles gustatives	Langue
Odorat	Chimique	Récepteurs olfactifs	Nez

2.2. QUELQUES APPROCHES DE LA PERCEPTION

Pour comprendre comment se déroule la perception, plusieurs approches théoriques ont été proposées, tout particulièrement en psychologie. Nous résumons ici quelques-unes de ces approches en montrant comment chacune d'elles "voit" et décrit la perception.

2.2.1. LA PSYCHOPHYSIQUE

C'est à partir des travaux d'Ernest Heinrich Weber (1795-1878) sur le lien entre l'intensité du stimulus et la force de la sensation que s'est basé Gustav Theodor Gechner pour proposer son

² Il y a certaines informations qui résultent d'un traitement de notre cerveau ne nécessitant pas une représentation consciente. C'est le cas, par exemple, des informations vestibulaires sur l'orientation de notre tête (perception de l'orientation spatiale). Ce type de traitement perceptif ne sera pas évoqué ici.

approche de la psychologie expérimentale, connue également sous le nom de psychophysique [Bagot 99].

La psychophysique est définie comme « *la science exacte des rapports de dépendance fonctionnelle existant entre le corps et l'âme, ou plus généralement, entre les mondes matériel et mental, physique et psychologique, interne et externe* » [Luyat 09].

En psychophysique, toute sensation peut être caractérisée par une ou plusieurs grandeurs subjectives. Il est ainsi possible de quantifier l'intensité d'une sensation, sur une échelle pouvant aller de "inexistante" à "existante" ou, dans certains cas, de "faible" à "forte". Par rapport à la perception, un des apports de la psychophysique concerne la définition des seuils de perception [Bagot 99].

Un seuil perceptif absolu est défini comme « *la plus petite quantité d'énergie susceptible de déclencher une sensation* » [Bagot 99]. Il définit donc l'intensité à partir de laquelle un récepteur sensoriel ressent une stimulation (par exemple, la quantité de sucre nécessaire qui doit être ajoutée à l'eau pour que le goût sucré puisse être ressenti par l'individu).

Le seuil perceptif différentiel est défini comme « *l'augmentation d'intensité minimum du stimulus qui est nécessaire pour provoquer une modification de la sensation* » [Bagot 99]. Il définit donc l'intensité à partir de laquelle une différence entre deux stimulations est ressentie par l'individu (par exemple, quelle quantité de sucre doit être ajoutée à une solution pour que l'individu ressente une différence avec une autre solution).

Pour définir le seuil perceptif absolu, on présente à l'individu plusieurs intensités pour un même stimulus, l'individu devant indiquer à chaque fois s'il perçoit ou non le stimulus. La valeur retenue pour ce seuil sera la valeur de l'intensité du stimulus qui a une chance sur deux d'être perçue, représentant ainsi la limite entre ce qui est perçu et ce qui n'est pas perçu. Les mesures sont ensuite traduites par une fonction, la fonction psychométrique, qui fait la corrélation entre la valeur d'intensité du stimulus et son pourcentage de détection (Figure 1.7) [Luyat 09] [Bagot 99].

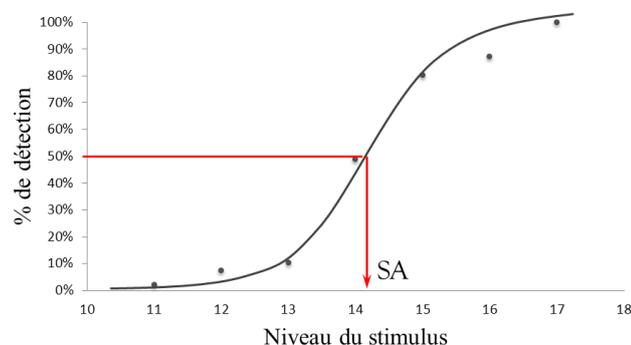


Figure 1.7 Fonction psychométrique [Bagot 99]

Pour définir le seuil différentiel, à chaque essai, l'individu précise s'il perçoit ou non une différence entre un stimulus standard et un stimulus test qui lui sont présentés, le stimulus test ayant une intensité plus ou moins importante que le stimulus standard.

2.2.2. L'INFÉRENCE INCONSCIENTE

Von Helmholtz (1821-1894) est à l'origine du concept d'*inférence inconsciente*. Pour lui, la perception ne se limite pas à une simple acquisition de données sensorielles. Comme le montre la Figure 1.8, elle implique en effet pour l'individu un appel à des connaissances antérieures pour interpréter ces données sensorielles. Une perception est ainsi vue comme le résultat d'hypothèses inconscientes que fait l'individu sur la structure de ce qu'il observe et qui l'amène à faire des inférences (déduction, induction ou abduction) [Delorme 03].

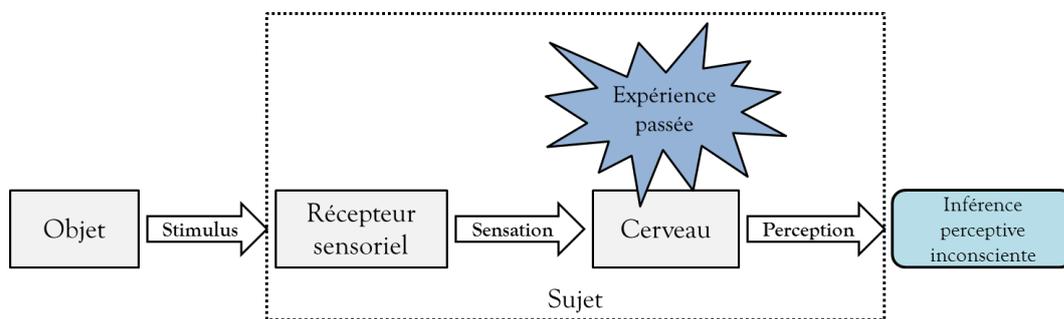


Figure 1.8 Processus de perception selon Von Helmholtz.

Ce concept laisse entendre que des facteurs non perceptifs, tels que les besoins, la culture ou la personnalité de l'individu peuvent intervenir dans le processus de perception. C'est la recherche et l'étude de ces facteurs qui ont fait émerger, au milieu du XX^{ème} siècle et aux États-Unis, le mouvement perceptif, que l'on a appelé le *New Look*. Deux théories sont issues de ce mouvement : le transactionnalisme et la théorie des hypothèses.

- * Le *transactionnalisme*. Cette théorie a été initiée par A. Ames, puis développée dans les années 60 par W.H. Ittelson. La perception est vue comme le résultat d'une transaction inconsciente entre le stimulus et le cerveau, ce résultat dépendant de la probabilité d'occurrence d'un événement et étant pondéré par l'expérience de l'individu [Delorme 03]. De cette théorie, nous noterons ici qu'elle a tout particulièrement montré le manque de fiabilité de la perception de la profondeur spatiale. D'autres approches ont suivi et ont montré les erreurs que pouvait commettre notre cerveau lors de la perception. La Figure 1.9 donne quelques exemples de défaillances possibles de notre perception.
- * La *théorie des hypothèses*. Cette théorie formulée par Bruner (1951) et Postman (1951), confirme le rôle de l'expérience de l'individu dans la perception mais souligne également le rôle d'autres facteurs non perceptifs telles que la motivation de l'individu, ses valeurs personnelles, la pression sociale, etc. (Figure 1.10) [Delorme 03].

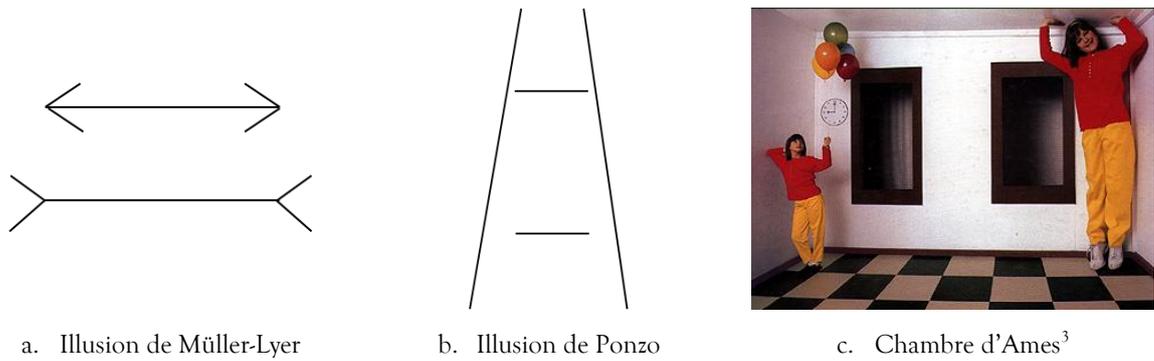


Figure 1.9 Exemples de défaillance de la perception [Bagot 99]

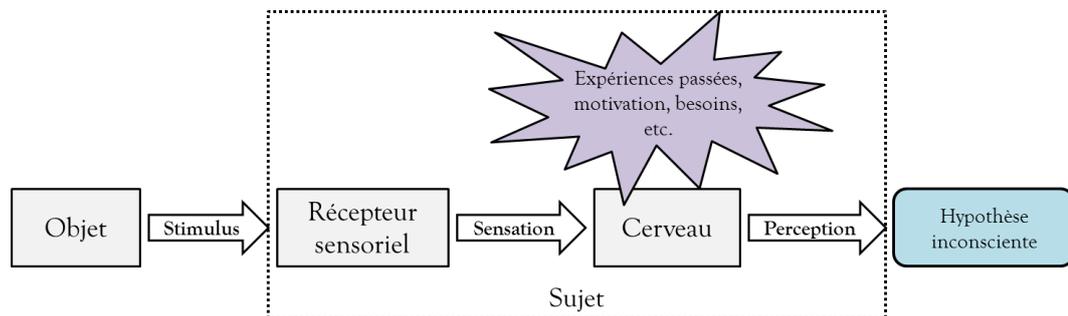


Figure 1.10 Processus de perception – Théorie des hypothèses

2.2.3. LE BEHAVIORISME

J.B. Watson (1878-1958) est à l'origine de cette théorie, née aux États Unis au début du XX^{ème} siècle. Au contraire des autres théories qui considèrent que l'individu a une participation active dans la perception (par la pensée, l'imagination, etc.), le behaviorisme considère au contraire que la perception peut être expliquée par l'application de comportements reflexes du type stimulus-réponse. La perception apparaît donc à la fois comme un comportement dans le sens où elle correspond à un choix d'informations (discrimination dans les stimuli) [Bagot 99].

2.2.4. LA THÉORIE DE GESTALT

M. Wertheimer (1880-1943), K. Koffka (1886-1941), W. Khöler (1887-1967) et K. Lewin (1890-1947) sont à l'origine de la théorie de Gestalt, née en Allemagne. À la différence du behaviorisme qui considère que c'est l'environnement qui agit sur l'individu, la théorie de Gestalt considère que c'est l'individu qui agit sur l'environnement, en le structurant et en l'organisant. La perception n'est plus vue comme une somme de comportements de base, inconscients, mais est au contraire construite à partir de représentations conscientes [Bagot 99] [Weil-Barais 05] [Goddefroid 01].

La théorie de la Gestalt s'oppose également à la psychophysique et à la psychologie inférentielle, considérées comme trop réductrices parce qu'elles interprètent les comportements complexes à

³ http://psylux.psych.tu-dresden.de/i1/kaw/diverses%20Material/www.illusionworks.com/html/ames_room.html

partir des sensations de base (couleur, forme, etc.). Pour le montrer, les gestaltistes donnent l'exemple d'une mélodie. Celle-ci est reconnue même si elle est jouée dans un autre ton, exécutée avec un autre instrument, etc. En fait, une mélodie n'est pas simplement une suite de notes, c'est une structure, une organisation et c'est cette structure, la *Gestalt*, qui est reconnue lors de la perception (*Gestalten*, en allemand, signifie « mettre en forme, donner un structure signifiante ») [Luyat 09].

Concernant la perception, un des apports principaux de la théorie de la Gestalt est l'énoncé des lois qui contrôlent l'organisation perceptive (nous y reviendrons dans le § 3.3.1). La perception s'établit à partir de « bonnes formes » organisées par des lois élémentaires.

2.2.5. LA THÉORIE ÉCOLOGIQUE

J. J. Gibson (1905-1979) a quant à lui proposé la théorie écologique. Pour lui, les informations nécessaires à la perception sont présentes dans l'environnement, et il n'y a qu'à les "cueillir" (*information pick up*). La perception est ainsi vue comme un processus d'extraction par l'action des informations présentes dans l'environnement.

Pour Gibson, il existe deux types de stimulation, la stimulation-énergie qui stimule de manière passive le sens de l'individu, et la stimulation-information qui est saisie de manière active par l'individu et qui débouche sur une perception. La Figure 1.11 illustre le processus de la perception selon cette théorie [Luyat 09] [Delorme 03].

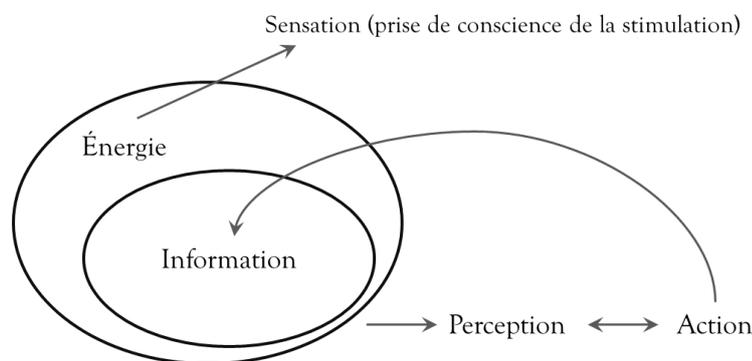


Figure 1.11 Schéma illustrant la perception dans l'approche écologique [Luyat 09]

Par rapport à la perception, cette théorie a également introduit le concept d'*affordance*, celle-ci désignant la capacité de l'objet à suggérer sa propre utilisation à l'individu qui le perçoit. Par exemple, un individu pourra aisément percevoir que l'on peut faire rouler un objet de forme sphérique sans même savoir de quelle matière cet objet est constitué.

2.2.6. L'APPROCHE COGNITIVISTE

L'approche cognitive a été développée dans les années cinquante avec le but de comprendre le mécanisme de la pensée et, plus précisément, de comprendre comment fonctionne notre intelligence, de déterminer l'origine de nos connaissances et d'analyser les stratégies que nous

utilisons pour apprendre, mémoriser et appliquer ce qui a été appris. Cette approche s'intéresse donc principalement aux domaines du langage, de la mémoire et de l'attention [Luyat 09]. Concernant le domaine de la perception, elle s'oppose à la théorie de Gestalt qui considère que la perception d'une structure (la "gestalt") est immédiate. Pour les cognitivistes, la perception se déroule en effet en plusieurs étapes, chacune d'elles correspondant à une opération de traitement spécifique. Ces étapes ne se déroulent pas nécessairement de manière séquentielle et toutes ne sont pas nécessairement activées. Comme le montre la Figure 1.12, la perception possède plusieurs niveaux de traitement et chaque niveau inclut plusieurs étapes.

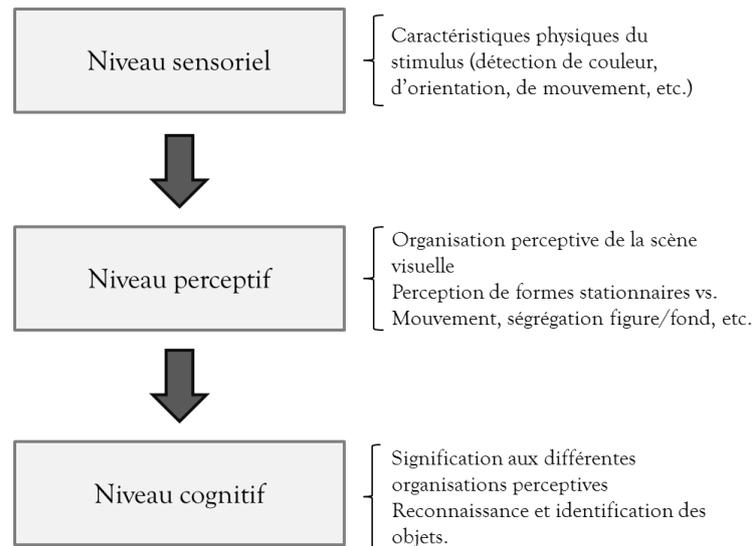


Figure 1.12 Notion de niveau de traitement pour la perception visuelle [Bagot 99]

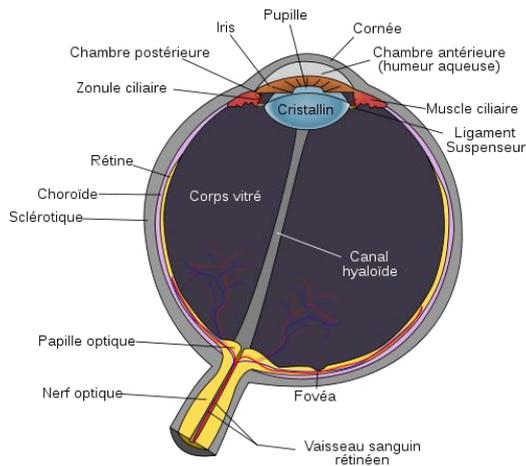
Les caractéristiques physiques des stimuli sont perçues au niveau sensoriel, puis organisées au niveau perceptif. C'est seulement au niveau cognitif que l'individu donne une signification aux organisations perceptives qu'il a précédemment construites [Bagot 99].

3. LA PERCEPTION VISUELLE

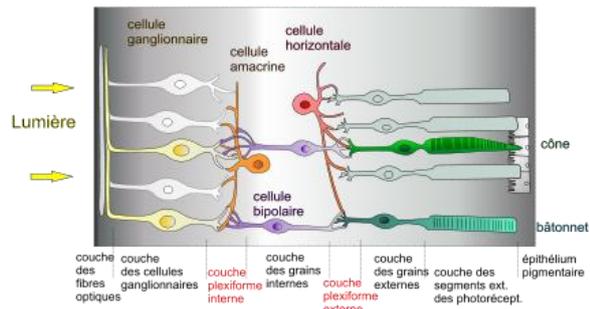
Nous avons présenté quelques théories issues de la psychologie qui ont étudié le mécanisme de la perception. Dans nos travaux, nous nous sommes intéressés plus spécifiquement à la perception visuelle. Nous présentons ici quelques concepts de base de la perception visuelle, de la réception d'un stimulus jusqu'à la perception. Nous présentons ensuite les mécanismes utilisés pour ce type de perception et détaillons le rôle qu'y joue l'environnement.

3.1. LES ÉLÉMENTS DU SYSTÈME VISUEL

Pour comprendre la perception visuelle, il s'agit d'abord de savoir quels sont les éléments qui composent notre œil et comprendre quels sont leurs rôles respectifs (Figures 1.13.a et 1.13.b).



a. Coupe horizontale du globe oculaire



b. Coupe transversale de la rétine

Figure 1.13 L'œil⁴

L'œil est composé de différents éléments [Luyat 09] [Bagot 99] :

- La cornée protège le globe oculaire et permet d'orienter les rayons lumineux vers le cristallin.
- Le cristallin, lentille convergente, modifie sa courbure de manière à ce que l'image de l'objet fixé, qui se situe à une distance plus ou moins proche, soit projetée avec une netteté similaire au niveau de la rétine (mécanisme appelé d'*accommodation*).
- L'iris contrôle la quantité de lumière qui rentre dans l'œil (en plein soleil, elle se contracte et, dans la pénombre, elle se dilate).
- La pupille correspond à l'ouverture par laquelle la lumière rentre.
- La rétine couvre le fond de l'œil et contient deux récepteurs photosensibles :
 - Les cônes sont sensibles aux variations des longueurs d'ondes et permettent de percevoir les couleurs. Ils ont besoin de beaucoup de lumière pour réagir et sont utilisés pour une vision diurne (*vision photopique*).
 - Les bâtonnets sont sensibles à la lumière. Ils n'ont pas besoin de beaucoup de lumière pour réagir et sont utilisés surtout pour une vision nocturne (*vision scotopique*).

La rétine contient également deux zones importantes :

- La fovéa, ou macula, est la partie de la rétine sur laquelle se projette l'image d'un objet lorsqu'on le fixe. C'est la partie la plus sensible de la rétine.

⁴ <http://fr.wikipedia.org/>

- La pupille ne comporte pas de récepteurs sensoriels et constitue la tâche aveugle. En effet, dans cette partie les fibres nerveuses issues des récepteurs se rassemblent pour former le nerf optique.

Ces éléments (entre autres) sont responsables de la réception du stimulus. Ces stimuli, comme nous l'avons dit, sont transmis sous forme d'influx nerveux jusqu'au cerveau où s'activent deux systèmes de traitement complémentaires : le système de l'identification (Figure 1.14, flèche verte) et le système de la localisation (Figure 1.14, flèches rouges) [Lieury 11].

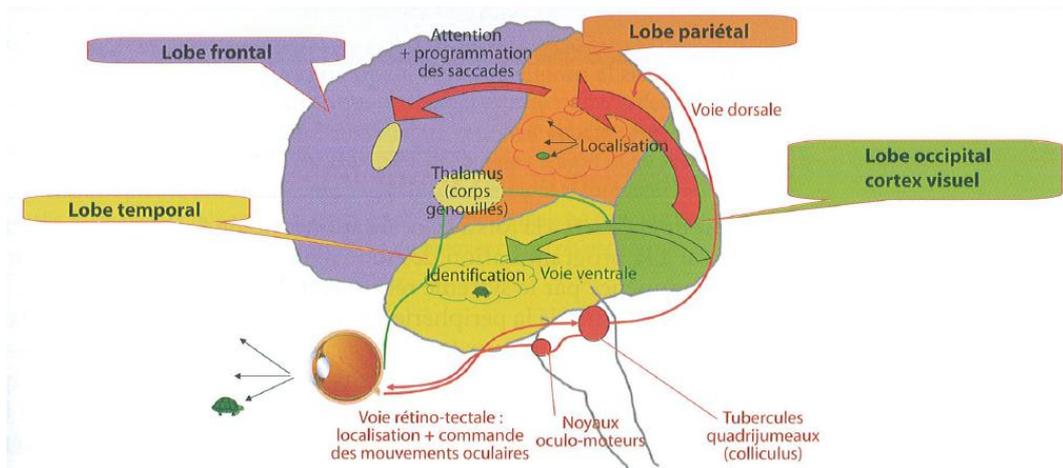


Figure 1.14 Le cerveau dans le contexte du système visuel [Lieury 11]

3.2. LES MÉCANISMES DE LA PERCEPTION VISUELLE

Nous avons présenté les différents éléments constituant l'œil. Nous décrivons maintenant comment ces éléments agissent pour nous permettre de percevoir.

3.2.1. EXPLORATION VISUELLE

L'œil possède six muscles responsables du mouvement oculaire. Ce mouvement permet à l'œil de capter des informations dans de multiples directions. Cependant, la vision n'est pas panoramique. L'exploration se fait par des sauts (saccades) et par des pauses (fixations).

- Les saccades amènent le centre du regard (la fovéa) en face de la cible (par exemple, un mot). Elles sont très courtes entre chaque mot (20 millisecondes environ), plus longues pour un changement de ligne (80 millisecondes environ).
- Les fixations permettent au cerveau de capter l'information. Elles ont une durée de l'ordre 250 millisecondes.

À titre d'exemple, la Figure 1.15 montre les saccades et les fixations de notre œil pendant la lecture d'une phrase [Lieury 11]. La lecture requiert un niveau d'apprentissage relativement

élevé mais, lorsque celui-ci est acquis, s'effectue selon une séquence de saccades et de fixations quasi automatique vers la droite avec, au besoin, des retours en arrière [Lévy-Schoen 67].

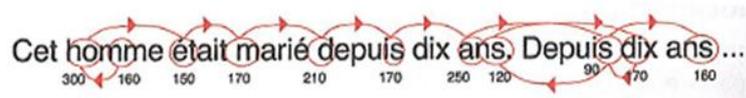


Figure 1.15 Exemple de saccades et fixation, dans la lecture [O'Regan 78]

L'apprentissage joue en effet un rôle majeur dans la perception, et en particulier dans l'exploration. Neisser (1964) a par exemple montré que des individus non entraînés prenaient environ trois fois plus de temps à percevoir un signal que des individus entraînés. La durée de de fixation dépend en effet de la capacité de l'individu à reconnaître ce signal et à extraire la quantité d'information contenue dans ce signal [Lévy-Schoen 67].

Concernant la stratégie d'exploration, Yarbus (1965) a montré que si l'on pose des questions à un individu pendant qu'il observe une figure, son œil ne suit pas la même trajectoire selon la question demandée. Par contre, si on lui donne les caractéristiques de l'objet à chercher, son œil est guidé par les informations acquises par sa vision périphérique. La couleur de l'objet est le signal qui est d'abord privilégié, puis c'est au tour de sa taille, puis enfin et seulement, de sa forme [Lévy-Schoen 67].

3.2.2. SENSIBILITÉ À LA LUMIÈRE

Nous avons présenté précédemment les deux principaux récepteurs photosensibles de l'œil, les cônes et les bâtonnets. Ces récepteurs contiennent des pigments visuels dont les substances sont photosensibles et transforment l'énergie lumineuse.

Les bâtonnets contiennent de la rhodopsine dont le spectre d'absorption se situe entre 400 à 650nm. Les cônes contiennent quant à eux du cyanolabe, du chlorolabe ou de l'érythrolabe dont le spectre d'absorption se situe entre 400 et 700nm [Bagot 99]. Chacun de ces trois pigments a un intervalle spécifique de spectre d'absorption, le maximum correspondant respectivement, au violet, au vert et au jaune.

En fait, le spectre d'absorption maximum correspond à la longueur d'onde où la cellule est la plus sensible. Cette sensibilité est estimée par l'inverse d'un seuil de détection. La Figure 1.16 montre la sensibilité à la lumière des cônes et des bâtonnets. Les cônes se caractérisent par une faible sensibilité à la lumière et une vision colorée tandis que bâtonnets se caractérisent par une grande sensibilité à la lumière et une vision non colorée.

La sensibilité dépend du niveau d'adaptation de la rétine à l'obscurité. Lorsque le niveau d'éclairement est élevé, seuls les cônes sont fonctionnels (vision photopique - diurne), les bâtonnets étant saturés. Lorsque ce niveau d'éclairement descend en dessous d'un certain seuil, les bâtonnets deviennent enfin actifs (vision scotopique - nocturne). Cela explique par exemple

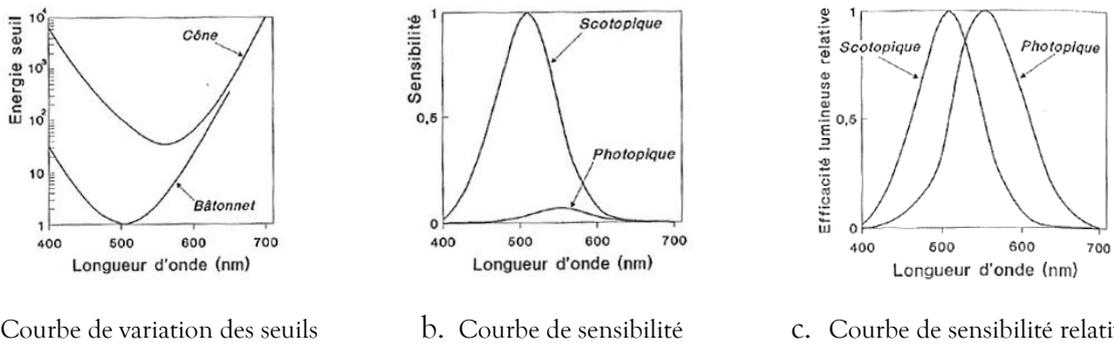


Figure 1.16 Sensibilité à la longueur d'onde [Bagot 99]

pourquoi, lorsque l'on rentre dans un tunnel, on a parfois du mal à discerner les détails pendant un certain temps.

Quand le niveau d'éclairage est élevé, on a une décomposition importante des pigments visuels. Ceux-ci se régénèrent ensuite à l'obscurité. Au fur et à mesure qu'ils se régénèrent, le seuil de détection à la lumière diminue. La Figure 1.17 illustre le temps d'adaptation à l'obscurité pour les cônes et les bâtonnets [Bonnet 03] [Bagot 99].

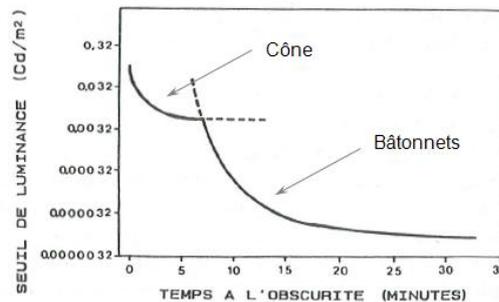


Figure 1.17 Courbe d'adaptation à l'obscurité [Bonnet 03]

3.2.3. DÉTECTION D'UN STIMULUS

Nous avons évoqué (voir § 2.2.1) la notion de seuil de détection d'un stimulus (seuil perceptif absolu et/ou seuil perceptif différentiel). Fechner a développé trois méthodes pour définir un seuil : la méthode d'ajustement, la méthode des limites et la méthode des stimuli constants [Bagot 99] [Luyat 09].

- * *Méthode d'ajustement.* Dans cette méthode, l'individu a une participation active. On augmente progressivement l'intensité du stimulus jusqu'à ce que l'individu le perçoive. On réduit ensuite cette intensité jusqu'à ce que l'individu ne perçoive plus le stimulus. L'essai est répété jusqu'à ce que l'individu soit satisfait de son ajustement.
- * *Méthode des limites.* À la différence de la méthode précédente, c'est un animateur qui présente à l'individu le stimulus avec plusieurs intensités, et ceci en alternant des séries

d'intensités croissantes et d'intensités décroissantes. L'individu indique lorsqu'il perçoit le stimulus pour les essais d'intensités croissantes et indique lorsqu'il ne le perçoit plus pour les essais d'intensités décroissantes. Le seuil est calculé à partir de la moyenne des valeurs obtenues pour chaque série.

- * *Méthode des stimuli constants.* Cette méthode est la plus adéquate pour le calcul du seuil perceptif absolu, via la construction de la fonction psychométrique (voir § 2.2.1). Avec cette méthode, les intensités du stimulus sont présentées dans un ordre aléatoire, évitant ainsi que le sujet puisse anticiper sa réponse (comme cela peut être le cas pour la méthode des limites). Cette méthode présente cependant l'inconvénient qu'un grand nombre d'essais soit réalisé pour calculer le seuil.

3.2.4. FIABILITÉ DE LA PERCEPTION

Pour tester la fiabilité de la perception, la théorie de la détection du signal peut être utilisée, y compris en situation de présence de bruit [Bagot 99].

Supposons par exemple qu'un individu « A » indique qu'il perçoit le stimulus dès l'instant où il a un doute sur sa présence et qu'un individu « B » indique qu'il perçoit le stimulus que lorsqu'il est absolument sûr de le percevoir. Il y aura dans ce cas deux valeurs différentes pour le seuil perceptif absolu. Pour pouvoir affirmer que l'individu « A » a une meilleure sensibilité que l'individu « B », il faut pouvoir s'assurer que les stratégies utilisées par les deux individus soient identiques. La théorie de la détection du signal contribue à identifier ces stratégies.

Pour ce test, l'expérimentateur choisit au préalable une valeur d'intensité pour le stimulus, cette valeur étant choisie de telle sorte que le stimulus, i.e. le signal, soit assez difficile à être perçu. Plusieurs essais sont soumis à l'individu avec présence ou absence de stimulus. Si aucun stimulus n'est présent, la présence de bruit déclenche une activité neurosensorielle spontanée de l'individu. Quand le stimulus est présent, ce bruit peut parasiter la perception du sujet. Le Tableau 1.6 montre les réponses possibles de l'individu selon les cas.

Tableau 1.6 Les différentes réponses en fonction de la présence ou non du signal [Luyat 09]

		Type d'essai	
		Signal + Bruit	Bruit
Réponses du sujet	Oui	Détection correcte	Fausse alarme
	Non	Omission	Rejet correct

La théorie de la détection du signal permet de déterminer, à partir de la détermination des pourcentages de fausses alarmes et de détections correctes, les capacités sensorielles du sujet (le paramètre « d' ») et le type de stratégie utilisée (l'indice « β ») [Bagot 99].

3.2.5. QUALITÉ DE LA PERCEPTION

Notre œil, nous l'avons vu, est sensible à la lumière, celle-ci pouvant provenir d'une source lumineuse (le soleil par exemple) ou pouvant être réfléchi par un objet (la luminance).

La qualité de perception visuelle dépend, non pas de l'homogénéité de cette source lumineuse, mais davantage de la présence de contrastes différents sur plusieurs régions de la zone de lumière [Bagot 99]. Ce sont ces contrastes qui permettent à l'œil de percevoir la différence entre des objets, ou de percevoir la différence entre un objet et son environnement (le fond par exemple sur lequel l'objet est placé).

L'œil a en effet généralement une excellente capacité à détecter des contrastes de luminance. Cependant, dans certains cas, il percevra des contrastes plus accentués, ou moins accentués, qu'ils ne le sont en réalité. La Figure 1.18 montre, par exemple, que notre œil aura tendance à percevoir le même carré gris central plus clair lorsqu'il est entouré d'une surface foncée que lorsqu'il est entouré d'une surface claire [Bagot 99].

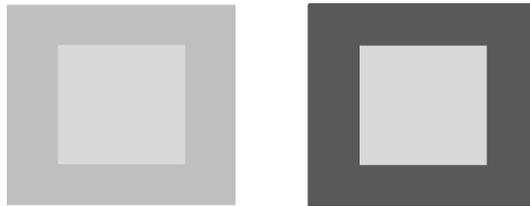


Figure 1.18 Renforcement de contraste [Bagot 99]

La qualité de perception des contrastes dépend également de la taille des objets perçus. Par exemple, à contrastes égaux, le signal « * » sera sans nul doute mieux perçu que le signal « ** ». C'est en tout cas le principe retenu pour mesurer l'acuité visuelle d'un individu [Bagot 99].

La qualité d'une perception peut également s'apprécier en évaluant la capacité du système visuel à percevoir les couleurs. La couleur ne fait en effet pas partie des attributs physiques d'un stimulus, mais correspond au résultat d'une perception. C'est la longueur d'onde qui constitue la grandeur physique associée à la perception d'une couleur et ce sont, nous l'avons vu précédemment, les cônes qui sont responsables de la discrimination des longueurs d'ondes [Bagot 99].

La couleur d'un objet dépend des longueurs d'ondes qu'il réfléchit. Sa couleur peut donc changer en fonction de la composition spectrale de la lumière incidente. Par exemple, un objet éclairé avec une lumière blanche pourra être perçu comme étant de couleur rouge, alors que ce même objet pourra être perçu comme étant de couleur noire s'il est éclairé avec une lumière bleue.

Lorsque l'on parle de couleur, il est important de faire une distinction entre les trois qualités liées à la stimulation lumineuse [Bagot 99] :

- La luminosité, ou clarté. Elle dépend de la réflectance des objets.
- La teinte, ou tonalité, ou tout simplement, couleur. Elle dépend directement de la longueur d'onde réfléchi par l'objet (le blanc, tout comme le noir, n'est pas une teinte).

- La saturation. Elle qualifie le niveau de pureté d'une teinte (le blanc a une saturation nulle et les couleurs spectrales ont une saturation maximale).

En combinant ces trois qualités, on peut avoir plusieurs couleurs différentes.

3.3. CE QUI EST PERÇU

Nous avons présenté jusqu'à présent quelques mécanismes utilisés par la perception. C'est en combinant ces mécanismes que notre système visuel perçoit son environnement par des contrastes de lumière, par des couleurs, etc. Cette combinaison permet au final une perception de formes et une perception de la profondeur. Nous voyons ici comment ces formes et ces profondeurs sont perçues.

3.3.1. PERCEPTION DES FORMES

C'est la capacité de notre système visuel à distinguer des variations d'intensités de lumière et à organiser les stimulations en une structure qui lui permet de percevoir une forme. C'est un processus complexe, mais il est réalisé sans aucun effort par notre système visuel. Ce processus se base sur une ségrégation entre figure et fond, ainsi que sur différentes lois d'organisation perceptive que nous présentons ci-après.

Les gestaltistes se sont intéressés à la manière dont s'y prend notre système visuel procède pour faire la différence entre le fond et l'objet. C'est ce qu'ils ont appelé la *ségrégation* ou *discrimination figure/fond*. Cette ségrégation se réfère à la décision organisationnelle que prend notre perception pour faire la distinction entre l'objet et son contexte. La Figure 1.19 illustre ce principe. Dans cet exemple, ce qui sera perçu par l'individu sera, tantôt un ensemble de formes irrégulières, tantôt une seule et même structure (le mot « œil »). La perception dépendra en effet de la décision organisationnelle qui aura été prise par notre système visuel. Dans le cas où cette décision n'aura pas pu percevoir le mot « œil », notre système visuel sera ensuite en capacité de se réorganiser et de le percevoir par la suite [Rookes 00].



Figure 1.19 Exemple de ségrégation figure-fond

Pour mieux comprendre la relation qui s'établit entre la figure et le fond, les gestaltistes ont étudié plusieurs figures réversibles, la plus connue étant celle du vase de Rubin présentée dans la Figure 1.20. Cette figure peut être perçue comme un vase noir sur un fond blanc, ou comme deux visages qui se regardent. Nous n'en avons qu'une perception, le vase et les visages ne pouvant être perçus en même temps [Rookes 00] [Weil-Barais 05] [Bagot 99].



Figure 1.20 Le vase de Rubin⁵

Sur la base de ces études, les gestaltistes ont énoncé quelques propriétés concernant la figure et le fond dans la scène qui est perçue [Goddefroid 01] [Rookes 00] :

- La figure présente des caractéristiques de l'objet. Elle est plus « visible » que le fond.
- Le fond est perçu plus comme une substance relativement homogène, sans contour précis. Il semble être à l'arrière de la figure.
- La figure est perçue comme étant en face du fond.
- Le contour qui sépare la figure du fond semble appartenir à la figure.

Pour les gestaltistes, la ségrégation figure/fond constitue la base de la perception d'une forme et elle est automatiquement appliquée. Notre système visuel nous amène à percevoir comme figure tout ce qui est petit, régulier ou qui a une signification pour nous. À l'inverse, tout ce qui est moins précis et moins structuré est perçu comme le fond (cela explique par exemple pourquoi, dans la Figure 1.19, ce sont les formes irrégulières qui sont perçues plutôt que le mot "œil" [Goddefroid 01]).

Notre système visuel suit également quelques lois d'organisation perceptive, appelées également principes de groupement, pour parvenir à identifier, puis distinguer les objets présents sur une scène.

Von Ehrenfels (1890) avait déjà remarqué qu'une forme est autre chose que la somme des parties qui la composent. C'est la relation particulière qui s'établit entre ces parties qui donne origine à une forme [Weil-Barais 05]. À partir de cette idée, Wertheimer a énoncé en 1912 les principes de base de la théorie de Gestalt [Weil-Barais 05] :

- *Nous n'avons pas de sensations isolées nées de l'excitation des récepteurs centraux, nous n'apprenons pas à combiner ces sensations. La perception est structurée d'emblée.*
- *Il n'y a pas de distinction entre perception et sensation.*

⁵ <http://www.arretsurlimages.net/vite.php?id=10735>

- *Le tout est perçu avant les parties.*
- *L'organisation en ensembles ne se fait pas au hasard. De toutes les organisations possibles, seules quelques-unes se réalisent. En général, la bonne forme est spontanée, naturelle.*

Suite à l'énoncé de ces principes, les gestaltistes ont proposé des lois d'organisation perceptive pour expliquer comment notre système visuel perçoit un "tout".

- * *La loi de la bonne forme (ou loi de prégnance ou loi de la simplicité) : « un pattern de stimulation est vu de telle sorte que la structure résultante est toujours la forme la plus simple, la plus équilibrée, la plus stable » [Weil-Barais 05].*

La Figure 1.21 illustre cette loi. Sur la Figure 1.21a., l'œil perçoit sans effort un cube. Il est possible également qu'il perçoive des carrés, des trapèzes, des triangles, mais il doit dans ce cas faire davantage d'efforts. Le cerveau décide donc d'opter pour l'interprétation la plus simple, la plus familière, à savoir celle du cube. La même loi s'applique dans la Figure 1.21b. C'est un hexagone qui est d'abord perçu, en non le cube qui réclame au cerveau un effort plus important.

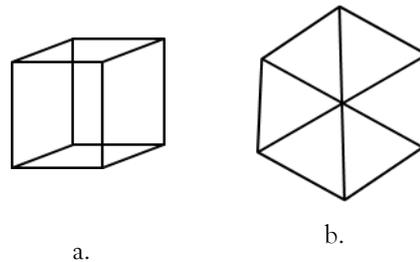


Figure 1.21 Deux exemples de la loi de la bonne forme [Rookes 00]

- * *La loi de bonne continuité : « lorsque des points sont rapprochés, ils tendent à former une courbe ou une droite, mais l'appartenance d'un point à une ligne dépend du fait que ce point est dans le meilleur prolongement pour cette ligne » [Weil-Barais 05].*

Dans la Figure 1.22a par exemple, l'œil perçoit deux formes distinctes, un élément plat qui traverse un rectangle, plutôt que trois formes distinctes (dessin de droite).

Dans la Figure 1.22b, l'œil perçoit deux lignes (AB et CD) qui se coupent en M plutôt que deux lignes AC et BD qui se rencontrent en M.

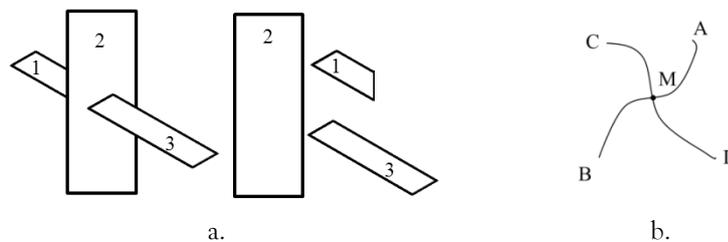


Figure 1.22 Deux exemples de la loi de bonne continuité (a. [Goddefroid 01], b [Bagot 99])

- * *La loi de proximité* : « toutes choses étant égales par ailleurs, le groupement en unités se fait sur la base de la plus petite distance » [Weil-Barais 05].

La Figure 1.23 illustre cette loi. Dans cet exemple (dessin de gauche), l'œil perçoit un carré plutôt que huit étoiles. Cela est encore plus vrai quand les étoiles sont très proches les unes des autres (dessin de droite).



Figure 1.23 Deux exemples de la loi de proximité [Lieuury 11]

- * *La loi de similitude* : « Les éléments identiques tendent à se regrouper » [Weil-Barais 05].

La Figure 1.24 illustre un exemple de la loi de similitude. Dans cet exemple, l'œil perçoit des colonnes plutôt que de lignes (dessin de gauche), et des lignes plutôt que des colonnes (dessin de droite).



Figure 1.24 Deux exemples de la loi de similitude [Rookes 00]

- * *La loi de destin commun* : « Les choses ou les points qui se déplacent selon une même trajectoire apparaissent groupés ensemble » [Weil-Barais 05].
- * *La loi de clôture* : « Nous relient ou regroupons mentalement des éléments de manière à ce qu'ils constituent une forme fermée plutôt qu'ouverte » [Goddefroid 01].

La Figure 1.25 illustre la loi de clôture. Dans cet exemple, l'œil perçoit un cercle plutôt que six lignes (dessin de gauche) et un triangle blanc (dessin de droite) alors qu'ils ne constituent même pas un objet (triangle de Kanizsa).

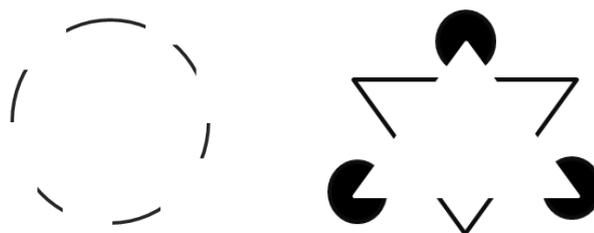


Figure 1.25 Deux exemples de la loi de clôture [Weil-Barais 05]

3.3.2. PERCEPTION D'OBJETS

La forme, comme nous l'avons vu, est une organisation structurale définie à partir de la relation qui existe entre des éléments visuels présents sur la scène observée. À partir de la perception de cette forme, notre système visuel perçoit ensuite des objets.

Plusieurs théories ont été développées pour expliquer comment ces objets sont perçus. Elles ont en commun de décomposer la perception en deux étapes. La première étape permet une reconnaissance de différentes parties présentes sur la scène observée et la seconde étape regroupe ces parties en leur donnant une signification [Weil-Barais 05].

De manière plus précise, les approches de Treisman (1986), de Biederman (1987) et de Marr (1982) permettent de mieux comprendre comment les objets sont perçus.

Treisman propose un modèle basé en deux étapes. Durant la première, l'étape « préattentive », le stimulus est décomposé en propriétés de base, appelées « primitives » (le sujet a un rôle passif durant cette étape). Durant la seconde étape, ces primitives sont combinées en fonction de leur localisation (l'individu a cette fois un rôle actif). Le résultat de cette deuxième étape est fonction des connaissances et des attentes de l'individu. Treisman a également étudié les différents attributs d'un objet, comme la forme, la couleur, la taille, l'orientation, etc. [Bonnet 03] [Weil-Barais 05].

Pour Biederman, la perception des objets se fait par la reconnaissance des éléments géométriques de base présents (parallélépipède, cylindre, cône, etc.), appelées « géons », sur la scène observée. La Figure 1.26 donne quelques exemples de géons (dessins à gauche), ainsi que quelques exemples des objets formés à partir de l'association de ces géons (dessins à droite). Biederman considère qu'une quarantaine de géons suffisent à construire n'importe quel objet. Cette approche postule que la perception d'un objet ne peut s'effectuer que si les géons ont été préalablement identifiés [Bagot 99].

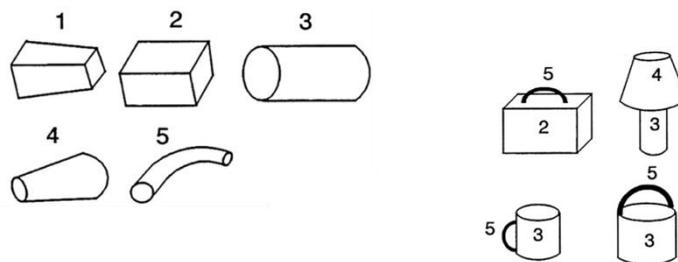


Figure 1.26 Exemples de « géons » et d'objets construits à partir de ces géons [Bagot 99]

Enfin, pour comprendre le mécanisme de la perception des objets, l'approche de Marr (1980), (encore appelée théorie computationnelle) met l'accent sur les opérations mentales qui sont effectuées et les procédures de calcul qui sont nécessaires pour élaborer une représentation mentale des objets [Bagot 99].

Marr considère que la perception commence au niveau de la rétine et se développe ensuite sur trois niveaux de traitement. Dans le premier niveau, les variations de luminance et les contours sont extraits. On obtient « l'esquisse primaire brute ». Dans le deuxième niveau, les propriétés de texture, les ombres, les contours fermés, les discontinuités de surface sont ajoutées. Le traitement des deux yeux permet d'aboutir à une représentation en 3 dimensions, mais avec un point de vue réduit à celui de l'observateur. On obtient ainsi « l'esquisse 2 ½ D ». Dans le troisième niveau, la représentation 3D de l'objet est construite, indépendamment de l'angle de vue de l'objet et avec une référence centrée sur l'objet lui-même. C'est durant ce dernier niveau que les connaissances antérieures de l'observateur peuvent intervenir [Bagot 99] [Rookes 00].

3.3.3. PERCEPTION DE LA PROFONDEUR

Les images fournies par les yeux sont des représentations réduites à deux dimensions. Ce sont les indices monoculaires et binoculaires que nous permettent de percevoir le monde en trois dimensions. Ces indices nous permettent de percevoir la profondeur, y compris avec un seul œil.

Il y a cinq groupes d'indices monoculaires [Bagot 99] [Weil-Barais 05] :

- L'occlusion. Les objets situés en avant masquent en partie ceux situés derrière.
- La perspective. Elle peut être prise en compte selon quelques indices :
 - Le point de fuite : des lignes parallèles vues en profondeur se rejoignent en un même point.
 - La taille apparente : les images de même taille réelle ont des images rétiniennes plus petites quand elles sont éloignées.
 - L'écart avec la ligne horizontale : plus l'objet est éloigné de l'observateur, plus il semble être proche de la ligne horizontale représentant l'horizon.
 - Le gradient de texture : l'image d'une texture semble être plus resserrée quand elle est éloignée de l'observateur.
- Les ombres. Selon la position des ombres, l'objet est vu en creux ou bosse.
- La parallaxe de mouvement (perçu quand l'individu est en déplacement). Pendant le déplacement, tout ce qui est proche de l'individu défile rapidement, et tout ce qui est loin défile plus lentement.
- L'accommodation. Elle correspond à la modification de la courbure du cristallin en fonction de la distance de l'objet.

Il y a deux indices binoculaires :

- la convergence des yeux : pour observer un objet rapproché, les axes des yeux convergent sur cet objet.

- la stéréopsie : les points de l'espace sont perçus d'autant plus éloignés du point de fixation que leur disparité rétinienne (la différence entre l'image formée sur l'œil droit et celle formée sur le gauche) est grande et sont situés en avant ou arrière selon le signe de cette disparité.

La perception de la profondeur est essentielle pour la construction d'une représentation cohérente des objets. Les indices de profondeur sont nécessaires pour les objets soient perçus avec une taille constante et une forme constante quelles que soient la distance d'observation et l'angle d'observation utilisés (par exemple, un disque est perçu comme rond quel que soit l'angle d'observation utilisé).

4. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons d'abord positionné la notion de *qualité perçue* par rapport à la notion de *qualité*. Pour cela, nous avons fait le choix de définir la qualité en la décrivant à partir des cinq approches proposées par Garvin (Approche transcendantale, Produit, Utilisateur, Production, Valeur), à partir des huit dimensions de la qualité décrites par Hunt (Performance, Fonctions secondaires, Fiabilité, Conformité, Durabilité, Service, Esthétique et Qualité perçue) et à partir deux types de qualité proposés par Zeithaml (Qualité objective et Qualité subjective). Nous avons vu que la qualité perçue se positionnait plutôt sur une approche "Utilisateur", couvrait les dimensions "Esthétique" et "Qualité perçue" et se classait comme un type de "Qualité subjective".

Nous avons ensuite fait le lien entre la qualité réalisée et la qualité perçue d'un produit (respectivement la qualité objective et la qualité subjective au sens de Zeithaml) en montrant que la satisfaction du client (l'Utilisateur au sens de Garvin) s'échelonnait en réalité entre ces deux qualités. Tout l'enjeu pour les entreprises, nous l'avons dit, est d'évoluer d'une recherche centrée sur l'obtention d'une qualité attendue (qui doit nécessairement être atteinte) vers une recherche centrée sur l'obtention d'une qualité perçue (qui s'impose au client dès son premier contact avec le produit).

La qualité perçue est le résultat d'une perception. Nous avons présenté quelques-unes des approches qui ont été proposées, principalement en psychologie, pour expliquer le fonctionnement de la perception. Retenons de cette étude que la perception est généralement vue comme un processus inconscient de l'individu, innée ou élaborée selon les approches, intégrant les données sensorielles sur l'objet observé mais aussi des éléments non perceptifs comme la culture, la motivation, l'expérience ou les valeurs de l'individu. La manière détaillée dont celui-ci élabore sa perception, le résultat du processus de conception qu'il met en œuvre, se révèle assez complexe (une inférence pour certains, un comportement pour d'autres, etc.). On comprend dès à présent, nous y reviendrons plus tard, la difficulté qu'ont les entreprises à maîtriser le contrôle visuel de leurs produits.

Nous nous sommes intéressés ensuite au cas particulier de la perception visuelle. Après avoir rappelé les éléments qui composent notre œil et le rôle qu'ils ont dans l'exploration (la première étape de la perception), nous avons évoqué successivement les principes de détection d'un stimulus, la fiabilité et la qualité d'une perception. Nous avons noté que la lumière jouait un rôle déterminant dans la perception et que la qualité de la perception dépendait de la capacité de l'individu à détecter les contrastes et les couleurs sur la zone observée.

Enfin, nous avons présenté ce que notre système visuel était en capacité de percevoir. La forme est l'un des résultats essentiels de la perception, avec la profondeur. Comme nous l'avons vu, la forme est le résultat de l'application par notre cerveau d'un certain nombre de principes de base et de lois d'organisation perceptive (les lois de Gestalt). C'est la perception de ces formes qui permet ensuite à l'individu de percevoir des objets. Ces lois peuvent à elles seules expliquer, nous le verrons plus tard, pourquoi une même anomalie sur un produit, en fonction de son positionnement par rapport aux formes environnantes, peut-être plus ou moins perçue par un contrôleur.

CHAPITRE 2

LE CONTRÔLE VISUEL : DE LA DÉTECTION À LA CARACTÉRISATION DES ANOMALIES

Le chapitre précédent a évoqué la problématique de la perception, et plus spécifiquement de la perception visuelle. C'est sur cette perception que se base le contrôle visuel que l'entreprise met en œuvre pour mesurer la qualité perçue de ses produits.

1. LE CONTRÔLE VISUEL

Le contrôle visuel se classe parmi les contrôles dits sensoriels. Ceux-ci se basent sur l'examen des propriétés organoleptiques d'un produit par les organes de nos sens (gustatif, olfactif, tactile, auditif et visuel). Le plus utilisé, le contrôle visuel est utilisé pour caractériser un produit selon des critères de couleur, de forme, d'aspect, de surface ou de présence de défauts [Urdapilleta 01]. Il est appliqué dans de nombreux secteurs industriels, comme l'aéronautique par exemple, où près de 90% des contrôles réalisés en maintenance sont réalisés de manière visuelle [Vora 02].

Le contrôle visuel se classe également parmi les contrôles dits non destructifs. Ceux-ci visent à *"vérifier l'absence d'anomalie non conforme, sans démontage ou sans porter atteinte à l'intégralité du produit contrôlé, et éventuellement à connaître la mesure indirecte des certaines dimensions inaccessibles à la métrologie"* [Forest 92]. En d'autres termes, ce type de contrôle vise à qualifier, sans nécessairement quantifier, l'état d'un produit [Lambert 94].

Quelques définitions du contrôle visuel ont été proposées.

Par exemple, la FAA (Federal Aviation Administration), le définit comme [FAA 97] :

"... a process of using the unaided eye, alone or in conjunction with various aids, as the sensing mechanism from which judgments may be made about the conditions of a unit to be inspected."

Cette définition introduit l'idée que le contrôle visuel se compose d'une inspection suivie d'un jugement sur le produit.

De manière plus précise, l'ATA (Air Transport Association) le définit comme [ATA 99] :

“ ... a check which is thorough examination of a zone, system, subsystem, component or part, to a level defined by the manufacturer, to detect structural failure, deterioration or damage and to determine the need for corrective maintenance.”

Par rapport à la précédente, cette définition introduit l'idée qu'un contrôle visuel est spécifique à chaque entreprise qui est en charge de définir ce qui doit être examiné (défaillance, détérioration ou dommage) et où cet examen doit être effectué (sur une zone, un composant ou un produit).

Le contrôle visuel présente plusieurs avantages par rapport à d'autres types de contrôles non-destructifs [Drury 01].

Il est d'abord plus flexible qu'un mécanisme automatique de détection, l'œil pouvant être utilisé lors d'un contrôle aussi bien pour une détection de défauts sur des zones très localisées que sur des zones plus grandes.

Il peut s'appliquer ensuite à une diversité plus grande des défauts, les mécanismes automatisés de détection se limitant souvent à une détection d'un seul et même type de défauts.

Il est ensuite utilisable à différents moments dans le cycle de vie du produit (par exemple, à différents stades de sa fabrication ou à sa livraison), ce qui n'est pas le cas d'un mécanisme automatique de détection, essentiellement pour des raisons de coût.

Enfin, le contrôle visuel est généralement simple à mettre en œuvre, surtout par rapport à un mécanisme automatique dont la phase de mise au point peut se révéler dans certains cas difficile à réaliser.

En revanche, le contrôle visuel présente également quelques points faibles.

Il est parfois limité dans sa sensibilité par rapport à des mécanismes automatiques de détection dont les capacités de détection dépassent souvent de très loin celles de l'œil.

La productivité d'un contrôle visuel est également plus faible qu'un contrôle réalisé à l'aide d'un moyen de détection automatique dont la vitesse d'exécution peut se révéler bien supérieure. Le même constat peut être fait sur la fiabilité, l'acuité visuelle du contrôleur, sa concentration ou sa fatigue pouvant être à l'origine d'une détection moins efficace qu'avec un moyen de détection automatique.

Avec ses avantages, et malgré ses limites, le contrôle visuel reste très largement utilisé dans le contrôle non destructif des produits.

1.1. LES OBJECTIFS D'UN CONTRÔLE VISUEL

Le contrôle visuel est, nous l'avons dit, très utilisé dans le domaine aéronautique. Son rôle est principalement de s'assurer de l'absence d'anomalie de surface pouvant être ensuite à l'origine

d'une défaillance grave de l'avion. On comprend bien le rôle essentiel du contrôle visuel pour ce type de produit.

Mais le contrôle visuel est également bien présent pour beaucoup d'autres produits. Il est par exemple utilisé pour le contrôle des cartes de circuits imprimés (soudures inopérantes, alignement incorrect de composants, mauvaise polarité, etc.) [Chabukswar 03]. Il est également utilisé pour le contrôle des lentilles de contact (arrachement, alignement, tâches, rayures, etc.) [Jebaraj 99] [Rao 06].

Dans le cas des produits où des soudures sont réalisées, le contrôle visuel est réalisé en autocontrôle par l'opérateur qui doit s'assurer de l'absence de défauts géométriques sur l'assemblage (caniveaux, déformation, surépaisseur, etc.) [Semin 04]. Des normes ont d'ailleurs été définies pour préciser comment réaliser ce contrôle visuel. Ainsi, la norme NF EN ISO 17637 : 2011 [ISO 11a] donne des préconisations pour le contrôle visuel des assemblages soudés par fusion et la norme NF EN 13100-1 : 2000 [AFNOR 00] pour le contrôle des assemblages soudés sur produits semi-finis en thermo-plastie.

D'autres normes semblables ont été rédigées pour d'autres types de produits. La norme NF 61300-3-1 : 2006 [AFNOR 06b] donne des indications pour le contrôle des connecteurs et composants passifs à la fibre optique, la norme NF EN 60512-1-1 : 2002 [AFNOR 02a] pour le contrôle visuel des composants électromécaniques et la norme NF EN 60749-3 : 2002 [AFNOR 02b] pour les dispositifs semi-conducteurs.

Le contrôle visuel est également très présent dans l'industrie optique [Rebsamen 10]. Pour ce type de produit, le contrôle visuel ne se limite pas à détecter les défauts techniques du produit (par exemple, une rayure sur un verre) mais également des défauts de nature esthétique (par exemple, une rayure sur la monture). Dans cet exemple, le client attend en effet de ses lunettes, d'une part qu'elles lui permettent de voir, d'autre part, qu'elles soient esthétiquement irréprochables. Cet exemple montre très bien que le contrôle visuel peut être utilisé pour répondre à deux types d'objectifs différents : technique et esthétique. L'objectif technique couvre, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, la qualité dite objective du produit, l'objectif esthétique la qualité dite perçue (ou qualité subjective) du produit.

Les exemples d'application du contrôle visuel que nous venons de citer répondent très souvent exclusivement à un objectif technique. Ceux avec un objectif exclusivement esthétique sont en effet beaucoup plus rares. C'est pourtant le cas des produits où la raison principale d'achat est d'être « esthétique ». Par exemple, pour un bijou plaqué or, le contrôle visuel qui sera réalisé se limitera souvent à détecter les zones sans plaquage et, plus rarement, les zones où les plaquages sont esthétiquement insatisfaisants. Pour reprendre ce que nous avons dit dans le Chapitre 1, c'est la première dimension de la qualité du produit relative aux fonctions de base du produit, i.e. sa performance, qui est privilégiée. À l'inverse, certains produits où la raison principale d'achat est d'être « fonctionnellement » corrects, comme un roulement mécanique intégrant

des soudures, le contrôle visuel qui sera réalisé pourra aller au-delà d'une simple détection d'une soudure défailante et inclure également un contrôle d'aspect de la soudure.

Il semble que le contrôle visuel doive désormais de plus en plus répondre simultanément aux deux objectifs, technique et esthétique. Cela est particulièrement vrai en ce qui concerne le contrôle d'aspect des surfaces d'un produit, l'apparence du produit occupant une place de plus en plus importante dans les attentes des clients et au moment de leur choix du produit. Au-delà de la dimension esthétique, l'aspect de surface peut en effet contribuer de manière très significative à ce que le client ait une "bonne" perception de la qualité du produit [Creusen 05].

Un contrôle visuel, surtout lorsqu'il cible l'objectif esthétique du produit, est pour l'instant peu maîtrisé dans les entreprises. Le paragraphe suivant liste quelques-unes des pratiques utilisées par les entreprises pour accompagner le contrôle visuel de leurs produits.

1.2. LES PRATIQUES EN CONTRÔLE VISUEL

Le contrôle visuel a fait jusqu'à présent l'objet de nombreuses publications. Celles-ci, pour la plupart d'entre elles, concernent le contrôle visuel visant à détecter la présence d'un défaut sur un produit. Megaw (1979), par exemple, recense les principaux facteurs ayant une influence sur la détection d'un défaut : acuité visuelle, éclairage, temps d'inspection et feedback [Megaw 79]. D'autres études ont poursuivi ce travail en essayant de comprendre encore davantage l'influence de ces facteurs sur les résultats du contrôle visuel. Par exemple, dans Lee *et al.* (2009) [Lee 09], c'est l'influence du grossissement lors du contrôle visuel qui est étudiée, dans [Garaas 08] c'est l'influence du temps de contrôle, dans [Taylor 04] celle du bruit, et dans [Jebaraj 99] celle de la distance de vision et des caractéristiques oculomoteurs.

Ces études, nous l'avons dit précédemment, ont en commun d'associer au contrôle visuel un objectif principalement technique. Pour cet objectif, la détection est une étape fondamentale, bien davantage que ne l'est l'étape de décision qui suit. Les défauts recherchés sont en effet généralement parfaitement ciblés (une fissure, un point de corrosion, etc.) et le contrôle consiste à s'assurer de la présence ou de l'absence de ces défauts sur le produit. La décision du contrôleur se limite donc à refuser le produit si le défaut est présent et à l'accepter sinon.

Pour des contrôles plus avancés, des tolérances sont parfois définies pour certains défauts (par exemple, le produit sera jugé non conforme si la longueur de la rayure détectée excède 0,5 cm). Dans ce cas, l'entreprise met à la disposition des contrôleurs des fiches détaillant les critères d'acceptation de ces défauts. La Figure 2.1 montre l'exemple d'une fiche de ce type pour un contrôle visuel réalisé sur une soudure. Le document spécifie les défauts à détecter (surépaisseur, manque d'épaisseur, caniveau) et, pour chacun d'eux, précise les limites admissibles en fonction du produit contrôlé et de la position du défaut sur le produit.

Une autre pratique répandue dans l'entreprise pour accompagner le contrôle visuel est d'utiliser une panoplie ou une photothèque. Une panoplie contient des exemples de produits présentant

chacun un défaut susceptible d'être détecté. La Figure 2.2 montre un exemple de panoplie pour le contrôle visuel d'un stylo de luxe.

LES CRITERES D'ACCEPTATION DES DEFAUTS					
3.3 – Limite d'acceptation des surépaisseurs, manques d'épaisseur et caniveaux (tableau 2)					
Désignation des défauts	Position des défauts	Dimension maximale admissible			
		Appareils de coef : 1	Appareils de coef : 0,85	Autres appareils	
Surépaisseur d'un assemblage bout à bout	A l'endroit et à l'envers dans le cas d'une soudure reprise	1	Un dixième de la largeur de la soudure au point considéré augmenté de 2 mm		
	A l'envers dans le cas d'une soudure non reprise	2	3 mm	4 mm	5mm
Manque d'épaisseur d'un assemblage bout à bout	A l'endroit	3	0		
	A l'envers (cas général)	4	0		
	A l'envers (cas particulier d'une soudure exécutée en position plafond sans reprise)	4	La plus petite des valeurs suivantes : 2mm ou un dixième de l'épaisseur de la pièce la plus mince.		
Caniveau		5	Profondeur 0,5 mm Longueur (1)		
			10 mm	20 mm	40 mm

(1) Deux caniveaux sont assimilés à un caniveau unique si la distance qui les sépare n'excède pas 6 fois la longueur du plus petit d'entre eux.

Figure 2.1 Contrôle visuel d'une soudures⁶

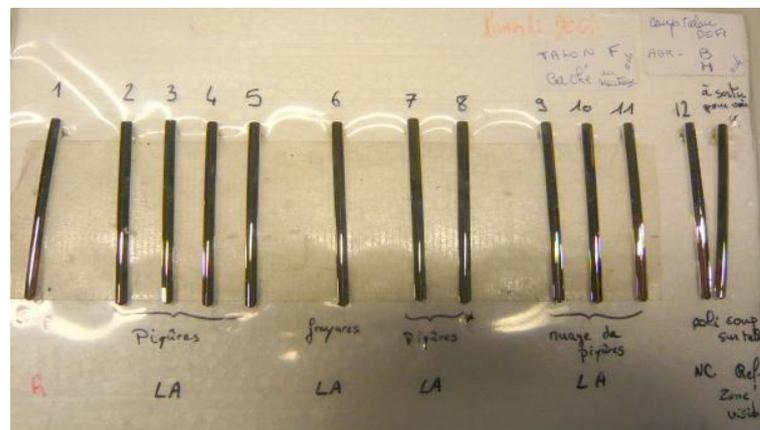


Figure 2.2 Un exemple de panoplie pour le contrôle visuel d'un stylo⁷

Lorsque le nombre de produits est trop grand, lorsque le nombre de défauts possibles est trop important ou lorsqu'il est difficile de conserver des produits, c'est une photothèque qui est

⁶ [ww2.cnam.fr/physique//DOCUMENTS/POLYS/PHR103/Le%20soudage-%20le%20visuel.pdf]

⁷ Source ST Dupont - Faverges

utilisée. La Figure 2.3 montre l'exemple d'une photographie montrant les défauts possibles sur une jonction bout à bout d'un tube inoxydable.

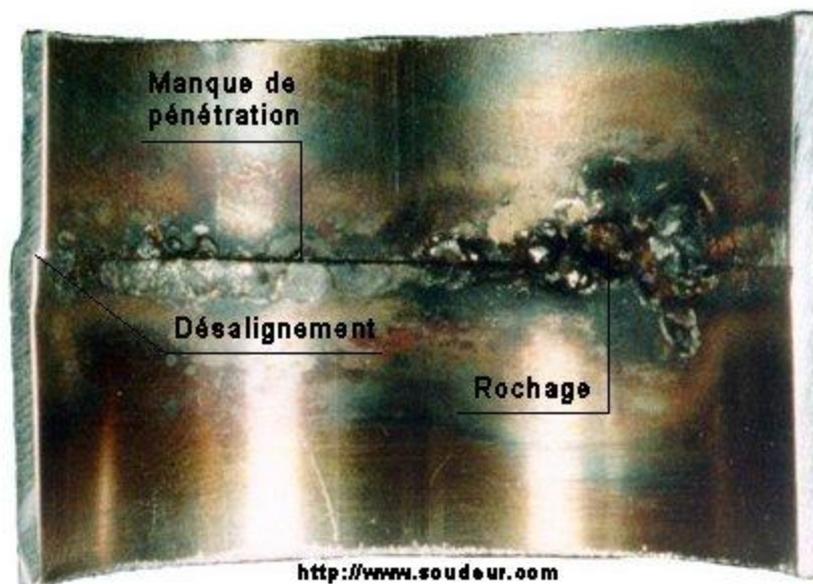


Figure 2.3 Un exemple de photographie illustrant les défauts sur une jonction sur un tube en inox ⁸

Ces deux types de pratiques, fiche de description des défauts et/ou panoplie-photothèque, ont l'avantage de faire partager aux contrôleurs la connaissance de ce qui doit être visuellement contrôlé et la connaissance de ce qui doit être accepté ou refusé. Les deux supports contribuent à améliorer de manière significative les résultats du contrôle visuel. Cela est particulièrement vrai lorsque l'objectif du contrôle visuel est un objectif technique. Cela est en revanche moins vrai lorsque le contrôle visuel a un objectif esthétique. Le Tableau 2.1 montre par exemple les résultats d'un contrôle visuel réalisé dans l'entreprise S.T. DUPONT. Le contrôleur devait décider, en fonction de critères exclusivement esthétiques, si le produit devait être accepté (C) ou refusé (NC). Pour réaliser un test R&R, chacun des 4 contrôleurs a réalisé son contrôle sur les 18 produits, à 2 reprises, et un groupe d'experts a fourni les réponses correctes attendues (colonne Référence).

Sur les 18 produits contrôlés, seuls 3 d'entre eux (#1, #2 et #9) ont été jugés de manière identique, et cela malgré l'utilisation d'une panoplie et malgré une formation régulière des contrôleurs. Le Tableau 2.2 montre les résultats du test R&R qui a été effectué.

Si la répétabilité des résultats pour chaque contrôleur peut être jugée satisfaisante, leur reproductibilité par rapport aux valeurs de référence l'est beaucoup moins. Notons au passage que chacun de ces 18 produits ne présentait qu'une seule anomalie et que les résultats se révélaient encore moins bons dans le cas de la présence simultanée de plusieurs anomalies sur le produit.

⁸ www.soudeur.com

Tableau 2.1 Exemples de résultats d'un contrôle visuel avec objectif esthétique

n	Contrôleur 1		Contrôleur 2		Contrôleur 3		Contrôleur 4		Référence
	1°	2°	1°	2°	1°	2°	1°	2°	
1	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
2	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
3	NC	C	C	C	C	C	C	NC	NC
4	NC	NC	C	NC	NC	NC	NC	NC	NC
5	NC	NC	C	C	C	NC	NC	NC	C
6	NC	NC	NC	NC	C	C	NC	NC	NC
7	NC	NC	C	C	C	C	C	C	NC
8	C	C	C	C	C	C	C	C	NC
9	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
10	NC	NC	NC	NC	C	C	NC	C	NC
11	NC	C	NC	NC	NC	NC	C	NC	NC
12	C	NC	C	C	C	C	C	C	C
13	NC	NC	C	C	C	C	NC	NC	NC
14	NC	NC	NC	NC	C	C	NC	NC	NC
15	C	C	C	C	NC	C	C	C	C
16	C	C	NC	NC	C	NC	NC	NC	NC
17	NC	NC	C	C	NC	NC	NC	NC	NC
18	NC	NC	NC	NC	C	C	NC	NC	NC

Tableau 2.2 Résultats du test R&R

	Contrôleur 1	Contrôleur 2	Contrôleur 3	Contrôleur 4
Répétabilité (%)	83,3	94,4	83,3	83,3
Reproductibilité (%)	66,7	66,7	38,9	66,7

Pour réduire cette variabilité, une pratique courante de l'entreprise consiste à désigner un groupe d'experts ayant la connaissance des produits à refuser, ou à accepter, et auxquels les contrôleurs font appel lorsqu'ils rencontrent des difficultés à décider. Là encore, la reproductibilité est difficile à atteindre, comme nous l'avons constaté dans les entreprises avec lesquelles nous avons collaboré (voir Chapitre 3). Si ces experts possèdent effectivement une très bonne expérience des produits, leur perception de la qualité des produits, sur des critères esthétiques, est souvent très différente et dépend fortement de la fonction qu'ils occupent (SAV, production, qualité, commercial ou marketing).

Par rapport au contrôle visuel à objectif technique, le contrôle visuel à objectif esthétique présente plusieurs différences qui rendent difficiles le recours aux fiches d'acceptation et aux panoplies/photothèques. Le Tableau 2.3 résume ces différences.

Dans le cas d'un contrôle visuel à objectif technique, les défauts sont généralement bien identifiés et une liste de ces défauts peut être définie. Dans le cas d'un contrôle visuel avec un objectif esthétique en revanche, les défauts possibles sont très nombreux, ce qui rend quasi impossible la construction de fiches d'acceptation des défauts ou la création d'une panoplie

Tableau 2.3 Comparaison entre les types de contrôle visuel

	Objectif technique	Objectif esthétique
Quoi détecter	Nombre de défauts réduit Liste prédéfinie de défauts	Nombre de défauts possibles très important Liste exhaustive des défauts non disponible
Limites d'acceptabilité	Définies et précises Indépendantes ou linéairement dépendantes	Peu précises Dépendantes (linéairement ou non)
Décision sur la conformité	Binaire Références bien définies	Réponse après évaluation sur échelle d'intensité Références partiellement définies

présentant de manière exhaustive l'ensemble des défauts possibles. Même lorsqu'une photothèque des défauts est disponible, le contrôleur rencontre des difficultés à émettre un jugement pour des défauts observés sur des produits très différents parfois en termes de couleur, de forme ou de matière [Debrosse 10].

Pour un défaut identifié, les limites d'acceptation sont également plus difficiles à établir, le même défaut ayant un impact très différent selon, par exemple, son positionnement sur le produit, selon l'intensité de la lumière ambiante au moment du contrôle ou encore selon l'orientation du produit. La présence combinée de plusieurs défauts sur le produit a également une incidence sur leurs impacts respectifs sur la perception que l'on a du produit.

Enfin, la décision dans le contrôle visuel à objectif technique est généralement simple. Elle consiste pour le contrôleur à déclarer le produit non-conforme dès lors qu'une anomalie a été détectée ou lorsqu'une anomalie se situe hors des limites d'acceptabilité définies pour cette anomalie. Le contrôle visuel peut ainsi être vu comme un processus constitué de deux étapes, une étape de détection suivie d'une étape quasi automatique de décision. L'étape de détection est la plus critique dans ce type de contrôle visuel.

Dans le contrôle visuel à objectif esthétique, les limites d'acceptation pour un défaut, nous l'avons dit, sont difficiles à établir. La décision ne peut s'effectuer sans une évaluation préalable du défaut détecté, cette évaluation ayant pour rôle de quantifier l'intensité du défaut sur une échelle donnée. En fonction du résultat de cette évaluation, et en fonction d'autres critères comme, par exemple, le niveau d'exigence de finition défini pour le produit ou pour le client, la décision peut ensuite être prise. Le contrôle visuel peut ainsi être vu comme un processus non plus constitué de deux étapes, mais de trois : une étape de détection, une étape d'évaluation et une étape de décision. Contrairement à un contrôle visuel dont l'objectif est technique, l'étape d'évaluation est beaucoup plus critique.

Il semble qu'il faille renoncer à l'idée d'utiliser les pratiques utilisées pour un contrôle visuel avec un objectif technique pour les utiliser, du moins à l'identique, pour un contrôle visuel avec un objectif esthétique. La définition de nouvelles pratiques, ou l'adaptation des pratiques

existantes, suppose de bien comprendre ce que sont les spécificités du contrôle visuel. C'est l'objet du paragraphe qui suit.

2. CONTRÔLE VISUEL – ESTHÉTIQUE

2.1. QU'EST-CE QUI DOIT ÊTRE DÉTECTÉ ?

Le terme de "défaut" est utilisé fréquemment dans les publications décrivant ce qu'un contrôle visuel est amené à détecter. De manière très précise, un défaut peut être défini comme « *une déviation d'une caractéristique visuelle par rapport à son niveau ou état visé (généralement spécifié), et qui est suffisamment importante pour entraîner la non satisfaction d'une exigence* » [AFNOR 06a]. La définition se base sur l'idée qu'un état attendu existe et a été prédéfini pour la caractéristique visuelle examinée.

Ce terme de défaut est parfaitement adapté au contrôle visuel à objectif technique, le contrôleur ayant à juger non-conforme le produit si la caractéristique visuelle n'est pas dans l'état attendu (une manque d'épaisseur sur une soudure par exemple).

Cela est en revanche beaucoup moins évident dans le cas d'un contrôle visuel avec un objectif esthétique. Si l'on attend en effet que le contrôleur vérifie que la surface d'un produit présente un aspect satisfaisant, que signifie "aspect satisfaisant" ? Bien évidemment, il n'y a pas de surface parfaite, puisque à un niveau de grossissement donné, le contrôleur détectera toujours un écart plus ou moins important par rapport à la surface idéale [Baudet 11]. Le contrôleur doit donc vérifier si la surface présente une anomalie à un niveau de grossissement défini, et si c'est le cas, vérifier l'influence de cette anomalie sur la perception que pourra en avoir le client (la qualité perçue).

Nous avons vu dans le chapitre précédent que la perception est le résultat d'un traitement par le cerveau des énergies captées par nos récepteurs sensoriels. Dans notre cas, la surface d'un produit dégage une énergie. Si une anomalie est présente sur cette surface, elle va générer une interférence dans le flux d'énergie, une information parasite, un « bruit » qui rompt avec l'harmonie initiale de l'énergie déagée par la surface (par exemple, un léger changement de teinte qui casse l'homogénéité de teinte initiale de la surface). Ce bruit s'exprimera par un écart de relief, de couleur, de forme et/ou de contraste que l'œil est capable de percevoir (voir Chapitre 1).

Nous considérons que trois types d'écart peuvent être perçus par un contrôleur :

- Un écart par rapport à une référence (un produit "idéal") prenant la forme d'une différence de couleur, de texture ou de contraste par rapport à ce qui est attendu et qui a été préalablement défini par l'entreprise (Figure 2.4).



Produit Référence



Produit contrôlé

Figure 2.4 Un exemple d'écart par rapport à la référence (Source Fournier)

- Un écart par rapport aux intentions du concepteur prenant la forme d'une différence de couleur, de luminance ou de relief de la pièce entre parties adjacentes du produit. Dans la Figure 2.5, par exemple, le produit présente un écart de couleur (flèches jaunes) et un écart de relief (flèche noire) non souhaités par le concepteur du produit.



Figure 2.5 Un exemple d'écarts par rapport aux intentions du concepteur [Forslund 09]

- Un écart local, prenant la forme d'une différence de couleur, relief ou forme, résultant de la présence d'une tache, d'une rayure, etc. (Figure 2.6)



Figure 2.6 Deux exemples d'écart local

Lors de son contrôle visuel, le contrôleur est donc en charge de vérifier si le produit présente un écart. Il doit ensuite identifier le type d'écart concerné, puis caractériser l'anomalie à l'origine de cet écart pour quantifier son intensité. Pour l'aider à cela, les outils développés en analyse sensorielle peuvent être utilisés.

2.2. CARACTÉRISATION D'UNE ANOMALIE

Lors d'un contrôle visuel, le contrôleur est en charge de détecter un écart d'aspect sur la surface du produit, celui-ci pouvant prendre, nous venons de le voir, trois formes. Pour caractériser l'anomalie à l'origine de cet écart, l'analyse sensorielle peut être utilisée.

L'analyse sensorielle est une démarche qui aide à qualifier et quantifier l'intensité d'une perception sensorielle. Elle a largement fait ses preuves dans le domaine de l'agro-alimentaire pour exprimer les nuances d'une perception humaine (goût, toucher, ouïe, odorat ou vue) de manière identique à ce que pourrait produire un instrument de mesure.

Le plus souvent, l'analyse sensorielle est utilisée lors de la mise au point de nouveaux produits. Des contrôleurs entraînés doivent décrire objectivement des échantillons de produits et évaluer les ressemblances ou dissemblances entre plusieurs références. Les résultats permettent de comparer différents produits, d'évaluer l'incidence d'une modification du processus de fabrication sur ses qualités sensorielles, etc. L'analyse sensorielle est aussi utilisée lors du lancement de nouveaux produits ou lorsque l'on veut positionner un produit par rapport à d'autres produits concurrents. Elle peut également être utilisée comme un outil de contrôle qualité qui permet de vérifier la stabilité organoleptique d'un produit au cours du temps.

En revanche, très peu d'études évoquent l'application de l'analyse sensorielle dans le contrôle visuel. Les rares études qui l'ont fait concernent le contrôle d'aspect d'un produit en termes de forme, couleur, texture, etc. *Etaio et al.* (2010 et 2011) [Etaio 10] [Etaio 11] ont par exemple utilisé l'analyse sensorielle pour évaluer visuellement la qualité d'un vin, et *Pérez Elortondo et al.* (2007) [Pérez Elortondo 07] la qualité d'un fromage. Par contre, ces études ne donnent pas d'informations sur la manière de quantifier, lorsqu'un écart est présent, l'impact de cet écart sur la qualité perçue du produit.

En analyse sensorielle, il y a deux grands types de tests, les tests analytiques et les tests hédoniques.

Les tests analytiques servent à identifier et/ou évaluer les différences entre deux ou plusieurs produits tandis que les tests hédoniques servent à identifier les préférences des consommateurs entre deux ou plusieurs produits [Lawless 10]. Comme nous l'avons déjà dit, le but d'un contrôle visuel est de vérifier si un écart identifié sur le produit conduit à accepter ou à refuser le produit. Une analyse des préférences n'étant pas nécessaire, ce sont les tests analytiques qui peuvent être utilisés dans le contrôle visuel.

Les tests analytiques peuvent être divisés en deux sous-groupes [Depledge 09] :

- Les tests discriminatifs : ils sont utilisés pour déterminer la probabilité qu'une légère différence entre produits puisse être perçue (test triangulaire, test duo-trio, test A-non-A, etc.).
- Les tests d'analyse descriptive : ils sont utilisés pour quantifier une différence quand elle est clairement perçue (test de classement, test d'évaluation et profil sensoriel).

Dans le cas du contrôle visuel, les écarts sont clairement perçus. Ce sont donc les tests d'analyse descriptive qui sont les plus adaptés au contrôle visuel d'aspect. Le Tableau 2.4 résume les caractéristiques de chacun des tests d'analyse descriptive.

Tableau 2.4 Les caractéristiques des tests d'analyse descriptive

Test	Dimension	Objectif
Classement	Mono attribut Multi produit	Classer plusieurs attributs (présentés simultanément) par rapport à un seul attribut (par exemple, intensité de la couleur marron)
Évaluation	Mono attribut Mono/Multi produit	Évaluer un ou plusieurs produits (il n'y a pas besoin de les présenter simultanément) dans une échelle d'intensité par rapport à un seul attribut.
Profil	Multi attributs Mono/Multi produit	Évaluer tous les attributs, pour un ou plusieurs produits, pour construire le profil sensoriel du produit.

Le test du classement se base sur une comparaison relative d'un même attribut entre plusieurs produits pour en établir un classement. Le contrôle visuel s'appliquant à un seul produit, nous écartons ce type de test.

Le test d'évaluation est utilisable dans le cas de la présence d'un écart par rapport à une référence (par exemple, pour évaluer la différence entre la couleur du produit et celle d'un produit référent) et dans le cas d'un écart par rapport à l'intention du concepteur (par exemple, pour évaluer la différence de couleur entre deux composants voisins d'un produit). Il est en revanche plus difficilement utilisable dans le cas d'un écart local, particulièrement dans le cas où les produits contrôlés sont différents (par exemple, des couleurs ou des décors différents) ou dans le cas où cette anomalie peut être localisée à plusieurs endroits du produit. La Figure 2.7 montre par exemple qu'une même rayure (même longueur, largeur et profondeur) n'a pas le même impact sur la qualité perçue selon le décor du produit contrôlé ou selon la position de cette rayure sur le produit. Le contrôleur jugera le produit comme acceptable dans les cas « a » et « d » et non acceptable dans les cas « b » et « c » [Baudet 12].

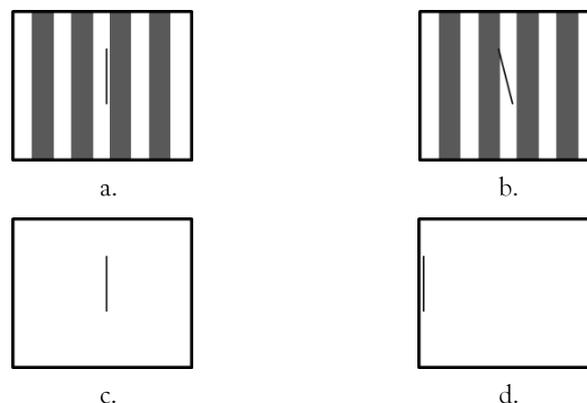


Figure 2.7 La même anomalie dans différentes situations [Baudet 12]

Dans cas d'un écart local, il est donc nécessaire de caractériser l'anomalie pour être en mesure ensuite de décider si le produit doit être accepté ou refusé. Pour cela, un profil sensoriel peut être établi. Par contre, contrairement à ce qui est classiquement réalisé, ce n'est pas le profil du produit qu'il s'agit d'établir, mais celui de l'anomalie présente sur le produit. Nous détaillons dans le paragraphe suivant comment établir le profil sensoriel d'une anomalie [Baudet 12].

2.3. PROFIL SENSORIEL D'UNE ANOMALIE

Nos travaux ont ciblé la caractérisation d'un écart local d'aspect sur la surface d'un produit. Cet écart, nous l'avons dit, peut être caractérisé en établissant un profil sensoriel de l'anomalie à l'origine de cet écart.

Avant de lister les attributs d'une anomalie qui peuvent être utilisés pour établir ce profil, nous identifions les types d'anomalies qui peuvent être à l'origine d'un écart local.

2.3.1. TYPES D'ANOMALIE

Pour l'écart local, deux classes d'anomalies peuvent être définies, les anomalies évolutives et les anomalies non-évolutives.

Une anomalie évolutive a une intensité qui peut évoluer au cours du temps. Un point d'oxydation, par exemple, pourra être perçu avec une intensité faible par le contrôleur lors de son contrôle, puis perçu par le client avec une intensité beaucoup plus importante après un certain temps d'utilisation. Un produit présentant une anomalie évolutive doit être refusé dès sa détection lors du contrôle visuel.

Une anomalie non-évolutive a une intensité qui ne varie pas dans le temps. La longueur et la profondeur d'une rayure par exemple n'évolueront pas durant l'intervalle de temps qui sépare le contrôle visuel du produit de son acquisition par le client. Pour ce type d'anomalies, le contrôleur doit donc être en mesure de caractériser cette anomalie.

Il existe de nombreuses anomalies non-évolutives pouvant être détectées sur la surface d'un produit. Nous avons cité la "rayure" comme exemple. Mais nous aurions pu également citer la "raye", la "frayure" ou encore la "griffure" qui sont des anomalies assez semblables à la "rayure" mais qui présentent des caractéristiques physiques spécifiques. Guerra (2008) a montré l'importance de réduire le vocabulaire utilisé lors d'un contrôle visuel pour décrire les anomalies rencontrées. Elle propose ainsi de décrire toute anomalie par une des quatre types d'anomalie suivantes, représentatives de l'ensemble des anomalies possibles [Guerra 08] :

- La Marque, qui désigne toute trace laissée sur la surface de la pièce représentant un manque de matière ponctuelle.
- La Tâche, qui désigne tout changement de couleur ponctuelle sur la surface.
- La Particule, qui désigne tout corps étranger présent sur la surface du produit.

- La Déformation, qui désigne tout changement de forme sur le produit, toute altération par rapport à sa forme initiale.

Cette classification était toutefois très bien adaptée au contexte industriel dans lequel Guerra a appliqué ses travaux. Pour être utilisable dans tout type d'entreprise et pour tout type de produit, nous l'avons adapté en distinguant :

- La Marque, qui désigne ce qui abîme la surface, qui génère une rupture dans la forme (par exemple, une rayure, une piqûre, un coup, etc.).
- L'hétérogénéité, qui désigne ce qui fait perdre à la surface son homogénéité (par exemple, une tâche, une différence de couleur, une différence dans la texture, etc.).
- La Pollution, qui désigne ce qui "pollue" la surface du produit (par exemple, un poil, une poussière, un point noir, etc.).
- La Déformation, qui désigne ce qui modifie la forme de la surface du produit (par exemple, une ligne de lumière irrégulière, un "trop arrondi", etc.).

2.3.2. LES ATTRIBUTS D'UNE ANOMALIE

Pour établir le profil sensoriel d'une anomalie, le choix des attributs doit être, dans la mesure du possible, en accord avec la norme NF ISO 11035 [ISO 95]. Ce standard définit l'attribut comme « *un terme renvoyant le sujet à un élément de la perception du produit* ».

Un attribut doit remplir certaines conditions, parmi lesquelles celle d'être pertinent par rapport au produit en décrivant l'une de ses dimensions et celle de pouvoir être évalué sur une échelle d'intensité. Il doit de plus respecter quelques principes, comme celui d'être précis (facilement compris par les contrôleurs) et celui d'être discriminatif (permettant de différencier les anomalies). Enfin, les attributs doivent de plus être indépendants entre eux, chaque attribut couvrant une caractéristique particulière de l'anomalie [ISO 95].

Nous avons listé ces attributs. Pour une meilleure compréhension, nous les avons séparés en deux groupes, cette distinction traduisant, comme le montre la Figure 2.8, la manière dont le contrôleur perçoit l'anomalie. Dans un premier temps, le contrôleur focalise son attention sur l'anomalie elle-même (la première étape de sa perception), puis il considère l'anomalie par rapport à son environnement (la deuxième étape de sa perception).

Les deux groupes d'attributs sont :

- La description factuelle de l'anomalie, qui se réfère aux caractéristiques intrinsèques de l'anomalie.
- La mise en perspective, qui se réfère à l'interaction entre l'environnement de l'anomalie et l'anomalie elle-même.

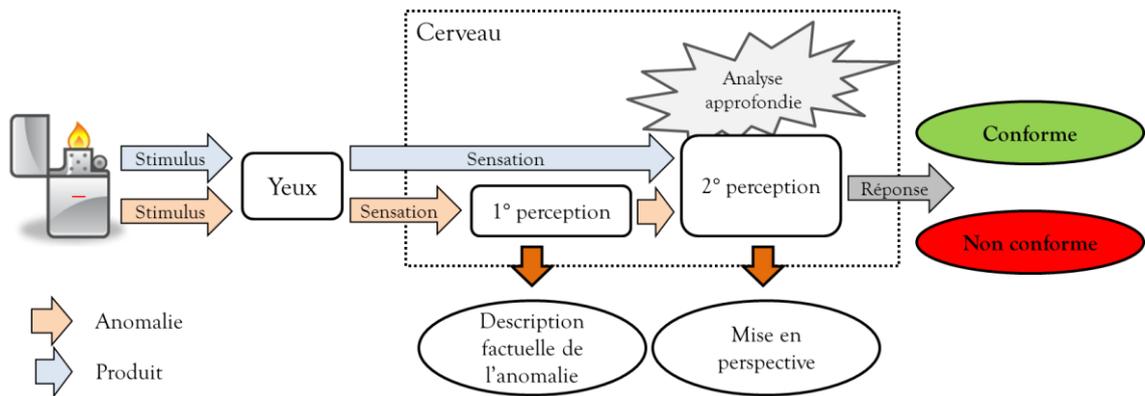


Figure 2.8 Perception de l'anomalie par le contrôleur

Groupe "Description factuelle de l'anomalie"

La description factuelle de l'anomalie possède deux paramètres :

- * Paramètre "Conditions d'observation", qui se réfère aux conditions nécessaires pour percevoir l'anomalie. Ce paramètre lui-même regroupe cinq attributs :
 - Attribut "Distance" (ou grossissement), qui caractérise la distance nécessaire pour percevoir l'anomalie. Cet attribut dépend du produit à contrôler (par exemple, l'anomalie est visible à 1 mètre pour un meuble ou anomalie visible seulement avec l'aide d'une lunette pour un composant de montre).
 - Attribut "Orientation" (ou effet lumière), qui caractérise le mouvement angulaire qui doit être fait pour percevoir l'anomalie. La Figure 2.9 illustre les trois phases distinctes du mouvement, appelées "effets lumière", que le contrôleur exécute lors d'un contrôle visuel [Guerra 08] :
 - Effet noir : le rayon lumineux arrive perpendiculairement sur la surface du produit et il est réfléchi perpendiculairement. Le contrôleur a une image mate de la surface de la pièce (Figure 2.9a.).
 - Effet brillant : le rayon lumineux incident renvoie un rayon réfracté de telle sorte que le contrôleur se place dans la trajectoire de ce rayon. Le contrôleur est ébloui par la surface de la pièce (Figure 2.9b.).
 - Effet miroir : le rayon lumineux incident arrive tangentiellement sur la surface. Le contrôleur voit son reflet sur la surface de la pièce (Figure 2.9c.).
 - Attribut "Intensité lumineuse", qui rend visible l'anomalie dans son environnement (par exemple, une anomalie visible à 1000lx et non visible à 200lx).
 - Attribut "Temps", qui représente le temps nécessaire pour que l'anomalie soit détectée lors de l'exploration de la pièce (par exemple, une anomalie immédiatement visible ou visible après des scrutations approfondies).

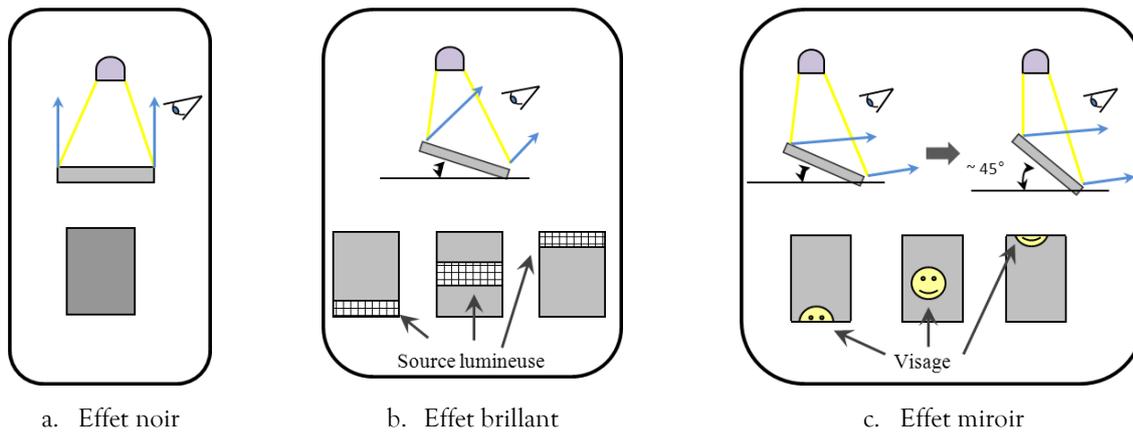


Figure 2.9 Les trois effets lumière [Baudet 12]

- Attribut "Sens", qui caractérise le sens d'observation dans lequel l'anomalie est visible (par exemple, une anomalie visible uniquement lorsque le produit est orienté verticalement).

Parmi ces cinq attributs, l'attribut "Temps" est le moins reproductible. En effet, il peut varier d'un contrôleur à un autre en fonction de la procédure d'exploration qu'ils utilisent. De plus, le facteur « chance » peut impacter significativement la valeur de cet attribut au moment de la détection.

Nous avons présenté dans le Chapitre 1 l'importance du contraste dans la perception de l'environnement, notre système visuel ne réagissant que lorsqu'il perçoit un contraste de luminance [Bagot 99]. Cette perception peut être traduite par l'un des quatre attributs listés : la "Distance", l'"Orientation", l'"Intensité lumineuse" ou le "Sens".

L'attribut "Distance" est très lié à la taille de l'anomalie. Par exemple, si deux anomalies renvoient un même contraste de luminance et se trouvent à la même distance d'observation, celle dont la taille est la plus importante sera plus facilement perçue. A l'inverse, c'est l'anomalie de la taille la plus faible qui sera perçue si elle génère un contraste avec l'environnement plus important que l'autre anomalie. Cet attribut peut caractériser indirectement la taille de l'anomalie ou l'intensité du contraste de luminance qu'elle génère.

L'attribut "Orientation" est responsable du contraste de luminance généré par l'anomalie. Quand le contrôleur opère un mouvement angulaire par rapport à la source lumineuse, il provoque en effet un contraste de luminance qui rendra perceptible l'anomalie. Cet attribut caractérise donc le niveau de perception d'une anomalie quand le produit est en mouvement, les effets lumières servant de repères pour mesurer le mouvement réalisé.

L'attribut "Intensité" est responsable de l'intensité du contraste de luminance. En effet, l'acuité visuelle augmente avec le niveau d'éclairage et, avec lui, la sensibilité au contraste de luminance [Floru 96]. Une anomalie qui est visible à un faible niveau d'éclairage

possède une grande capacité à générer un contraste de luminance important. Cet attribut caractérise donc l'intensité du contraste généré par l'anomalie.

L'attribut "Sens" est dépendant de l'interaction entre la forme du produit, les caractéristiques physiques de l'anomalie et la source lumineuse. Cet attribut caractérise le degré de perception de l'anomalie selon le rapport entre sa forme et celle du produit.

Les quatre derniers attributs décrits sont les plus adaptés pour décrire une anomalie. Pour que l'évaluation de ces attributs soit le plus répétable et reproductible, le choix du ou des attributs dépendra des caractéristiques du produit et des moyens de contrôle mis en œuvre par l'entreprise. Par exemple, l'attribut « Intensité lumineuse » ne sera utilisé que si le poste de contrôle dispose d'un moyen de faire varier l'intensité lumineuse, de façon reproductible à n'importe quel moment de la journée.

- * Paramètre "*Description de l'anomalie*", qui se réfère aux caractéristiques physiques de l'anomalie. Ce paramètre possède deux attributs :
 - Attribut "Taille", qui caractérise l'anomalie en termes de longueur, largeur, profondeur, surface, etc.
 - Attribut "Forme", qui désigne la forme de l'anomalie (allongée, ronde, etc.).

L'utilisation de ces deux attributs n'est pas systématique, même si tous les deux ont une grande influence sur notre perception. Il n'est en effet pas toujours facile pour l'entreprise de définir des références de taille ou de forme. Comme évoqué précédemment, l'attribut « Distance » peut palier en partie cette difficulté⁹.

Groupe "Mise en perspective"

La Mise en perspective possède deux paramètres :

- * Paramètre "*Contexte local*", qui se réfère à la manière dont l'anomalie est perçue dans son environnement local. Ce paramètre possède deux attributs :
 - Attribut "Contraste de forme", qui caractérise l'interaction de la forme de l'anomalie avec le décor ou le design du produit (par exemple, la forme de l'anomalie s'oppose à la forme générale du décor).

⁹ Paul Fitts (1954), a proposé une loi indiquant que le temps nécessaire pour atteindre une cible dépend de la distance (entre le point de départ et la cible) et de la taille de la cible [Boucher 11]. Cette loi est modélisée de plusieurs manières, la plus répandue étant :

$$T = a + b \log_2 \left(\frac{D}{L} + 1 \right)$$

T = temps ; « a » et « b » = constantes empiriques ; D = distance entre la cible et le point de départ ; L = largeur de la cible

- Attribut "Contraste de couleur", qui caractérise le rapport entre la couleur de l'anomalie et celle du décor du produit (par exemple, une anomalie de couleur noire sur un décor de couleur blanche).
- * Paramètre "Contexte global", qui se réfère à la manière dont l'anomalie est perçue dans le produit dans son ensemble. Le seul attribut identifié pour ce paramètre est :
- Attribut "Localisation", qui se réfère à la position de l'anomalie sur le produit (par exemple, l'anomalie se trouve à la façade extérieure visible du meuble).

Le décor d'un produit peut parfois aider à minimiser l'impact d'une anomalie, voire même dans certains cas, à la dissimuler complètement (« l'anomalie se noie dans le décor »). L'attribut "Contraste de forme" aide le contrôleur à faire cette distinction. Pour comprendre cette situation, un parallèle peut être fait avec un site internet dont les concepteurs s'attachent à prendre en compte des lois de Gestalt. La loi de proximité indique par exemple que, plus les objets sont proches, plus ils constituent un tout, une même structure. Le développeur rapproche donc des objets qui ont un rapport fonctionnel entre eux pour améliorer la lecture des informations du site par l'utilisateur [Boucher 11].

Ces lois de Gestalt expliquent en partie pourquoi une même anomalie peut être, selon le cas, plus ou moins perçue, et donc caractérisée par le contrôleur avec une intensité différente. Nous résumons ici ces lois.

- * La "Loi de similitude". Lorsque, sur une zone observée, plusieurs objets sont similaires, l'observateur les regroupe en un même objet en fonction de leurs attributs physiques (couleur, forme, orientation, etc.). Par exemple, dans la Figure 2.10, l'observateur ne perçoit pas un nombre d'objets égal au nombre de formes présentes, mais perçoit deux types d'objets (respectivement, des grands et petits ronds, des carrés et des ronds, et des rectangles verticaux et des rectangles inclinés).

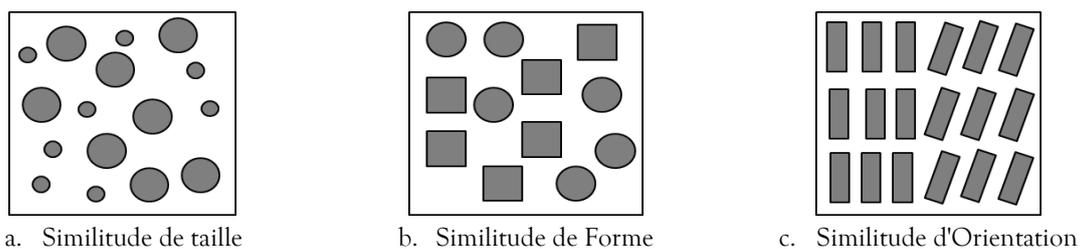


Figure 2.10 Loi de similitude

Cette loi s'applique à la perception d'une anomalie lors d'un contrôle visuel. En présence d'objets similaires, une anomalie qui se distingue de ces objets par un attribut physique particulier (une taille, une forme ou une orientation particulière) est aisément perçue. C'est ce que montre la Figure 2.11 où l'anomalie est rapidement perçue par un contrôleur parmi des objets similaires eux (respectivement le gros rond, le triangle et le rectangle incliné de 15° vers la gauche).

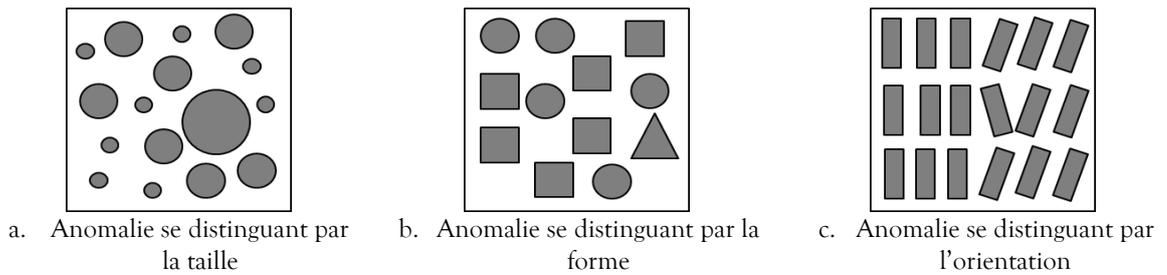


Figure 2.11 Perception de l'anomalie dans le cas d'objets similaires

En revanche, en présence d'objets non similaires, l'anomalie est plus difficilement perceptible. C'est ce que montre la Figure 2.12 dans lesquelles les mêmes anomalies que celles de la Figure 2.11 sont cette fois plus difficiles à percevoir, parce que les objets qui les entourent ne sont pas similaires.

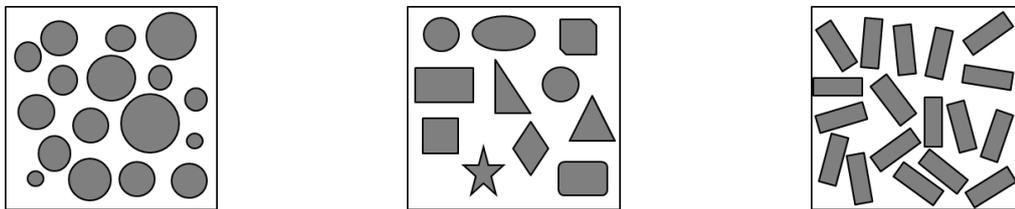


Figure 2.12 Perception de l'anomalie dans le cas d'objets non similaires

Nous en déduisons la règle suivante concernant la perception d'une anomalie :

- Une anomalie sera d'autant mieux perçue que les objets qui l'entourent sont similaires (en taille, en forme, en couleur, en orientation, ...).
- * La "Loi de proximité". Lorsque, sur une zone observée, plusieurs objets sont proches, l'observateur les regroupe en une même structure. Dans la Figure 2.13 par exemple, l'observateur ne perçoit pas dix objets, mais deux objets, chacun constitué de cinq ronds.

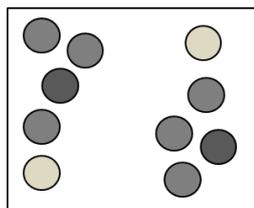


Figure 2.13 Loi de proximité

Cette loi s'applique également à la perception d'une anomalie lors d'un contrôle visuel. Une anomalie, éloignée des autres objets qui l'entourent, sera aisément perçue. C'est le cas par exemple du rond noir dans la Figure 2.14. mieux perçu sur le dessin de gauche qu'il ne l'est sur le dessin de droite.

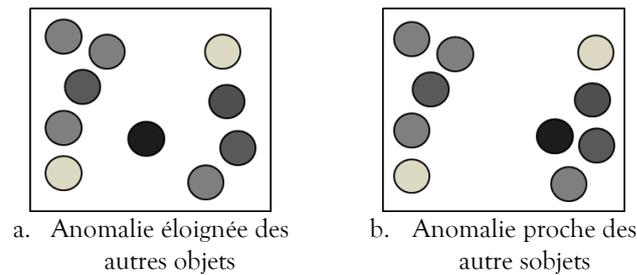


Figure 2.14 Perception de l'anomalie selon la loi de proximité

Nous en déduisons la règle suivante :

- Une anomalie est d'autant mieux perçue qu'elle est éloignée des autres objets de la zone observée.

* La "*Loi de bonne continuité*". Lorsque, sur une zone observée, les formes sont situées une même ligne géométrique, elles sont regroupées en une seule et même structure. Par exemple, dans la Figure 2.15, l'observateur ne perçoit pas neuf objets, mais un seul objet, formé par de l'alignement des ronds.

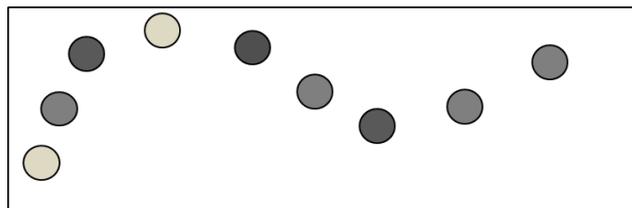


Figure 2.15 Loi de la bonne continuité

En contrôle visuel, une anomalie sera plus facilement perçue si elle ne situe pas dans le prolongement des autres objets présents sur la zone observée. Ainsi, dans la Figure 2.16, l'anomalie (le rond noir) sera davantage perceptible sur le dessin de gauche que sur le dessin de droite.

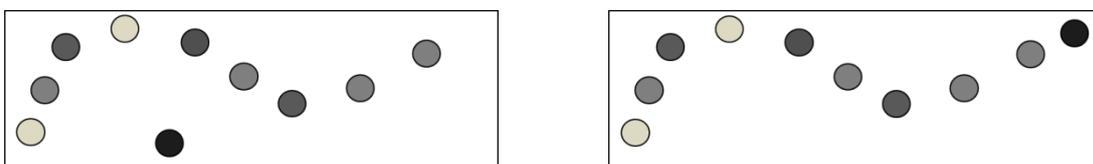


Figure 2.16 Perception d'une anomalie selon la loi de bonne continuité

Nous en déduisons la règle suivante :

- Une anomalie est d'autant mieux perçue qu'elle ne situe pas dans la continuité de la ligne géométrique formée par les autres objets.

- * La "Loi de clôture". Lorsque, sur la zone observée, une forme géométrique est incomplète, l'observateur tend à la fermer. Dans la Figure 2.17, l'observateur perçoit deux carrés, alors que celui de gauche n'est pas complètement fermé.

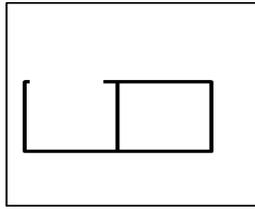


Figure 2.17 Loi de clôture

En contrôle visuel, une anomalie qui résulte d'une forme incomplète, pourra passer inaperçue. Dans la Figure 2.18, par exemple, les deux anomalies (contour insuffisamment marqué sur les deux carrés à gauche et contour inexistant sur le carré supérieur droit) sont difficilement perceptibles (le contrôleur perçoit deux carrés à gauche et un carré à droite).

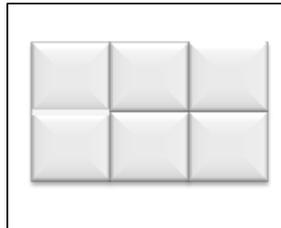


Figure 2.18 Perception de l'anomalie selon la loi de la clôture

Nous en déduisons la règle suivante :

- Une anomalie résultant d'une forme incomplète est difficile à percevoir.

L'attribut "Contraste de forme" a une influence significative sur la qualité perçue. C'est le cas également de l'attribut "Contraste de couleur".

Pour donner une valeur à cet attribut, l'entreprise doit au préalable décider de la manière de caractériser une couleur, celle-ci pouvant en effet être décrite en termes de luminosité/clarté, de teinte ou de saturation. La clarté est souvent utilisée dans le cas des produits métalliques pour caractériser des anomalies de type Marque. À l'inverse, la teinte est en utilisée dans le cas des produits non métalliques ou pour caractériser des anomalies du type Hétérogénéité ou du type Pollution.

Il est important de bien préciser cet attribut pour éviter des confusions lors de la caractérisation de l'anomalie. Cet attribut a, en effet, une grande influence dans la détection de l'anomalie. La couleur est le signal prédominant lors de l'exploration oculaire [Williams 66]. Lorsqu'elle est à l'origine d'un contraste important, l'anomalie est davantage perçue. La loi de la similitude, évoquée plus haut, contribue également à expliquer cela. Un objet est d'autant mieux perçu

qu'il n'a pas la même couleur que les autres groupes d'objets présents sur la zone observée. Sur la Figure 2.19, le rond noir sera plus facilement perçu en présence d'un groupe d'objets similaires (dessin de gauche) qu'en présence d'un groupe d'objets non similaires (dessin de droite).

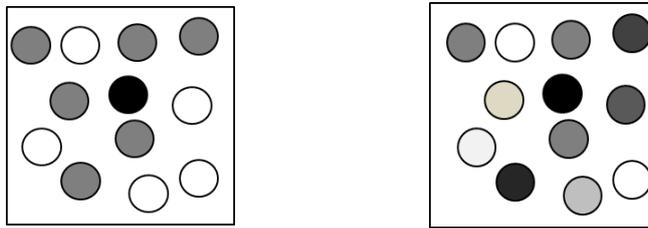


Figure 2.19 Le contraste de couleur dans la perception – Loi de similitude

La valeur de l'attribut « Localisation » peut également contribuer à diminuer l'intensité finale d'une anomalie. Par exemple, une anomalie visible sous tous les angles, ayant un fort contraste de couleur par rapport au décor, pourra être considérée comme acceptable par le contrôleur si elle se situe sur une partie cachée du produit (à l'intérieur d'un meuble, sur le fond d'un briquet, etc.). À l'inverse, une anomalie visible uniquement sous un angle et à l'origine d'un faible contraste de couleur pourra être jugée inacceptable par le contrôleur si elle se situe sur une partie apparente de la surface du produit (la façade d'un meuble, la face d'un briquet, etc.).

3. LE STANDARD DE L'ENTREPRISE

Le choix des attributs à utiliser pour caractériser l'anomalie est très important, ainsi que leur définition (l'ensemble des valeurs possibles). Il est également important que l'entreprise définisse un standard qui précise clairement ces définitions et soit partagé par les contrôleurs. Il existe trois types de standard qui peuvent être utilisés pour cela [Costell 02] :

- Le Standard Produit, qui correspond à une représentation (généralement sous la forme d'une panoplie ou d'une photothèque) du produit et de ses caractéristiques qui explicite les critères d'acceptation de ce produit.
- Le Standard Mental, constitué d'un expert ou d'un groupe d'experts, qui définit les caractéristiques sensorielles du produit qui doivent être obtenues.
- Le Standard Écrit, qui détaille sous la forme d'un document écrit l'ensemble des attributs critiques d'un produit qui déterminent son acceptation ou son rejet.

Dans le cas d'un contrôle visuel dont l'objectif est esthétique, l'utilisation d'un Standard Produit s'avère souvent difficile. Cela est particulièrement vrai lorsque les résultats de l'évaluation de l'anomalie dépendent de sa localisation sur le produit (voir Figure 2.7). Il en effet difficile de construire une panoplie montrant de manière exhaustive l'ensemble des anomalies possibles du produit selon leurs positionnements respectives sur le produit.

Le Standard Mental est au contraire mieux adapté. La norme ISO 8586-2 [ISO 94a] détaille précisément les capacités et les qualités attendues pour les experts devant constituer ce standard (Tableau 2.5).

Tableau 2.5. Les types de sujets en analyse sensorielle [ISO 94a]

Type de sujet	Définition	Qualités requises par rapport au niveau précédent
Sujet qualifié	Sujet sélectionné pour sa capacité à effectuer un essai sensoriel.	
Sujet expert	Sujet qualifié qui a une excellente acuité sensorielle, qui est entraîné à l'utilisation des méthodes d'analyse sensorielle et qui est capable d'effectuer de façon fiable l'analyse sensorielle de divers produits.	Bonne constance des jugements, à la fois au cours d'une session et d'une session à l'autre. Bonne mémoire à long terme.
Sujet expert spécialisé	Sujet expert qui a une expérience complémentaire de spécialiste du produit et/ou des procédés de fabrication et/ou de la commercialisation et qui est capable de réaliser l'analyse sensorielle du produit.	Accumulation de l'expérience dans le domaine de spécialisation concerné. Aptitude à la reconnaissance et l'évaluation des propriétés sensorielles très développée. Mémorisation de références (points de repères). Reconnaissance des descripteurs-clés. Esprit déductif qui puisse être appliqué à la résolution de problèmes. Bonne capacité à décrire et communiquer ses conclusions ou à entreprendre les actions appropriées.

La réalité montre que les experts d'un Standard Mental sont souvent désignés dans les entreprises parmi les collaborateurs qui ont la meilleure connaissance des produits, généralement parmi les responsables du marketing et/ou les responsable qualité. Au final, le choix de ces experts dépend souvent bien plus de leur position hiérarchique que de leurs capacités à réaliser une évaluation sensorielle des produits. L'utilisation efficace d'un standard Mental passe donc par un choix d'experts entraînés à l'utilisation des attributs de caractérisation d'une anomalie et partageant une vision parfaitement identique de ce qui est acceptable pour un produit. Cela n'est pas toujours facile à obtenir.

Les difficultés liées à l'utilisation d'un Standard Produit et/ou d'un Standard Mental peuvent être réduites avec l'utilisation en parallèle d'un Standard Écrit qui définira les attributs à utiliser pour caractériser chaque type d'anomalies. L'utilisation d'un Standard "Écrit" présente l'avantage de servir de support unique, commun et partagé par l'ensemble des contrôleurs. Nous résumons dans la suite les différentes formes que peut prendre un Standard Écrit.

3.1. LA GRILLE D'ÉVALUATION CRITÈRES/NIVEAUX

Le Tableau 2.6 donne l'exemple d'un Standard Écrit, que nous appelons « Grille critères/niveaux ». Cet exemple a été développé par le laboratoire SYMME pour une industrie horlogère pour quantifier une anomalie d'aspect relevée sur certains composants d'une montre.

Tableau 2.6 Grille Critères/Niveaux

	Vitesse de scrutation	Effet lumière	Tolérance à l'anomalie	Contraste	Perception par rapport à la fonction
1	Pas d'anomalie visible en condition standard d'observation				
2	Nécessite une scrutation locale approfondie et un effort pour retrouver le défaut.	Visible dans un angle bien particulier (un effet lumière)	L'anomalie se noie dans le décor, fait naturelle L'orientation et l'intensité (longueur, profondeur) est comparable au reste du décor	Pas de contraste de couleur	
3	Visible facilement en scrutation locale	Visible dans deux effets lumières	L'anomalie reste dans le sens, l'esprit du décor, mais ne fait pas naturelle, ne reflète pas la volonté du concepteur	Contraste faible de couleur	
4	Visible facilement en scrutation standard	Visible sous deux effets lumière + accroche l'œil	L'anomalie choque par son sens ou par son intensité l'esprit du décor est altéré	Contraste important	Perception que la fonction ou la durabilité est maintenue.
5	Le défaut apparaît instantanément sans scrutation particulière	Quel que soit l'effet lumière	L'anomalie choque par son sens ou par son intensité l'esprit du décor est altéré	Contraste important	Perception que la fonction, la solidité ou la durabilité est altérée
6	Visible instantanément, en priorité devant tout le reste	Quel que soit l'effet lumière	L'anomalie est telle qu'elle est extrêmement choquante.	Contraste très important	Non-conformité majeure par rapport à la définition du produit (manque matière, revêtement...), dégradation le rendant impropre.

Ce type de grille fait la correspondance entre les niveaux d'intensité de l'anomalie (dans l'exemple de 1 à 6) avec les critères retenus pour caractériser l'anomalie (dans l'exemple, la *vitesse de scrutation* nécessaire pour percevoir l'anomalie, l'*effet lumière* qui la rend perceptible, la *tolérance à l'anomalie* qui caractérise le lien entre l'anomalie et son environnement proche, le *contraste* de couleur généré par l'anomalie, et la *perception de l'anomalie par rapport à la fonction* attendue du produit). Pour le contrôleur, il s'agit de faire "coller" sa perception de l'anomalie avec les différentes modalités énoncées sur chaque ligne de la grille. S'il y parvient, il est ensuite en situation de pouvoir déduire la valeur de l'intensité à affecter à l'anomalie.

L'avantage de cette grille est d'explicitier quels sont les différents critères à utiliser pour caractériser l'anomalie. Elle permet également de décrire les différentes valeurs attendues pour chacun de ces critères lors de cette observation. Elle permet enfin de faire un lien précis entre ce qui est perçu et le niveau d'intensité à attribuer à l'anomalie. Elle limite enfin la subjectivité associée à la détermination de la valeur d'un critère puisque celle-ci peut être confirmée par l'observation des valeurs des autres critères figurant sur la même ligne. Par exemple, si

l'évaluateur perçoit l'anomalie comme instantanément visible, sa perception lui sera confirmée s'il perçoit l'anomalie sous tous les effets lumière et s'il perçoit un contraste de couleur très important (ligne 6 de la grille).

Cette grille suppose en revanche que chaque perception du contrôleur puisse coïncider parfaitement avec une des lignes de la grille, c'est-à-dire que toutes les valeurs observées pour les différents critères se situent nécessairement et uniquement sur la même ligne. Elle suppose également une bonne compréhension des critères par les contrôleurs et un entraînement important.

3.2. LA GRILLE D'ÉVALUATION ARBORESCENTE

La Figure 2.20 montre une autre forme de Standard Écrit. Cette arborescence exprime le raisonnement hiérarchique à suivre par le contrôleur pour effectuer son contrôle visuel.

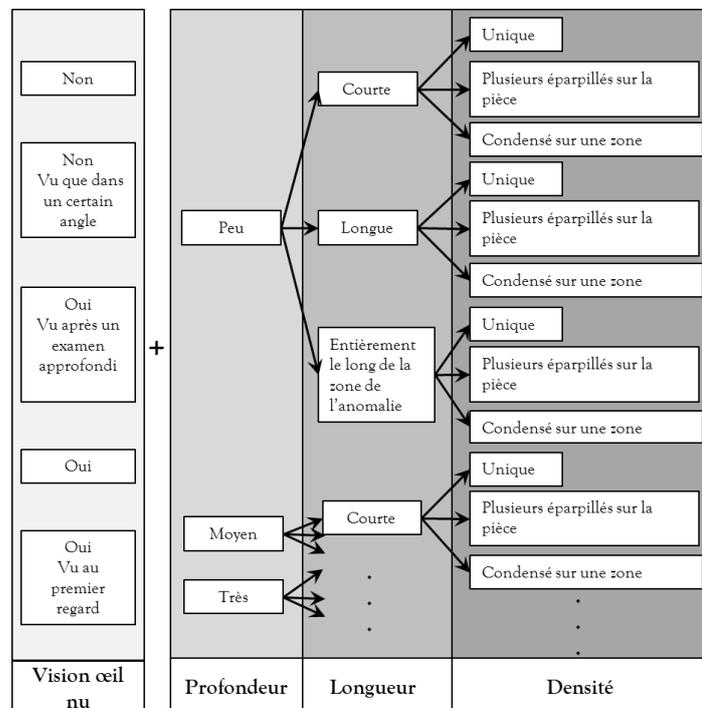


Figure 2.20 Grille arborescente pour une anomalie de type « Marque » [Guerra 08]

En complément, une table dont la Tableau 2.7 donne un exemple, fait le lien entre la valeur d'intensité d'une anomalie de type Marque (de 1 à 6 dans l'exemple) et la combinaison des valeurs observées pour les différents critères l'anomalie (dans l'exemple, les valeurs observées pour les critères *Vision à l'œil nu*, *Profondeur*, *Longueur* et *Densité*) [Guerra 08].

Contrairement à la grille Critères/Niveaux, la grille arborescente autorise plusieurs combinaisons de valeurs de critères pour un même niveau d'intensité. Dans l'exemple, c'est le

Tableau 2.7 Grille arborescente

Intensité	Vision à l'œil nu	Marque		
		Profondeur	Longueur	Densité
1	Non	peu	courte	Unique
2	Non Vu que d'un certain angle	peu	courte	plusieurs éparpillés sur la pièce
3	Oui Vu après un examen approfondi	peu	longue	Unique
		moyen	courte	Unique
		moyen	courte	plusieurs éparpillés sur la pièce
4	Oui	peu	courte	condensé sur une zone
		moyen	courte	condensé sur une zone
5	Oui	peu	entièrement le long de la pièce	unique
		très	courte	unique
6	Oui Vu au premier regard	moyen	longue	unique
		moyen	entièrement le long de la pièce	unique
		très	courte	plusieurs éparpillés sur la pièce
		très	courte	condensé sur une zone
		très	longue	unique
		très	entièrement le long de la pièce	unique

cas du niveau 4 qui est à associé à la fois à une marque peu profonde et à une marque moyennement profonde dans le cas où cette marque est courte et est localisée à un seul endroit. Cette grille présente également, et surtout, l'avantage de donner un mode opératoire au contrôleur pour le contrôle visuel qu'il doit réaliser. Ainsi, dans l'exemple, le contrôleur est amené à considérer, dans l'ordre, la vision, la profondeur, la longueur puis la densité de la marque. Chaque valeur attribuée à un critère réduit l'espace des possibilités pour les autres critères à examiner.

Une des limites de cette grille résulte de sa structure arborescente qui limite le nombre de critères. L'ajout d'un critère multiplie en effet de manière importante le nombre de combinaisons de valeurs des critères à considérer (dans l'exemple, 7 combinaisons seulement avec deux critères, mais 22 combinaisons avec trois critères et plus de 60 combinaisons avec quatre critères).

3.3. LA GRILLE D'ÉVALUATION INDEXÉE

La grille d'évaluation indexée est une autre forme de Standard Écrit. Le Tableau 2.8 donne un exemple d'une grille indexée pour évaluer la fraîcheur d'un poisson.

Pour construire cette grille, les différents critères d'évaluation sont listés, ainsi que les caractéristiques de chaque critère et les valeurs possibles pour chaque caractéristique. Par exemple, le critère *Yeux* se caractérise par une *Pupille* pouvant être *Noire*, *Opaque* ou *Grise*. Une

Tableau 2.8 Grille indexée [www.qim-eurofish.com]

Quality parameter		Description	Score
Appearance	Skin	Bright, indecent pigmentation	0
		Rather dull, becoming discolored	1
		Dull	2
	Stiffness	In rigor	0
		Firm, elastic	1
		Soft	2
		Very Soft	3
Eyes	Cornea	Clear	0
		Opalescent	1
		Milky	2
	Form	Convex	0
		Flat, slightly sunken	1
		Sunken, concave	2
	Pupil	Black	0
		Opaque	1
		Grey	2
Gills	Color	Bright	0
		Less colored, becoming discolored	1
		Discolored, brown spots	2
		Brown, discolored	3
	Smell	Fresh, seaweed, metallic	0
		Neutral, grassy, musty	1
		Yeast, bread, beer, sour milk	2
		Acetic acid, sulphuric, very sour	3
	Mucus	Clear	0
		Milky	1
		Milky, dark, opaque	2
	Flesh, filets	Color	Translucent, bluish
Waxy, milky			1
Opaque, yellow, brown spots			2
Blood	Color	Red	0
		Dark red	1
		Brown	2
Quality Index			0 - 23

valeur est associée à chaque caractéristique (33 valeurs dans l'exemple) et l'index de qualité est calculé à partir de la somme de ces valeurs (de 0 à 23 dans l'exemple).

Cette grille présente l'avantage de lister de manière exhaustive l'ensemble des observations possibles que le contrôleur peut avoir sur une anomalie. Cela limite nécessairement la subjectivité de son contrôle. En revanche, contrairement à la grille arborescente, elle ne montre pas la démarche opératoire à suivre par le contrôleur.

3.4. LA GRILLE D'ÉVALUATION HIÉRARCHIQUE CORRIGÉE

Prenant en compte les avantages et les limites des grilles présentées précédemment, nous proposons la grille hiérarchique corrigée dont le Tableau 2.9 donne un exemple.

Tableau 2.9 Grille hiérarchique corrigée

Cotions d'observation			Description de l'anomalie		Contexte Local		Contexte global	Intensité totale	
Distance	Effet lumière	Sens	Forme	Taille	Contraste de forme	Contraste de couleur	Localisation		
D	EL	S	F	T	CF	CC	L		
3	Visible à 30cm	Visible sous certains angles +0 →	visible dans un sens +0 →	rond +0 →	petit +0 →	se noie dans le décor -1 →	aucun -1 →	criticité de la face = 1 +0 →	1
									2
4	Visible à 1 m	Visible sous tous les angles +0 →	visible dans tous les sens +0 →	allongé +0 →	moyen +0 →	constraste avec le décor +0 →	faible +0 →	Criticité de la face = 2 +0 →	3
									4
5	Visible à 3 m	+1 →	+1 →	+1 →	grand +2 →	décor uni +1 →	important +1 →	Criticité de la face = 3 +1 →	5
									6
									7
									8
									9
									10
									11
									12
									13

Cette grille reprend l'ensemble des attributs que nous avons listés (voir § 2.3.2) pour caractériser une anomalie. Le caractère hiérarchique de la grille est apporté par l'attribut "Distance" du groupe "Description factuelle de l'anomalie".

Dans un premier temps, le contrôleur évalue la distance à laquelle l'anomalie devient visible, de laquelle il déduit une valeur à donner à l'attribut "Distance" (valeur 3 à 5 dans l'exemple). Cette première évaluation pourra ensuite être corrigée en fonction des autres attributs examinés. Les corrections successives apportées aboutissent au final à une valeur d'intensité totale pour l'anomalie contrôlée. Par exemple, si une anomalie est visible à 30 cm, qu'elle n'est visible que sur certains angles, visible dans un sens, de forme ronde, que sa taille est petite, qu'elle se "noie" dans le décor, qu'elle génère un contraste de couleur faible et qu'elle se situe sur une face de criticité égale à 1, le contrôleur attribuera une valeur de 2 à l'intensité globale de l'anomalie.

Par rapport aux autres grilles, la grille hiérarchique corrigée permet de prendre en compte plusieurs combinaisons de valeurs d'attributs. Elle présente également l'avantage de tracer simplement le raisonnement que fait le contrôleur lorsqu'il évalue l'anomalie. Le vocabulaire utilisé dans la grille est volontairement restreint, et cela de manière à améliorer sa compréhension par les contrôleurs (et, éventuellement, être traduisible dans une autre langue). Chaque terme de la grille (par exemple, *à bout de bras*, *loin*, pour la distance) devra toutefois faire l'objet d'une instruction particulière accompagnée des références et de formations adaptées.

4. CONCLUSION

Ce chapitre visait à mieux comprendre ce qu'est le contrôle visuel, ses objectifs et les pratiques utilisées par les entreprises pour le mettre en œuvre. Nous avons montré que ce type contrôle couvre deux objectifs, parfois distincts, parfois complémentaires : un objectif technique (s'assurer visuellement que le produit ne présente aucune anomalie ne satisfaisant pas la qualité attendue) et un objectif esthétique (s'assurer que le produit ne présente aucune anomalie pouvant dégrader la qualité perçue par le client).

Les publications réalisées dans ce domaine, nous l'avons dit, concernent principalement le contrôle visuel dont l'objectif est technique. C'est donc sur le contrôle visuel dont l'objectif est esthétique que notre étude a principalement porté. Nous avons d'abord montré que c'est un écart que le contrôleur était en charge de détecter, cet écart pouvant être de trois types : écart par rapport à une référence, un écart par rapport aux intentions du concepteur et un écart local. Nous avons ensuite montré comment l'analyse sensorielle pouvait contribuer à identifier et à caractériser une anomalie à l'origine d'un écart local.

Parmi les tests de l'analyse sensorielle, nous avons détaillé comment le profil sensoriel pouvait servir à caractériser une anomalie. Nous avons d'abord listé les quatre types génériques d'anomalies susceptibles de couvrir l'ensemble des anomalies qu'un contrôle visuel pouvait être amené à détecter, et cela quel que soit le type de produit. Nous avons ainsi distingué les anomalies de type Marque, les anomalies de type Hétérogénéité, les anomalies de type Pollution et les anomalies de type Déformation. Nous avons ensuite listé l'ensemble des attributs pouvant être utilisés pour établir le profil sensoriel d'une anomalie. Lors de son contrôle visuel, le contrôleur opère cette caractérisation en donnant des valeurs aux attributs des paramètres "Conditions d'observation" et "Description de l'anomalie" du groupe "Description factuelle de l'anomalie" et aux attributs des paramètres "Contexte Local" et "Contexte Global" du groupe "Mise en perspective". Au total, ce sont jusqu'à dix attributs qui peuvent être ainsi quantifiés pour caractériser une anomalie : "Distance", "Orientation", "Intensité lumineuse", "Temps", "Sens", "Taille", "Forme", "Contraste de forme", "Contraste de couleur" et "Localisation". Nous avons également détaillé comment les lois de Gestalt aidaient à comprendre pourquoi le contraste de couleur ou de forme d'une anomalie pouvait être plus ou moins perçu par le contrôleur et ainsi, comment l'intensité d'une même anomalie pouvait varier d'une situation à l'autre.

La caractérisation d'une anomalie se base sur l'utilisation d'un standard. Nous avons décrit les trois types de standard pouvant être utilisés dans un contrôle visuel : le Standard Produit, le Standard Mental et le Standard Écrit. Nous avons ensuite détaillé les différentes formes possibles de standard Écrit (grille Critères/Niveaux, grille arborescente, grille indexée) pour terminer par notre proposition d'une grille d'évaluation adaptée au contrôle visuel : la grille hiérarchique corrigée.

CHAPITRE 3

LE CONTRÔLE VISUEL : MISE EN ŒUVRE ET MESURE D'EFFICACITÉ

Le Chapitre 2 a introduit le contrôle visuel en montrant, en particulier, qu'il pouvait être utilisé pour atteindre deux objectifs distincts : un objectif technique (s'assurer que le produit correspond aux spécifications techniques) et un objectif esthétique (s'assurer que le produit ne présente pas d'écart d'aspect par rapport à un produit référent ou qu'il présente un écart acceptable). Nous avons également détaillé comment il était possible de caractériser une anomalie à l'origine d'un écart perçu sur la surface d'un produit. Nous avons enfin montré quel type de standard écrit pouvait être utilisé pour accompagner le contrôle visuel.

Mais le contrôle visuel ne se limite pas à la caractérisation d'une anomalie. Il faut au préalable que le contrôleur ait pu détecter cette anomalie. Il faut ensuite, après avoir caractérisé cette anomalie, qu'il puisse décider si le produit contrôlé doit être accepté ou refusé. C'est l'ensemble de ces étapes, et leur maîtrise, qui conditionnent l'efficacité d'un contrôle visuel.

L'objectif de ce chapitre est donc d'abord de proposer un cadre méthodologique général pour la mise en place et la maîtrise d'un contrôle visuel.

Nous détaillerons ensuite comment mesurer l'efficacité d'un contrôle visuel et comment aider l'entreprise à décider des premières actions spécifiques à mener pour améliorer cette efficacité.

1. LE CONTRÔLE VISUEL : UN CADRE MÉTHODOLOGIQUE

Colquhoun (1964) a été l'un des premiers à proposer une approche méthodologique du contrôle visuel avec une décomposition en trois étapes [Colquhoun 64] :

- La détection, qui consiste à localiser, si elle existe, une anomalie sur la surface de la pièce.
- Le jugement, qui vise à vérifier si l'anomalie dépasse ou non les limites de tolérance définies par le standard, et donc, si elle constitue un défaut.

- La décision, qui amène le contrôleur à décider si le produit doit être accepté ou refusé.

L'étape de décision étant très liée à l'étape de jugement (la pièce est acceptée si l'anomalie est dans les limites de tolérance, elle est refusée sinon), Drury (1975) a proposé ensuite de ne distinguer que deux étapes dans le contrôle visuel : l'étape d'exploration et l'étape de décision [Drury 75]. Sur la base de cette décomposition, la Figure 3.1 détaille comment un contrôle visuel s'effectue et détermine son résultat.

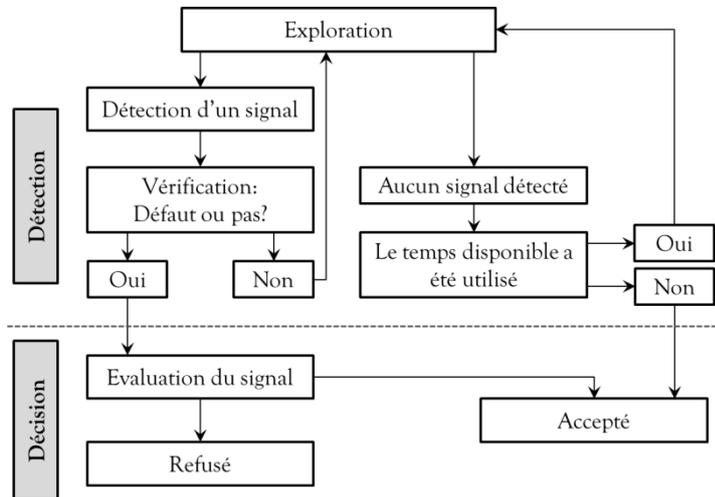


Figure 3.1 Modèle de contrôle visuel [Rebsamen 10]

Ce modèle est très bien adapté pour un contrôle visuel avec un objectif technique. Il l'est en revanche beaucoup moins pour un contrôle visuel avec un objectif esthétique. Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les limites de tolérances utilisées lors de la détection, puis de l'évaluation, ne sont généralement pas simples à définir. Comment, par exemple, fixer des limites de tolérance, sur un contraste de couleur observé sur une surface ?

L'impact de la localisation de l'anomalie sur le produit pose également un autre problème. Comment prendre en compte par exemple le principe qu'un même contraste, selon sa localisation, puisse amener à refuser ou à accepter le produit ?

Pour répondre à cette difficulté, Guerra (2008) a proposé que le contrôle visuel soit décomposé en trois étapes distinctes [Guerra 08] :

- L'exploration, qui inclut l'observation du produit jusqu'à, si elle existe, la détection de l'anomalie.
- L'évaluation, qui inclut la qualification de l'anomalie et la quantification de son intensité.
- La décision, qui amène le contrôleur à accepter le produit, ou à le refuser, en fonction de la localisation de l'anomalie.

Le simple principe d'évaluer une anomalie indépendamment de la décision qui sera prise ensuite concernant l'acceptabilité du produit, permet d'améliorer de manière significative les

résultats du contrôle visuel. C'est en tout cas ce qu'a montré Guerra quand elle a appliqué ce principe dans une entreprise horlogère [Guerra 08].

En ce qui nous concerne, cette approche nécessite d'être adaptée. Nous avons montré dans le Chapitre 2 (voir Figure 2.8) que la caractérisation d'une anomalie inclut sa description factuelle (conditions d'observation et description de l'anomalie) et sa mise en perspective (contexte local et global). La localisation de l'anomalie sur le produit doit donc être prise en compte dès la l'étape d'évaluation, et non pas à l'étape de décision comme le propose Guerra (2008). La Figure 3.2 décrit le modèle, adapté de Guerra, que nous proposons.

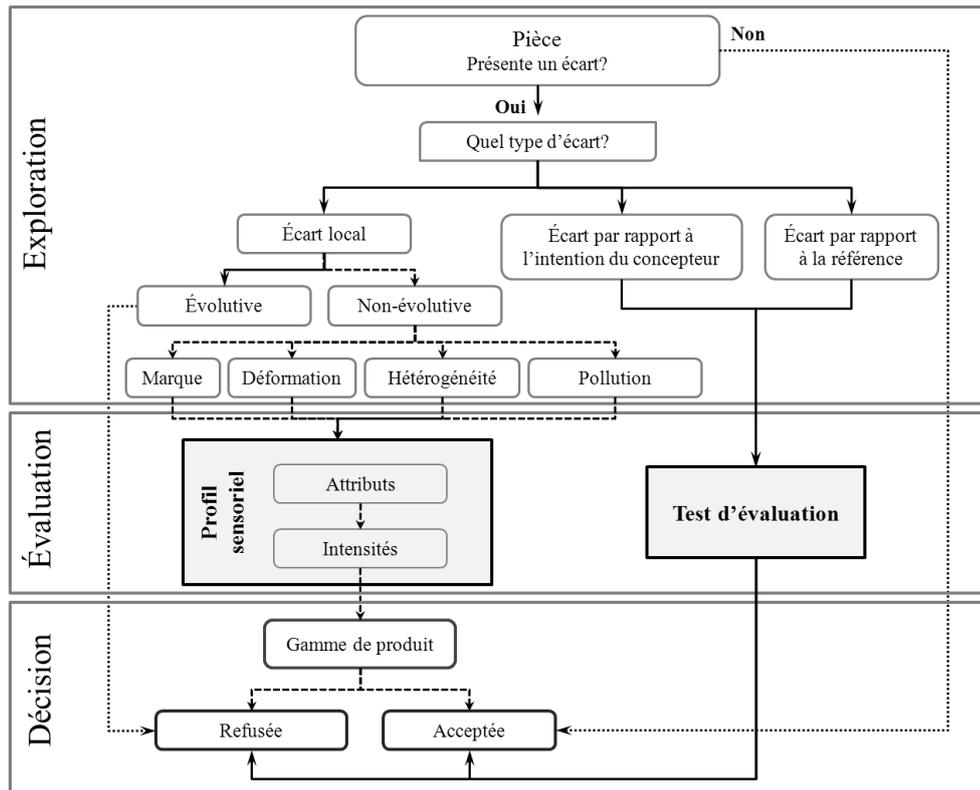


Figure 3.2 Modèle général du contrôle visuel avec un objectif esthétique

L'exploration est la première étape du contrôle visuel. Durant cette étape, le contrôleur explore la surface du produit pour vérifier si un écart est présent et, si c'est le cas, identifier le type d'écart (écart par rapport à la référence, écart par rapport à l'intention du concepteur ou écart local). Dans le cas d'un écart local, cette identification est faite de façon plus détaillée, chaque type d'anomalie pouvant être caractérisé par des attributs spécifiques.

L'évaluation constitue l'étape suivante. Durant cette étape, si le contrôleur identifie un écart par rapport à une référence ou par rapport à l'intention du concepteur, il utilisera la méthode d'évaluation de l'analyse descriptive proposée en analyse sensorielle (voir § 2.2 du chapitre 2) pour évaluer l'intensité de l'anomalie. S'il détecte un écart local, il utilisera le profil sensoriel en évaluant chacun des attributs définis, pour le type d'anomalie détecté. Notons enfin que cette

étape d'évaluation ne s'effectue que dans le cas de la détection d'une anomalie non évolutive, une anomalie évolutive devant amener le contrôleur à refuser directement le produit.

La décision est la dernière étape. Le contrôleur calcule l'intensité globale de l'anomalie en utilisant une méthode qui fait la corrélation entre les valeurs des attributs et la décision des experts (OK si le produit est accepté, KO si le produit est refusé). Cette décision est établie en fonction des limites fixées, celles-ci pouvant varier selon la gamme du produit ou selon le client.

2. LE CONTRÔLE VISUEL : MESURE DE SON EFFICACITÉ

Un contrôle visuel efficace suppose que soient mises en œuvre les trois étapes citées plus haut, exploration, évaluation et décision. Cela ne garantit pas pour autant l'efficacité du contrôle visuel. Il s'agit également, préalablement à cette mise en œuvre, d'entreprendre toutes les actions susceptibles de réduire la variabilité des résultats du contrôle généralement observée. Est-ce que cette variabilité résulte d'un problème d'exploration ? D'un problème d'évaluation/décision ? Nous détaillons maintenant comment identifier ce qui est à l'origine d'une variabilité et comment aider au choix des actions spécifiques à conduire pour mettre en œuvre un contrôle visuel.

2.1. LA THÉORIE DU SIGNAL

Comme nous l'avons vu dans le Chapitre 1, la théorie de la détection du signal aide à vérifier la sensibilité d'un sujet par rapport à la détection d'un stimulus. Elle aide également à analyser la stratégie utilisée par le sujet pour déterminer la présence d'un stimulus. Cette théorie s'avère très utile pour analyser les performances d'un contrôleur, particulièrement dans le cas d'un contrôle visuel dont l'objectif est technique. Pour ce type de contrôle en effet, nous l'avons dit, la liste de défauts à détecter est généralement précise et tout ce qui est perçu, et qui n'appartient pas à cette liste, est considéré comme du bruit [Micalizzi 89].

Rebsamen et al. (2010) ont par exemple montré comment utiliser cette théorie pour faire la différence entre des contrôleurs novices et des contrôleurs plus expérimentés, et ainsi en déduire les types d'entraînement les mieux adaptés [Rebsamen 10]. Dans leur étude, deux tests sont réalisés, le premier concernant la détection et le second analysant le contrôle dans sa totalité. Pour chaque test, les valeurs de « d' » et « β » (voir Chapitre 1) sont calculées.

Dans le contexte d'un contrôle visuel, l'indicateur « d' » (Équation 3.1) mesure la capacité de détection (signal/bruit) du contrôleur (le signal s'applique aux produits non-conformes et le bruit s'applique aux produit conformes).

$$d' = \frac{(p(s/s) - p(s/n))}{\sigma} \quad (\text{Équation 3.1})$$

où : $p(s/s)$ = probabilité de rejets corrects

$p(s/n)$ = probabilité de fausses alarmes

σ = écart type de la distribution, les deux distributions (signal + bruit et bruit) devant avoir la même variance

L'indicateur « β » (Équation 3.2) mesure la capacité du contrôleur à décider. Une valeur faible indique, par exemple, que le contrôleur est sévère dans sa décision, qu'il a tendance à juger un produit comme non conforme plutôt que conforme.

$$\beta = \frac{p(s/s)}{p(s/n)} \quad (\text{Équation 3.2})$$

Dans son analyse, [Rebsamen 10] a permis de constater que les différences de détection entre les contrôleurs résultaient d'un manque de connaissance sur ce qui était un défaut et ce qui ne l'était pas. Concernant la décision, l'étude montrait que la différence constatée résultait d'un manque de connaissance sur les critères d'acceptation des produits.

La théorie de la détection du signal peut donc être utilisée dans un contrôle visuel pour identifier, lorsqu'une grande variabilité des résultats est observée, si le problème à régler se situe au niveau de la détection et/ou au niveau de la décision. Bien adaptée au contrôle visuel dont l'objectif est technique, elle l'est moins pour un contrôle dont l'objectif est esthétique. Au mieux, elle peut être utilisée pour déterminer la sensibilité des contrôleurs à la détection d'un certain type d'anomalies selon des différentes caractéristiques physiques précises (largeur, longueur et profondeur d'une rayure par exemple). Mais, le plus souvent, il n'existe pas de liste précise des défauts et il s'avère difficile de déterminer ce qui doit être considéré comme du bruit. Le test $R^2\&E^2$ peut palier ces difficultés.

2.2. LE TEST $R^2\&E^2$

Le test R&R est proposé par l'AIAG [AIAG 10]. Il évalue la performance d'un système de mesure en mesurant sa variabilité. Cette variabilité peut résulter d'un problème de répétabilité des contrôles (le contrôleur donne des résultats différents concernant le même produit contrôlé à différents instants) et/ou d'un problème de reproductibilité (les contrôleurs donnent des résultats différents concernant le même produit).

Quand une variabilité importante dans les résultats est observée, la question est ensuite de savoir ce qui explique cette variabilité.

Dans le cas du contrôle visuel, la réponse à cette question n'est pas toujours évidente. Par exemple, si un contrôleur juge successivement le même produit comme OK (acceptable), puis comme KO (refusé), est-ce parce que :

- Il n'a pas détecté le défaut lors du premier contrôle et il l'a détecté lors du deuxième ?

- Il a détecté une anomalie lors de ses deux contrôles, mais dans le premier, il l'a jugé comme acceptable et, dans le second, comme inacceptable ?

Cette difficulté existe également dans d'autres cas. Par exemple, si un contrôleur a jugé le produit KO et l'autre contrôleur l'a jugé OK, est-ce parce que :

- Le premier contrôleur a détecté le défaut et le second ne l'a pas détecté ?
- Le premier contrôleur a détecté le défaut et le second a détecté l'anomalie mais ne l'a pas jugé comme un défaut ?

Dans les deux cas, le test R&R ne donne pas de réponse à ces questions. En effet, ce test n'indique pas l'origine d'une variabilité, principalement lorsque celle-ci peut avoir plusieurs sources. Vago et Kemény (2011) ont souligné les limites d'un test R&R aux attributs lorsque sont définies des tolérances inférieures et supérieures dans le contrôle [Vago 11]. Ils ont dû développer une méthode permettant d'évaluer la capacité des contrôleurs par rapport à une tolérance inférieure et par rapport à une tolérance supérieure.

En contrôle visuel, il est nécessaire de disposer d'un test permettant d'évaluer la reproductibilité et la répétabilité des résultats de contrôleurs en termes de détection et d'évaluation des anomalies. C'est le rôle du test R²&E² qui analyse la Reproductibilité et Répétabilité (R²) du contrôle pour l'Exploration et l'Évaluation des anomalies (E²). Le test donne ainsi plusieurs mesures [Maire 12] :

- La répétabilité de l'exploration, c'est à dire la capacité d'un contrôleur à détecter la même anomalie lors de deux contrôles sur le même produit.
- La reproductibilité de l'exploration, c'est-à-dire la capacité des contrôleurs à détecter la même anomalie que le groupe d'experts.
- La répétabilité de l'évaluation, c'est-à-dire la capacité des contrôleurs à évaluer l'anomalie de la même façon lors de deux contrôles sur un même produit
- La reproductibilité de l'évaluation, c'est à dire la capacité des contrôleurs à évaluer l'anomalie de la même façon que le groupe d'experts.
- L'inertie de la variabilité des mesures des contrôleurs par rapport à celle du groupe d'experts.

Si ce test révèle les sources de variabilité, il requiert que soient clairement formalisés les niveaux d'intensité des attributs à mesurer. Il nécessite donc le recours à une grille d'évaluation, souvent inexistante dans les entreprises avant la mise en place d'un contrôle visuel formalisé. Dans le cas où la réponse du contrôle n'est pas une valeur d'intensité obtenue en utilisant une grille, nous proposons le test R²&E² de conformité.

Les résultats qui servent de base à ce test ont pour valeurs possibles :

0 : Aucune anomalie détectée

1 : Détection d'une anomalie mais le produit est toutefois accepté

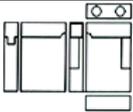
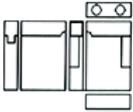
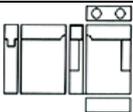
2 : Détection d'une anomalie et le produit est refusé

Pour effectuer ce test, il est recommandé de disposer d'un échantillon constitué d'au moins 30 produits répartis de la façon suivante :

- 11 produits présentant des anomalies acceptables
- 11 produits présentant des anomalies non acceptables
- 8 produits ne présentant aucune anomalie

Pour chaque anomalie, le contrôleur remplit une fiche (Tableau 3.1) dans laquelle il renseigne, pour chaque anomalie, s'il l'a perçue ou non (P ou NP), s'il l'évalue comme acceptable ou non (A ou NA), le type de l'anomalie (Marque, Rayure, Pollution, ...), sa localisation, l'explication de son évaluation.

Tableau 3.1 Exemple d'une fiche de contrôle

n	Perçue / Non Perçue	Acceptable / Non Acceptable	Type d'anomalie	Localisation	Pourquoi ? (évaluation)
1					
2					
...
30					

Dans le cas d'un contrôle visuel dont l'objectif est technique, les anomalies sont figées et les spécifications sont très précises. Cela permet l'utilisation d'une fiche de contrôle encore plus simple, du type de celle illustrée par le Tableau 3.2.

Notons que ce test ne se limite pas à analyser la variabilité des résultats fournis par les contrôleurs. Il sert également à faire un état de lieu du contrôle visuel.

L'entreprise doit d'abord mettre à la disposition des contrôleurs l'ensemble des moyens de contrôle, ainsi que d'autres informations, comme le mode opératoire, les spécifications de contrôle, les modes d'utilisation des moyens (grossissement, stylet, etc.), etc.

Le test doit être réalisé sur le poste de contrôle habituellement utilisé et doit être réalisé deux fois, à une semaine d'intervalle. Lors de chaque test, l'animateur remplit la fiche de contrôle et relève la manière dont les contrôleurs utilisent les moyens et utilisent les informations disponibles. Utilisent-ils tous les moyens de contrôle mis à leur disposition ? Les utilisent-ils

Tableau 3.2 Fiche de contrôle remplie – objectif technique

n	P / NP	Type d'anomalie	Localisation (surface)	A /NA	Pourquoi ?
1	P	<input checked="" type="checkbox"/> Rayure <input type="checkbox"/> crique <input type="checkbox"/> empreinte <input type="checkbox"/> corrosion <input type="checkbox"/> arrachement <input type="checkbox"/> tâche <input type="checkbox"/> surplus <input type="checkbox"/> coup de meule		A	Décelable ; < 0,8 ; ne chevauche pas
2	P	<input type="checkbox"/> Rayure <input type="checkbox"/> crique <input type="checkbox"/> empreinte <input checked="" type="checkbox"/> corrosion <input type="checkbox"/> arrachement <input type="checkbox"/> tâche <input type="checkbox"/> surplus <input type="checkbox"/> coup de meule		NA	
3	NP	<input type="checkbox"/> Rayure <input type="checkbox"/> crique <input type="checkbox"/> empreinte <input type="checkbox"/> corrosion <input type="checkbox"/> arrachement <input type="checkbox"/> tâche <input type="checkbox"/> surplus <input type="checkbox"/> coup de meule			
4	P	<input checked="" type="checkbox"/> Rayure <input type="checkbox"/> crique <input checked="" type="checkbox"/> empreinte <input type="checkbox"/> corrosion <input type="checkbox"/> arrachement <input type="checkbox"/> tâche <input type="checkbox"/> surplus <input type="checkbox"/> coup de meule		A NA	Non décelable Décelable ; chevauche angle

Dans le cas où le contrôleur détecte plusieurs anomalies sur le même produit, elles sont notées avec une couleur différente.

correctement ? Utilisent-ils les informations mises à leur disposition ? Suivent-ils le mode opératoire défini ? L'appliquent-ils tous de la même façon ?

Après saisie des fiche de contrôle, une analyse des données peut être effectuée. Elle s'applique à chaque anomalie puisqu'il n'est pas possible de comparer la détection et l'évaluation d'anomalies différentes. Pour cette analyse, il s'agit de :

- Identifier les anomalies détectées par les contrôleurs et qui faisaient partie de celles listées par les experts (au passage, s'assurer que l'anomalie décrite par le contrôleur correspond bien à celle décrite par les experts).
- Lister toutes les anomalies détectées par les contrôleurs et non listées parmi celles détectées par les experts (dans ce cas, s'assurer que ces anomalies n'ont pas été créées pendant la manipulation des pièces et, si ce n'est pas le cas, les rajouter à la liste).

La réalisation de cette liste peut parfois s'avérer fastidieuse mais elle permet, par exemple, de se rendre compte des problèmes de caractérisation d'une anomalie.

Pour l'analyse de la variabilité, un tableau reprenant les données sur l'exploration et l'évaluation/ décision doit être réalisé. Le Tableau 3.3 en donne un exemple. Il regroupe 16 anomalies (listées au départ par les experts ou détectées par les contrôleurs).

La valeur « 0 » indique que le contrôleur n'a détecté aucune anomalie, le « 1 », qu'il a détecté mais qu'il la juge acceptable et « 2 » qu'il a détecté et qu'il la juge non acceptable.

Par rapport à l'exploration, nous pouvons calculer plusieurs indicateurs :

- La répétabilité d'un contrôleur, c'est-à-dire sa capacité à détecter la même anomalie lors de deux tests.

Tableau 3.3 Tableau de données pour le test R²&E²

n	Contrôleur 1		Contrôleur 2		Contrôleur 3		Référence
	#1	#2	#1	#2	#1	#2	
1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	1	0	0	0
3	2	2	0	2	0	1	0
4	1	1	1	1	1	1	1
5	2	2	1	1	2	2	2
6	1	0	1	0	1	0	1
7	1	2	1	2	1	2	1
8	2	2	2	2	2	2	2
9	1	1	1	1	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0
12	1	1	1	1	1	1	1
13	1	1	0	1	0	0	0
14	1	2	0	2	0	0	0
15	2	2	2	2	2	2	2
16	1	2	1	2	1	1	1

- La reproductibilité d'un contrôleur, c'est à dire sa capacité à détecter la même anomalie que celle listée par les experts (uniquement pour les cas où il a répétabilité sur les deux contrôles).
- Le score d'un contrôleur, c'est-à-dire sa capacité totale à être répétable et reproductible sur la détection de l'ensemble des anomalies des tests.
- Le nombre de fausses alarmes d'un contrôleur, c'est à dire le nombre d'anomalies qu'il a détectées et qui ne sont pas dans celles listées par les experts.
- Le nombre d'omissions d'un contrôleur, c'est-à-dire le nombre d'anomalies listées par les experts qu'il n'a pas détecté.

Le Tableau 3.4 donne le détail du calcul de ces indicateurs en exploration.

Le Tableau 3.5 montre par exemples les valeurs obtenues pour l'exemple du Tableau 3.3.

L'analyse montre, sur cet exemple, que la répétabilité du contrôleur 1 est très bonne (94%) dans la détection d'anomalies. En revanche, sa reproductibilité avec les experts est faible (73%) et le nombre de fausses alarmes (4) indique qu'il identifie des anomalies autres que celle listées par les experts. Le contrôleur 2 a quant à lui plus de difficultés à détecter à deux reprises une anomalie (75%) mais, pour les anomalies où il est répétable, il est en accord avec les experts. La répétabilité et la reproductibilité du contrôleur 3 sont très satisfaisantes.

Cette analyse ne s'appliquait qu'à l'exploration des anomalies. Concernant leur évaluation et la décision, d'autres indicateurs peuvent être définis. Ce sont :

- La répétabilité du contrôleur, c'est à dire sa capacité à juger de la même façon une même anomalie lors de ses deux contrôles.

Tableau 3.4 Indicateurs Exploration

Répétabilité (%)	$\% \text{ Répétabilité} = \frac{N_{\text{répétabilité}}}{TI}$	$N_{\text{répétabilité}}$ = nombre d'anomalies ayant la même réponse de détection dans les deux contrôles (0/0 ; 1/1 ; 2/2 ; 1/2 ; 2/1) TI = total d'anomalies inspectées
Reproductibilité (%)	$\% \text{ Reproductibilité} = \frac{N_{\text{reproductibilité}}}{N_{\text{répétabilité}}}$	$N_{\text{reproductibilité}}$ = nombre d'anomalies ayant la même réponse de détection que les experts (0/R0 ; 1/R1 ; 2/R2 ; 1/R2 ; 2/R1). L'anomalie doit être prise en compte seulement dans le cas où la détection a été répétée
Score (%)	$\% \text{ Score} = \frac{N_{\text{reproductibilité}}}{TI}$	
Nb de fausses alarmes	$Nb_{\text{moyen FA}} = \frac{nb_{\text{total FA}}}{2}$	$FA \rightarrow r_{\text{référence}} = 0$ et $r_{\text{contrôleur}} \geq 1$ Il faut prendre en compte les deux contrôles.
Nb d'omissions	$Nb_{\text{moyen O}} = \frac{nb_{\text{total O}}}{2}$	$O \rightarrow r_{\text{référence}} \geq 1$ et $r_{\text{contrôleur}} = 0$ Il faut prendre en compte les deux contrôles

Tableau 3.5 Résultats pour l'exploration

	Contrôleur 1	Contrôleur 2	Contrôleur 3
Répétabilité (%)	94%	75%	88%
Reproductibilité (%)	73%	92%	100%
Score (%)	69%	69%	88%
Nb de fausses alarmes	4	2,5	0,5
Nb d'omissions	0,5	0,5	0,5

- La reproductibilité du contrôleur, c'est à dire sa capacité à juger une anomalie de la même façon que les experts (uniquement pour les cas où il a répétabilité sur les deux contrôles).
- Le score du contrôleur, c'est-à-dire sa capacité totale à être répétable et reproductible sur l'évaluation de l'ensemble des anomalies des tests.
- Le nombre de "Plus sévères", c'est-à-dire le nombre d'anomalies que le contrôleur a jugé comme non-acceptables et que les experts ont jugé comme acceptables.
- Le nombre de "Moins sévères", c'est-à-dire le nombre d'anomalies que le contrôleur a jugé comme acceptables et que les experts ont jugé comme non-acceptables.
- La concordance, c'est-à-dire le pourcentage d'évaluations correctes, indépendamment de la détection (les valeurs 0 et 1 sont considérées de la même façon).

Le Tableau 3.6 donne le détail du calcul de ces indicateurs en évaluation/décision.

Tableau 3.6 Indicateurs en évaluation/décision

Répétabilité (%)	$\% \text{ Répétabilité} = \frac{N_{\text{répétabilité}}}{TI_d}$	$N_{\text{répétabilité}}$ = nombre d'anomalies jugées de la même façon lors des deux contrôles TI_d = total d'anomalies inspectées et détectées dans les deux contrôles
Reproductibilité (%)	$\% \text{ Reproductibilité} = \frac{N_{\text{reproductibilité}}}{N_{\text{répétabilité}}}$	$N_{\text{reproductibilité}}$ = nombre d'anomalies jugées correctement.
Score (%)	$\% \text{ Score} = \frac{N_{\text{reproductibilité}}}{TI_d}$	
Nb plus sévère	$Nb_{\text{moyen } PS} = \frac{nb_{\text{total } PS}}{2}$	$PS \rightarrow r_{\text{référence}} = 1$ et $r_{\text{contrôleur}} = 2$ (Il faut prendre en compte les deux contrôles)
Nb moins sévère	$Nb_{\text{moyen } MS} = \frac{nb_{\text{total } MS}}{2}$	$MS \rightarrow r_{\text{référence}} = 2$ et $r_{\text{contrôleur}} = 1$ (Il faut prendre en compte les deux contrôles)
Concordance (%)	$\% \text{ Concordance} = \frac{N_c + N_{nc} + N_{aA}}{2TI}$	N_c = nombre d'anomalies jugées acceptables par le contrôleur et les experts N_{nc} = nombre d'anomalies jugées non-acceptables par le contrôleur et les experts. (Il faut prendre en compte les deux contrôles) N_{aA} = nombre d'anomalies non détectées par un contrôleur et jugées acceptables par les experts.

Les résultats obtenus, pour l'exemple présenté dans le Tableau 3.3, sont présentés dans le Tableau 3.7.

Tableau 3.7 Résultats pour l'évaluation/décision

	Contrôleur 1	Contrôleur 2	Contrôleur 3
Répétabilité (%)	75	78	87
Reproductibilité (%)	67	71	100
Score (%)	50	56	87
Nb "Plus sévères"	2,5	2	0,5
Nb "Moins sévères"	0	1	0
Concordance (%)	84	81	97

L'analyse montre, sur cet exemple, que les contrôleurs 1 et 2 ne sont pas répétables en évaluation/décision (75%, 78%). Le contrôleur 3 est répétable (87%) et reproductible (100%) dans son évaluation. Le nombre de "Plus sévères" montre également que les contrôleurs 1 et 2

ont une tendance à être plus sévères dans leur évaluation que les experts. Enfin, la concordance indique que le contrôleur 3 est très performant dans son évaluation.

Au regard des résultats d'un test R²&E², on peut s'apercevoir que les contrôleurs à qui l'on demande de détecter et d'évaluer toutes les anomalies, ont une tendance à être plus sévères dans leur jugement que les experts. On peut considérer ces situations comme de fausses alarmes de détection qu'il est nécessaire de filtrer, celles-ci pouvant résulter d'une sévérité plus grande du contrôleur ou d'un problème d'identification (par exemple, sur une façade d'un meuble, le contrôleur a décrit la présence d'un nœud comme une anomalie, alors que les experts considèrent ce nœud comme faisant partie intégrante du décor).

Il s'agit donc de traiter les fausses alarmes en remplaçant la valeur « 1 » d'un contrôleur (l'anomalie a été détectée par le contrôleur mais il l'a évaluée comme acceptable) par la valeur « 0 » et cela, chaque fois que les experts n'ont pas détecté cette anomalie (valeur « 0 »). Le Tableau 3.8 montre les données qui ont été retenues après traitement des données du Tableau 3.3.

Tableau 3.8 Données après traitement des fausses alarmes

n	Contrôleur 1		Contrôleur 2		Contrôleur 3		Référence
	#1	#2	#1	#2	#1	#2	
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0
3	2	2	0	2	0	0	0
4	1	1	1	1	1	1	1
5	2	2	1	1	2	2	2
6	1	0	1	0	1	0	1
7	1	2	1	2	1	2	1
8	2	2	2	2	2	2	2
9	1	1	1	1	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0
12	1	1	1	1	1	1	1
13	0	0	0	0	0	0	0
14	0	2	0	2	0	0	0
15	2	2	2	2	2	2	2
16	1	2	1	2	1	1	1

À partir de ce traitement, un nouveau calcul des indicateurs d'exploration et d'évaluation peut être réalisé. Le Tableau 3.9 et le Tableau 3.10 donne les nouvelles valeurs obtenues.

À partir de ces résultats, nous pouvons déduire que, malgré un meilleur score en exploration et évaluation, les contrôleurs 1 et 2 ont un problème d'identification et d'évaluation d'anomalie. Pour le problème d'identification, l'entreprise pourra par exemple être amenée à planifier une action de formation dédiée à la définition précise et partagée par les contrôleurs de qui doit être considéré comme une anomalie. Le problème d'évaluation peut quant à lui être lié à une

Tableau 3.9 Résultats filtrés pour l'exploration

	Contrôleur 1	Contrôleur 2	Contrôleur 3
Répétabilité (%)	88	81	94
Reproductibilité (%)	93	100	100
Score (%)	81	81	94
Nb d'anomalie qui posent problème de décision	1,5	1	0

Tableau 3.10 Résultats filtrés pour l'évaluation/décision

	Contrôleur 1	Contrôleur 2	Contrôleur 3
Répétabilité (%)	78	75	87
Reproductibilité (%)	86	83	100
Score (%)	67	62	87

mauvaise identification des anomalies ou à une subjectivité dans le jugement, celle pouvant être confirmée par une analyse des données recueillies dans la fiche de contrôle (type d'anomalie et le « pourquoi » de la décision).

Au final, retenons que le test $R^2&E^2$ "Conformité" est un moyen de déterminer ce qui est à l'origine d'une variabilité observée sur les résultats d'un contrôle visuel et un moyen de décider des actions spécifiques à mener par l'entreprise pour réduire cette variabilité. Le paragraphe qui suit montre comment ce test a été utilisé dans deux entreprises avec qui nous avons collaboré.

2.3. DEUX EXEMPLES D'UTILISATION DU TEST $R^2&E^2$

2.3.1. FOURNIER

L'objectif du contrôle visuel, chez FOURNIER est exclusivement esthétique (voir Annexe 2). Les opérateurs de production, lors de la manipulation des produits, ont en charge de signaler toute anomalie d'aspect sur un produit (rayure, graton, coup, etc.).

Le test $R^2&E^2$ "Conformité" a été appliqué pour dresser un état précis de l'existant sur le contrôle visuel et décider des premières actions correctives à apporter à ce contrôle. Une des questions qui se posait était de savoir si les difficultés relevaient davantage d'un problème d'exploration ou d'un problème d'évaluation.

Trois opérateurs d'un même atelier ont été sélectionnés pour participer au test. Un échantillon de 30 produits a été utilisé, dont 22 présentant une anomalie et 8 sans aucune anomalie. Tous les outils préconisés pour le contrôle visuel ont été mis à la disposition des trois opérateurs.

Le Tableau 3.11 présente les résultats de ce test.

Tableau 3.11 Résultats du Test R²&E² "Conformité" chez FOURNIER

		Contrôleur1	Contrôleur 2	Contrôleur 3
Exploration	Répétabilité (%)	83	73	70
	Reproductibilité (%)	64	86	52
	Score (%)	53	63	37
	Fausse alarmes (nb)	0,5	0	1
	Omissions (nb)	11	7	13,5
Évaluation	Répétabilité (%)	100	82	100
	Reproductibilité (%)	89	89	80
	Score (%)	89	73	80
	Nb "Plus sévères"	2,5	3	3,5
	Nb "Moins sévères"	0	0,5	0
	Concordance (%)	80	82	70

Les résultats du test ont permis de mettre en évidence un sérieux problème dans la détection des anomalies. Le score est en effet faible pour les trois contrôleurs (respectivement 53, 63 et 37). Un nombre considérable d'anomalies n'a pas été détectée (par exemple, le contrôleur 3 n'a pas détecté lors de ses deux contrôles, en moyenne, 13,5 anomalies sur les 22 présentes). La répétabilité est certes acceptable, mais ces résultats sont corrects puisque peu d'anomalies sont détectées.

En revanche, lorsque l'anomalie est détectée, elle pose moins de problèmes d'évaluation, tant en répétabilité qu'en reproductibilité. La concordance est satisfaisante pour les trois contrôleurs, même si ceux-ci ont tendance à être un plus sévères dans leur évaluation.

D'autres observations complémentaires ont permis de comprendre ces résultats concernant l'exploration. Il a pu ainsi être observé que les opérateurs :

- Ne contrôlaient pas la totalité des zones du produit (ils ne respectaient pas le parcours des yeux pourtant défini).
- N'utilisaient pas tout le temps alloué pour le contrôle.
- Ne faisaient pas varier les effets lumières.
- N'étaient pas toujours concentrés lors de leur contrôle (discussion avec le collègue, manque d'attention dans l'observation, etc.).

À partir des résultats du test et de ces observations, l'entreprise a donc défini un plan d'actions très ciblées sur l'amélioration de l'exploration des anomalies. Nous reviendrons sur ces actions dans le Chapitre 4.

2.3.2. EUDICA

L'objectif du contrôle visuel, chez EUDICA, est principalement technique (voir Annexe 2). Le test R²&E² "Conformité" a également été appliqué. Trois contrôleurs ont participé du test. Deux d'entre eux étaient expérimentés dans le contrôle visuel, l'autre était un novice. Les

résultats du test sont présentés dans le Tableau 3.12 et, après traitement des fausses alarmes, dans le Tableau 3.13.

Tableau 3.12 Résultats Test R²&E² "Conformité" - EUDICA

		Contrôleur1	Contrôleur 2	Contrôleur 3
Exploration	Répétabilité (%)	90	67	90
	Reproductibilité (%)	96	70	93
	Score (%)	87	47	83
	Fausse alarmes (nb)	2	6	1,5
	Omissions (nb)	0,5	5	2
Évaluation	Répétabilité (%)	79	40	83
	Reproductibilité (%)	91	0	100
	Score (%)	71	0	83
	Nb "Plus sévères"	1,5	7,5	1
	Nb "Moins sévères"	0	1,5	0
Concordance (%)		95	58	95

Tableau 3.13 Résultats Test R²&E² "Conformité" (après traitement des fausses alarmes) - EUDICA

		Contrôleur1	Contrôleur 2	Contrôleur 3
Exploration	Répétabilité (%)	97	73	90
	Reproductibilité (%)	100	77	96
	Score (%)	97	57	87
	Nb d'anomalie qui pose problème de décision	0	4	0,5
Évaluation	Répétabilité (%)	77	44	91
	Reproductibilité (%)	100	0	100
	Score (%)	77	0	91

Le test a révélé un écart très important entre les contrôleurs expérimentés (Contrôleurs 1 et 3) et le contrôleur novice (Contrôleur 2). Le test confirme l'efficacité des deux contrôleurs expérimentés, tant en exploration qu'en évaluation (scores à 97 et 87 en exploration après traitement des fausses alarmes et scores à 100 et 100 en évaluation) et le manque de maîtrise du Contrôleur 2 dans l'exploration et dans l'évaluation des anomalies (score en exploration à 47 et score en évaluation à 0).

Non seulement le Contrôleur 2 ne parvient pas détecter correctement les anomalies (5 omissions), mais il a également des difficultés à reconnaître ce qu'est une anomalie (6 fausses alarmes). Pour les anomalies détectées, il ne parvient pas non plus à les évaluer correctement (reproductibilité à 0!).

Les observations complémentaires ont permis de comprendre les résultats du contrôleur 2. Les informations et outils mis à sa disposition ne lui permettent pas de :

- Détecter certaines anomalies

- De savoir précisément ce qui doit être considéré comme une anomalie
- De maîtriser les tolérances acceptables par type d'anomalie
- D'évaluer correctement une anomalie détectée

À partir des résultats du test et de ces observations, l'entreprise a mis en place un plan d'actions ciblant l'apprentissage des contrôleurs non expérimentés. Ces actions incluaient la création et la formalisation d'un mode opératoire d'exploration et la formalisation d'une spécification claire des anomalies à évaluer. Nous reviendrons sur ces actions dans le Chapitre 4.

3. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre un cadre méthodologique global adapté à un contrôle visuel dont l'objectif est esthétique. Cette adaptation s'applique principalement, nous l'avons vu, à l'étape d'évaluation. Pour ce type de contrôle en effet, l'évaluation est plus complexe car elle dépend d'une analyse qualitative de l'anomalie, et non quantitative comme c'est généralement le cas pour un contrôle visuel dont l'objectif est technique.

Guerra (2008) avait proposé une décomposition du contrôle visuel en trois étapes : exploration, évaluation et décision. Nous avons repris son approche et nous avons proposé quelques modifications dans la définition des étapes, de manière à les mettre en accord avec le mode de caractérisation d'une anomalie.

L'efficacité d'un contrôle visuel suppose que ces trois étapes soient maîtrisées. Le test R²&E² "Conformité" que nous avons détaillé aide à mesurer la variabilité des résultats de ce contrôle et, surtout, aide à expliquer ce qui est à l'origine de cette variabilité. La répétabilité et la reproductibilité, à la fois de la détection et de l'évaluation, peuvent ainsi être mesurées. Le test rend également compte de la capacité du contrôleur à identifier ce qui relève réellement d'une anomalie (fausses alarmes) et, pour le cas de "réelles" anomalies, à s'assurer de sa capacité à les évaluer correctement.

Ce test aide ainsi l'entreprise, nous l'avons montré sur deux exemples, à cibler les premières actions spécifiques à mener pour améliorer le contrôle visuel de leurs produits. Ce travail doit ensuite poursuivi par la mise en place de recommandations visant, pour certaines, à mieux maîtriser l'étape d'exploration, les autres, à mieux maîtriser l'étape d'évaluation/décision d'un contrôle visuel dont l'objectif est esthétique. Ces recommandations sont détaillées respectivement dans les chapitres 4 et 5.

CHAPITRE 4

CONTRÔLE VISUEL : MAÎTRISER L'EXPLORATION

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté notre proposition de formalisation des étapes du contrôle visuel avec un objectif esthétique. Nous avons également expliqué comment mesurer l'efficacité d'un contrôle visuel et montré comment l'entreprise pouvait en déduire les premières actions à mener pour réduire la variabilité observée sur les résultats de ce contrôle.

Chacune des étapes d'un contrôle a ses particularités et est sensible à différents facteurs. Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étape d'exploration.

Nous présentons d'abord les facteurs qui ont une influence sur la détection des anomalies.

Nous listons ensuite l'ensemble des actions mises en œuvre lors d'un contrôle visuel, en lien avec ces facteurs.

Nous en déduisons quelques recommandations à suivre par l'entreprise et qui peuvent contribuer à améliorer l'étape d'exploration d'un contrôle visuel.

Nous illustrons enfin très concrètement comment certaines de ces recommandations ont été appliquées dans les entreprises avec lesquelles nous avons collaboré.

1. LES FACTEURS D'INFLUENCE EN EXPLORATION

Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre précédent, plusieurs études ont été réalisées sur les facteurs pouvant avoir une influence dans le contrôle visuel, notamment dans la détection de défauts. En se basant sur une décomposition en 5M (Main d'œuvre, Méthode, Milieu, Matériel et Moyen), nous résumons ici quelques contributions ayant évoqué ces facteurs et leur influence.

1.1. FACTEURS MATÉRIEL

Le Tableau 4.1 liste quelques facteurs étudiés en lien avec le Matériel et quelques références de publications qui s’y rapportent.

Tableau 4.1 Facteurs d’influence – Matériel

Couleur	Xue-Wu <i>et al.</i> (2011) [Xue-wu 11]
Forme	Reilly et Teichner (1962) [Reilly 62] Harris (1966) [Harris 66]
Texture	Mäenpää <i>et al.</i> (2003) [Mäenpää 03] Kyllönen et Pietikäinen (2000) [Kyllonen 00] Baykut <i>et al.</i> (2000) [Baykut 00]

Les propriétés du matériel, le produit contrôlé dans notre cas, peuvent avoir une influence dans la détection d’une anomalie. C’est le cas tout particulièrement de la couleur, de la forme ou de la texture du produit.

Xue-wu *et al.* (2011) soulignent par exemple la difficulté de détecter un défaut lorsque le produit présente une surface métallique polie reflétant trop la lumière (cette étude a été faite dans le cadre du développement d’un système automatique de contrôle, mais cette difficulté est rencontrée de la même façon par un contrôleur humain) [Xue-wu 11].

En ce qui concerne la forme, Reilly et Teichner (1962) ont par exemple montré que le contrôle visuel est légèrement meilleur pour un produit dont la surface présente des formes carrées que des formes circulaires [Reilly 62]. Harris *et al.* (1966) ont montré par la suite l’influence de la complexité d’un produit sur la performance de la détection d’anomalies sur ce produit [Harris 66].

Enfin, pour la texture, Kyllönen et Pietikäinen (2000) [Kyllonen 00], puis Mäenpää *et al.* (2003) [Mäenpää 03], ont montré que, pour certains types de défauts, la couleur ne suffisait pas pour faire la distinction et que c’est la texture du produit qui avait un rôle important dans la détection de certaines anomalies. Baykut *et al.* (2000) montre d’ailleurs que, pour certains produits, seule l’information sur la texture est suffisante pour une détection efficace de défauts [Baykut 00].

1.2. FACTEURS MILIEU

Le Tableau 4.2 liste quelques facteurs en lien avec le Milieu et les références de quelques publications qui s’y rapportent.

L’éclairage ainsi que le bruit environnant du contrôle peuvent également avoir une influence sur la détection d’une anomalie sur un produit.

Tableau 4.2 Facteurs d'influence - Milieu

Luminosité	Afnor (2006) [AFNOR 06a] Floru (1996) [Floru 96]
Bruit	Taylor <i>et al.</i> (2004) [Taylor 04] Smith et Miles (1986) [Smith 86] Harris (1972) [Harris 72]

Floru (1996) [Floru 96], comme les bonnes pratiques BP X 10-042 [AFNOR 06a], suggèrent de veiller à ce que l'éclairage de la zone de contrôle ne soit pas perturbée par une lumière extérieure parasite et recommandent l'utilisation de cabines pour un contrôle visuel optimal (s'il existe une autre source lumineuse que celle présente au poste, cet éclairage doit idéalement être du même type que celui du poste).

Concernant le bruit, Taylor *et al.* (2004) ont montré qu'un bruit (de source unique ou multiples) aléatoire ou intermittent dans l'environnement proche du contrôleur avait, dans le cas d'un contrôle simple, un effet négatif sur les résultats de son contrôle et, à l'inverse, le bruit, venant d'une source unique, avait un effet positif pour un contrôle plus complexe (l'intensité du bruit pour l'étude était de 80dB) [Taylor 04]. De manière analogue, Harris (1972) a montré qu'un bruit continu ou intermittent d'une intensité de 105dB faisait baisser considérablement le taux de détection de défauts sur un produit [Harris 72]. Pour Smith et Miles (1986), un bruit (intensité de 75dB) augmente considérablement le nombre de fausses alarmes dans la détection de défauts [Smith 86].

1.3. FACTEURS MOYEN

Le Tableau 4.3 liste quelques facteurs étudiés en lien avec le Moyen et les références de quelques publications qui s'y rapportent.

Tableau 4.3 Facteurs d'influence - Moyen

Système d'éclairage	Afnor (2006) [AFNOR 06a] Floru (1996) [Floru 96]
Grossissement	Lee et Chan (2009) [Lee 09]
Environnement proche du poste	ISO (2007) [ISO 07]
Couleur de fond	Maehara <i>et al.</i> (2004) [Maehara 04] Ling et Schaik (2002) [Ling 02] Breitmeyer et Breier (1994) [Breitmeyer 94] Meléndez-Martinez <i>et al.</i> (2005) [Meléndez Martinez 05]
Formation/entraînement	Nickles III <i>et al.</i> (2003) [Nickles III 03] Vora <i>et al.</i> (2002) [Vora 02]

Les caractéristiques du moyen de contrôle (système d'éclairage direct sur le poste de contrôle, grossissement utilisé) ont également une influence sur la performance de la détection des

anomalies sur un produit. Là encore, tant Floru (1996) [Floru 96] comme l'AFNOR (2006) [AFNOR 06a] ont montré l'importance du choix du système d'éclairage mis en place sur le poste du contrôleur, celui-ci devant limiter l'éblouissement du contrôleur et devant permettre de disposer d'un contraste de luminance adéquat. Lee et Chan (2009) ont quant à eux mis en évidence l'impact du grossissement sur les résultats d'un contrôle visuel (sur-qualité ou sous-qualité selon le grossissement utilisé) [Lee 09].

La norme ISO 8589 (2007) préconise l'utilisation de couleurs mates dans les murs, parois et sols situés à proximité de la zone de contrôle [ISO 07].

Ling et Schaik (2002) [Ling 02], Maehara *et al.* (2004) [Maehara 04], puis Melendez-Martinez *et al.* (2005) [Meléndez Martinez 05] ont montré l'influence significative que pouvait avoir la couleur de fond sur les performances du contrôleur.

Déjà auparavant, Breitmeyer et Breier (1994) avaient montré que cette couleur, en fonction de la taille de l'objet à détecter, avait une incidence importante sur le temps de détection d'une anomalie [Breitmeyer 94].

Enfin, le contrôleur a également un rôle déterminant dans le contrôle. Nickles III *et al.* (2003) ont par exemple montré l'importance de la formation suivie par le contrôleur en comparant l'impact de trois types de formation différents sur les résultats d'un contrôle [Nickles III 03].

1.4. FACTEURS MÉTHODE

Le Tableau 4.4 liste quelques facteurs étudiés en lien avec la Méthode et les références de quelques publications qui s'y rapportent.

Tableau 4.4 Facteurs d'influence - Méthode

Procédure de contrôle	
Stratégie	Koenig <i>et al.</i> (2002) [Koenig 02] Melloy <i>et al.</i> (2006) [Melloy 06] Wang <i>et al.</i> (1997) [Wang 97] Arani <i>et al.</i> (1984) [Arani 84]
Type d'anomalie	Rao <i>et al.</i> (2006) [Rao 06] Gilden <i>et al.</i> (2010) [Gilden 10] Duncan et Humphreys (1989) [Duncan 89] Ballaz <i>et al.</i> (2001) [Ballaz 01] Puntous <i>et al.</i> (2012) [Puntous 12]
Forme de la procédure	Schütte <i>et al.</i> [Schütte 99]
Temps/Rythme	Garret <i>et al.</i> (2001) [Garret 01]
Grossissement/distance	Jebaraj <i>et al.</i> (1999) [Jebaraj 99],
Rotation des tâches	Gerling (2003) [Gerling 03]
Pauses dans les contrôles	Colquhoun (1959) [Colquhoun 59]

La méthode suivie par le contrôleur lors de son contrôle du produit a également une influence sur la performance de sa détection des anomalies. Koenig *et al.* (2002) [Koenig 02], Nickles III *et al.*

al. (2003) [Nickles III 03], ainsi que Melloy *et al.* (2006) [Melloy 06], ont ainsi montré l'influence, dans le contrôle visuel, du choix de la stratégie d'exploration du produit par le contrôleur. Arani *et al.* (1984) [Arani 84], ainsi que Wang *et al.* (1997) [Wang 97] avaient montré qu'une stratégie d'exploration systématique du produit donnait des résultats bien meilleurs qu'une stratégie d'exploration complètement aléatoire. Le type d'anomalie recherchée a également une incidence sur sa détection. C'est ce qu'ont montré Rao *et al.* (2006) qui ont fait le lien entre la complexité de l'anomalie et sa détection [Rao 06]. Puntous *et al.* (2012) ont quant à eux montré l'impact des caractéristiques physiques d'une rayure (une anomalie très fréquente en contrôle visuel) sur sa perception [Puntous 12]. La présence simultanée d'anomalies de différents types sur la surface à contrôler peut également avoir une influence sur le contrôle. Duncan et Humphreys (1989) ont, par exemple, montré la difficulté de la détection d'une anomalie lorsque celle-ci a une forme proche des autres formes présentes sur la surface à contrôler [Duncan 89]. Gilden *et al.* (2010) [Gilden 10], ainsi que Ballaz *et al.* (2001) [Ballaz 01], ont montré l'influence de l'anisotropie (i.e. une anomalie qui dépend de son orientation) dans la détection. Schütte *et al.* (1999) ont étudié l'influence de la disposition des instructions de contrôle sur les résultats du contrôle, ainsi que l'influence du mode de communication de ces instructions sur ces résultats [Schütte 99]. Enfin, concernant le rythme du contrôle, Garret *et al.* (2001) ont montré que la définition d'un temps de contrôle pour un produit est préférable à celle d'un temps de contrôle pour l'ensemble d'un lot de produits à contrôler [Garret 01].

Concernant les pauses à instaurer pour améliorer l'efficacité de la détection des anomalies, Colquhoun (1959) a montré que l'efficacité d'un contrôleur baisse après 30 min de travail (pour une durée de contrôle d'une heure), mais que par contre, son efficacité était maintenue s'il faisait une pause de 5min après 30 min de travail [Colquhoun 59].

1.5. FACTEURS MAIN D'ŒUVRE

Le Tableau 4.5 liste quelques facteurs étudiés en lien avec la Main d'œuvre et les références de quelques publications qui s'y rapportent.

Les capacités du contrôleur et ses performances ont bien évidemment un impact significatif sur les résultats de son contrôle. Déjà à l'époque, Kephart et Manson (1950) avaient vérifié l'influence de l'acuité visuelle d'un contrôleur à l'autre sur les résultats d'un contrôle visuel [Kephart 50]. Courtney (1985) a fait le lien entre la taille du lobe de l'œil du contrôleur et les résultats de son contrôle [Courtney 85]. Plus récemment, Näsänen *et al.* (2001) ont montré qu'une réduction du nombre et du temps de fixation de l'œil sur le produit à contrôler réduisait le temps d'exploration nécessaire pour détecter un défaut sur ce produit [Näsänen 01].

Cerella (1985) [Cerella 85] et Scialfa (1987) [Scialfa 87], puis Ball *et al.* (1988) [Ball 88], ont étudié l'influence de l'âge du contrôleur sur la détection en montrant qu'avec l'âge, la taille de la surface perçue par le contrôleur à chaque instant se réduit et que la vitesse de détection des défauts diminue.

Tableau 4.5 Facteurs d'influence – Main d'œuvre

Acuité visuelle	McCormick (1950) [McCormick 50] Courtney (1985) [Courtney 85] Kephart et Manson (1950) [Kephart 50]
Mouvement oculaire	Courtney (1986) [Courtney 86] Findlay (1997) [Findlay 97] Näsänen <i>et al.</i> (2001) [Näsänen 01]
Age	Ball <i>et al.</i> (1988) [Ball 88] Cerella (1985) [Cerella 85] Scialfa (1987) [Scialfa 87]
Fatigue	Jebaraj <i>et al.</i> (1999) [Jebaraj 99] Lin <i>et al.</i> (2009) [Lin 09] Brozek <i>et al.</i> (1947) [Brozek 47]
Concentration	Sagi (2010) [Sagi 11]
Formation/Feedback	Chabukswar et Grimes (2003) [Chabukswar 03] Gramopadhye <i>et al.</i> [Gramopadhye 97] Wang <i>et al.</i> (1997) [Wang 97] Gramopadhye <i>et al.</i> [Gramopadhye 97] Rebsamen <i>et al.</i> (2010) [Rebsamen 10] Megaw (1979) [Megaw 79]
Mémoire	Sagi (2010) [Sagi 11] Arani <i>et al.</i> (1984) [Arani 84] Shore et Klein (2000) [Shore 01] Maxwell <i>et al.</i> (2003) [Maxwell 03]
Motivation	Rousseau (1977) [Rousseau 77] Hays et Hill (2001) [Hays 01] Lawler III (1969) [Lawler III 69]

Pour Megaw (1979), donner un feedback aux contrôleurs sur leur performance, sert à maintenir leur motivation, les informe, les aide dans leur formation et contribue à maintenir le standard de l'entreprise [Megaw 79]. Gramopadhye *et al.* (1997) [Gramopadhye 97], ainsi que Chabukswar *et al.* (2003) [Chabukswar 03], ont montré que les résultats d'un contrôle visuel dépendent du type de feedback, cognitif ou économique, donné aux contrôleurs.

La mémoire du contrôleur joue également un rôle important dans la détection des défauts, par exemple, comme le montrent Shore et Klein (2000) [Shore 01] et Arani *et al.* (1984) [Arani 84] concernant l'utilisation de la mémoire selon les différents types de stratégies d'exploration.

Enfin, Lawler III (1969) [Lawler III 69], et plus récemment Hays et Hill (2001) [Hays 01], insistent sur la nécessaire implication du contrôleur, et de sa motivation, dans le contrôle. Cela implique d'associer le contrôleur dans la conception de son travail (la tâche à réaliser et sa participation dans l'organisation de l'entreprise) et dans le suivi des performances du contrôle. La motivation ne dépend pas que du contrôleur, mais également de la vision qu'il a de l'entreprise.

2. LES ACTIONS EN EXPLORATION

Les facteurs pouvant influencer la détection des anomalies lors d'un contrôle visuel couvrent, nous l'avons vu, l'ensemble des 5 "M". Il est possible d'agir sur certains de ces facteurs pour améliorer les performances de la détection des anomalies présentes sur un produit. C'est particulièrement le cas des facteurs liés à la Méthode, au Moyen et à la Main d'œuvre. C'est en revanche plus difficile pour les facteurs liés à la Matière ou liés au Milieu. Il n'est pas, par exemple, possible d'imaginer de pouvoir changer les caractéristiques physiques du produit à contrôler pour mieux détecter ses anomalies. Concernant le Milieu, le contrôle visuel, là encore les actions visant à agir sur les facteurs de ce type sont plus limitées. Le plus souvent en effet, le contrôle visuel se déroule durant les étapes de fabrication du produit et il est généralement difficile de changer les conditions et les moyens utilisés pour cette fabrication pour améliorer les conditions de détection des anomalies.

Nos travaux ont donc ciblé les facteurs liés à la Méthode, au Moyen et à la Main d'œuvre. Nous détaillons dans les paragraphes qui suivent l'ensemble des actions qui peuvent être menées par l'entreprise sur chacun de ces trois types de facteurs.

2.1. ACTIONS MOYEN

Comme nous l'avons vu précédemment, le contrôle visuel peut être fortement influencé par la qualité du système d'éclairage, le poste de contrôle, la couleur de fond, les outils mis à disposition pour effectuer le contrôle et le type d'entraînement suivi par les contrôleurs. Nous avons centré nos travaux plus spécifiquement sur le système d'éclairage et le poste de contrôle, les outils étant dépendants du produit et le type d'entraînement de l'organisation de l'entreprise.

Le référentiel de bonnes pratiques BP X 10-042 (2006) recommande l'utilisation d'une cabine pour réaliser des contrôles sensoriels et liste plusieurs conditions à réunir dont celle d'avoir un éclairage adapté et maîtrisé [AFNOR 06a].

« Les problèmes liés à l'éclairage sont très souvent sous-estimés. Or, 80% des impressions sensorielles sont de nature optique et 25% du potentiel énergétique est utilisé pour la fonction visuelle. Un mauvais éclairage peut donc conduire à une fatigue visuelle et nerveuse et altérer la qualité du travail fourni. »¹⁰

Cette phrase de la CUSSTR souligne l'importance de l'éclairage pour la santé et la sécurité au travail. Dans le domaine du contrôle visuel, l'éclairage est tout aussi fondamental. L'entreprise doit investir dans un système d'éclairage qui répond à ses besoins et à ceux des contrôleurs, i.e.

¹⁰ <http://www.cusstr.ch/repository/41.pdf>

un système qui fournisse les conditions nécessaires pour une bonne visibilité¹¹ et une exécution précise et rapide d'une tâche de contrôle visuel, facile et confortable.

L'INRS (Institut National de Recherche et Sécurité) [INRS 09] recommande l'utilisation de l'éclairage naturel autant que possible. Celui-ci donne en effet aux travailleurs un environnement plus approprié à un bon équilibre physiologique et psychologique. Cependant, comme nous l'avons indiqué précédemment, le manuel de bonnes pratiques BP X 10-042 (2006) [AFNOR 06a] recommande de masquer les fenêtres proches des locaux de contrôle. Dans ce cas, il faut donc investir dans un système d'éclairage artificiel de haute qualité. Pour cela il faut respecter quelques principes, parmi lesquels ceux [INRS 99]:

- De disposer d'un éclairage suffisant. Selon la tâche à accomplir, l'éclairage conseillé peut varier énormément, comme le montre le Tableau 4.6 [AFNOR 11]. Pour un contrôle visuel, la Norme NF EN ISO 3668 précise un éclairage minimal de 1000lux [ISO 03b]. L'INRS précise que pour les activités de finition, de contrôle qualité et inspection, l'éclairage doit être élevé, de 750 à 1000 lux. À partir de 2000 lux, l'éclairage provoque un éblouissement et fausse la vision colorée de matériaux [AFNOR 06a].

Tableau 4.6 Éclairage conseillé suivant les activités et les tâches à effectuer [INRS 99].

Activités	Éclairage (lux)
Blanchisseries, nettoyage à sec	
- Triage et marquage, nettoyage à sec, repassage	300
- Contrôle et réparation	750
Salons de coiffure	500
Construction et réparation de véhicules	
- Carrosserie e montage	500
- Peinture	750 - 1000
Travail du bois	
- Travaux sur machines	500
- Contrôle qualité	1000
Bureaux	
- Écriture - lecture	500
Magasins	500

¹¹ La "visibilité" est le terme qui définit « la qualité ou l'état d'un objet à être perceptible par l'œil » [Floru 96]. Ce terme est utilisé pour « évaluer la facilité avec laquelle le détail le plus fin d'une tâche peut être détecté ou reconnu » [Floru 96]. La visibilité dépend des dimensions du détail à distinguer, de sa forme, de sa luminance, du temps d'observation disponible pour percevoir le détail, de la luminance d'adaptation, du contraste de luminance entre le détail et le fond, du contraste chromatique, de l'état physiologique des yeux, de l'expérience de l'observateur par rapport à la tâche, de la position du détail dans le champ visuel, de l'anticipation du lieu et du moment d'apparition du détail dans le champ visuel [Floru 96].

- D'éviter l'éblouissement, direct (source lumineuse dans le champ visuel) ou indirect (réflexions sur des objets, surfaces, etc.). Aucune source lumineuse non protégée ne doit apparaître dans le champ visuel de l'opérateur, dans un angle de 30° au-dessus de la ligne horizontale de l'œil. Les tubes fluorescents doivent être placés préférentiellement perpendiculairement à la ligne de vision. Les luminaires doivent être équipés de grilles de défilement ou diffuseur [AFNOR 06a].
- D'éviter des contrastes trop importants dans le champ visuel. Un contraste trop élevé diminue l'efficacité de la vision ainsi que le confort visuel. Dans la zone de travail, le champ visuel de l'opérateur doit avoir un éclairage homogène. La relation entre la luminance du plan de travail et celle de l'environnement immédiat doit avoir un rapport maximum de 3. L'écart entre l'éclairement de la zone de travail et l'éclairement général ne doit pas dépasser un rapport de 5 [INRS 99].
- De tenir compte des caractéristiques des opérateurs. L'éclairage peut varier selon les caractéristiques de l'opérateur et selon la tâche à réaliser. La norme NF X 35-103 (1990) propose un diagramme pour déterminer l'éclairement nécessaire en fonction des facteurs tels que l'âge de l'opérateur, les facteurs de réflexion et contraste, la fréquence de la tâche, etc. [AFNOR 90]. Dans le cas où un éclairage élevé est nécessaire, il faut mettre en place des luminaires réglables en hauteur et/ou direction, ainsi que des dispositifs permettant le réglage de l'intensité lumineuse et d'allumage/extinction des sources locales d'éclairage.
- D'assurer un rendu des couleurs compatible avec les tâches à réaliser. « *Le rendu de couleur est la capacité de la lumière de la source lumineuse à restituer les couleurs, comme le fait la lumière du jour* ». En général, il est conseillé d'utiliser un indice de rendu de couleur (IRC) supérieur ou égal à 85. Par contre, si la couleur joue un rôle important dans le contrôle visuel, les lampes avec un indice supérieur à 95 doivent être utilisées. Par exemple, si l'on doit évaluer les écarts de teinte, un IRC de 97 est exigé [AFNOR 06a].
- D'intégrer la maintenance des appareils dans les décisions d'achat. Des lampes à longue durée de vie doivent être privilégiées et l'accès à ces lampes doit être facilité. Il est recommandé de faire attention à la qualité de lampes. Il est, par exemple, recommandé d'avoir un seul fournisseur de lampes ou un degré de qualité suffisant pour limiter l'impact dû à une hétérogénéité des fournisseurs [AFNOR 06a].

Pour l'installation d'un système d'éclairage, il faut prendre en compte deux critères : la tâche à réaliser et l'entendue de la zone de travail habituelle. Le contrôle visuel est concerné par deux cas [INRS 99] :

- Cas 1 : Poste fixe avec une zone de travail habituelle limitée à quelques mètres, dans des locaux de hauteur sous plafond supérieure à trois mètres.

- Cas 2 : Poste fixe avec une zone de travail habituelle limitée à 1 mètre, quelle que soit la hauteur du local.

Pour le cas 1, la solution optimale est la suspension d'un ou plusieurs luminaires au-dessus de la zone de travail. Ces luminaires sont équipés d'un éclairage du type « lumière du jour D65 » ou autre (par exemple, D50) (voir Tableau 4.7). Les équipements sont composés de tubes fluorescents et équipés de réflecteurs et de grille de défilement et ils sont généralement orientables. Par contre, ils doivent être correctement mise en place pour que l'éclairage soit suffisant et homogène. Il faut également s'assurer qu'il n'existe pas de zones d'ombre et d'effet de masque, responsables de l'apparition d'un contraste trop important dans le champ visuel [AFNOR 06a].

Tableau 4.7 Principaux illuminants utilisés – normalisés par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) [AFNOR 06a]

Désignation	Caractéristiques	Température de couleur (K)
Illuminant A	Lumière émise par un corps noir porté à la température de 2858K (=lampe à filament de tungstène de 500W)	2858
Illuminant D	Différentes lumières du jour. Un indice lié à la température de couleur proximale est toujours associé à un illuminant D	
D65	Le plus utilisé représente la lumière du jour en Europe (moyenne des lumières durant une journée)	6500
D50	Lumière du jour par ciel blanc ouvert - Illuminant normalisé par l'ISO, pour les arts graphiques, l'imprimerie et la photographie	5000
Illuminant F	12 illuminant de F1 à F12 correspondant aux lumières émises par des lampes fluorescentes	
F2 (CWF)	Lampe fluorescente standard US - blanc froid	4150
F7	Tube fluorescente - Lumière du jour/spectre à larges bandes	
F11 (TL84)	Tube fluorescente industriel standard Europe - blanc/spectre à trois bandes (raies) étroites	4100

Pour le cas 2, la solution optimale est l'utilisation de lampes posées sur le plan de travail. Les tâches qui ont un besoin spécifique d'éclairage ont souvent besoin d'un éclairage local, l'éclairage général ne suffisant pas. Les tâches de précision, par exemple, sont généralement concernées par ce cas. Cependant, avant de définir le système d'éclairage local, il faut définir la nature de la tâche à réaliser. Un système d'éclairage sert à améliorer la visibilité du travail qui dépend de certains facteurs. Le Tableau 4.8 indique le type de luminaire à utiliser selon les caractéristiques de la tâche visuelle. Les groupes de luminaires sont les suivants [Floru 96] [CIE 86] :

- CH : unités qui concentrent la lumière avec une luminance élevée.
- SH : sources de petite surface, ayant une intensité lumineuse et une luminance élevée.
- SM : réflecteurs pour lampes fluorescentes à luminance modérée, assurant une distribution large.

Tableau 4.8 Classification des tâches visuelles et des types de luminaires [CIE 86]

Caractéristique générales des tâches visuelles	Type de tâche	Exemple Exigences d'éclairage	Type de Luminaire recommandé
A. Matériaux opaques			
1. Détail et fond diffus			
- Surface continue	Correction d'épreuves (journaux)	Visibilité élevée et confort	SM ou SH
- Surface discontinue	Rayures, cassures	Mettre en évidence les discontinuités, le détail	CH, SM, SH
- Objets tridimensionnels	Salissures sur pièces	à faible contraste	
2. Détail et fond spéculaires			
- Surface continue	Surface inégale, déformée, bosse, creux	Mettre en évidence les inégalités de la surface	PL
- Surface discontinue	Rayure, gravure, poinçon	Créer un contraste entre l'entaille et la surface spéculaire	SM, UL, PL
- Couche spéculaire et fond spéculaire	Inspection de la finition d'un revêtement	Mettre en relief les endroits non couverts	UL
- Objets tridimensionnels	Bosse sur argenterie, rayures	Relever les déformations Relever les discontinuités	PL, UL UL
3. Surfaces spéculaires et diffuses combinées			
- Détail spéculaire sur fond diffus	Encre luisante ou marque au crayon sur papier ordinaire Poinçon, marques sur métal	Produire un maximum de contraste sans voile de réflexion	SM, UL
- Détail diffus sur fond spéculaire clair	Gradations micrométriques sur une échelle d'acier	Créer des réflexions brillantes des détails	SH ou SM
- Détail diffus sur fond spéculaire sombre	Marques de cire sur une carrosserie d'automobile	Créer une luminance uniforme, faible sur un fond spéculaire Produire une luminance élevée sur fond sombre	UL ou SM SM ou SH
B. Matériaux translucides			
1. Surface diffuse			
	Verre dépoli, gravé, plastic, tissus, bonneterie	Visibilité maximale des détails (surface et structure des matériaux)	Pareil à A1 Éclairer à travers SH, SM, UL
	Ombre de la lampe	Relever les imperfections des matériaux	Éclairer à travers SH
2. Surface spéculaire			
	Rayure sur verre opale ou plastic	Visibilité maximale des détails (surface et structure des matériaux)	Pareil à A1 Éclairer à travers SH, SM, UL
	Globe de verre	Relever les imperfections des matériaux	PL
C. Matériaux transparents			
Surface transparente			
	Plateau de verre	Visibilité des détails internes ou externes des matériaux	PL plus en avant, puis CH devant le fond noir
	Bouteilles, articles de verre (vides ou remplies de liquide clair)	Relever les imperfections des matériaux	UL ou PL
D. Matériaux transparents sur matériaux opaques			
1. Fond diffus			
	Outils	Visibilité maximale de l'échelle et de l'aiguille	CH, SH
	Dessus de table vernie	Visibilité maximale du détail sur fond spéculaire	PL
2. Fond spéculaire			
	Miroir	Visibilité maximale du détail sur ou dans le matériel transparent Visibilité maximale du détail sur fond spéculaire	CH PL

- UL : unités à moyenne et faible luminance uniforme disposées derrière un panneau de diffusion.
- PL : unités du groupe précédent mais comportant une configuration de lignes ou bandes superposées.

2.2. ACTIONS MÉTHODE

Comme nous l'avons évoqué précédemment, plusieurs facteurs liés à la méthode peuvent influencer la détection des anomalies, comme la procédure de contrôle (le type d'anomalie à détecter, la stratégie d'exploration, le rythme de contrôle, le format de présentation de la procédure), l'utilisation ou non d'un grossissement, la rotation de tâches et les pauses. Nous nous limiterons aux actions concernant la procédure de contrôle. En effet, le choix du grossissement est effectué par l'entreprise, selon son besoin, pour respecter le standard de qualité souhaité. Concernant la rotation de tâches, le contrôleur ne fait généralement pas que du contrôle et occupe d'autres tâches, comme par exemple, des tâches de fabrication et/ou de manipulation de produits. Quant aux pauses, elles sont généralement prévues par l'entreprise.

Le premier point à considérer dans une procédure de contrôle concerne l'anomalie à détecter. Comme nous l'avons vu dans le Chapitre 3, les défauts à détecter sont figés dans le contrôle visuel avec un objectif technique. Rao et al. (2006) ont montré que la complexité de ces défauts joue un rôle important dans le temps de détection [Rao 06]. La complexité est donnée par le type de défaut, sa localisation, le nombre de défauts et sa taille. Lorsque seule la présence ou non d'un type de défaut est utilisée pour décider de l'acceptabilité du produit, le temps de détection est relativement court. Il s'accroît cependant dès qu'un critère supplémentaire est utilisé, comme par exemple la taille de ce défaut, ou dès que le nombre de défauts à détecter augmente.

Pour le contrôle visuel avec un objectif esthétique, le contrôleur doit détecter toute anomalie pouvant influencer la perception esthétique du produit. Le contrôleur est donc confronté à des anomalies de grande complexité (type d'anomalie, taille, couleur, forme, localisation, etc.). Ce sont les interactions entre ces caractéristiques et celles de l'environnement local qui vont déterminer la facilité à les détecter.

Nous avons présenté, dans le Chapitre 2, les lois d'organisation de la théorie de Gestalt. Nous avons pu montrer comment une anomalie pouvait être plus ou moins aisément perçue, en fonction de l'application possible ou non de ces lois (loi de similitude, proximité, clôture ou continuité). Il faut remarquer que nous avons présenté ces lois pour expliquer et aider à évaluer les attributs « Contraste de forme » et « Contraste de couleur ». Ces lois peuvent être également utilisées pour comprendre pourquoi une anomalie peut être plus aisément détectée qu'une autre.

Une des limites des lois de Gestalt, mises en avant par les cognitivistes, est que ces lois amènent à considérer les caractéristiques des objets perçus (forme, couleur, ou orientation) sans prendre en compte les interactions entre ces caractéristiques. Ces lois suggèrent également une perception immédiate [Luyat 09]. En 1985, Anne Treisman, une psychologue cognitive, formalisait la perception en la décomposant en deux phases : une phase dite pré-attentive et une deuxième phase de traitement focalisé [Weil-Barais 05]. Elle prend également en compte l'interaction entre les caractéristiques de la configuration.

Durant la phase pré-attentive, l'analyse visuelle se base sur une prise en compte des caractéristiques de base, dites primitives [Treisman 85]. Par exemple, dans la Figure 4.1a. et la Figure 4.1b., trois groupes d'objets peuvent être perçus de façon claire. Les primitives (respectivement Forme pour la Figure 4.1a et Couleur pour la Figure 4.1b) permettent de faire cette distinction. Dans la Figure 4.1c en revanche, certains observateurs ne distingueront que deux groupes d'objets, les ronds blancs du centre partageant une primitive (forme) avec le groupe de la gauche et une primitive (couleur) avec le groupe de droite. [Treisman 85].

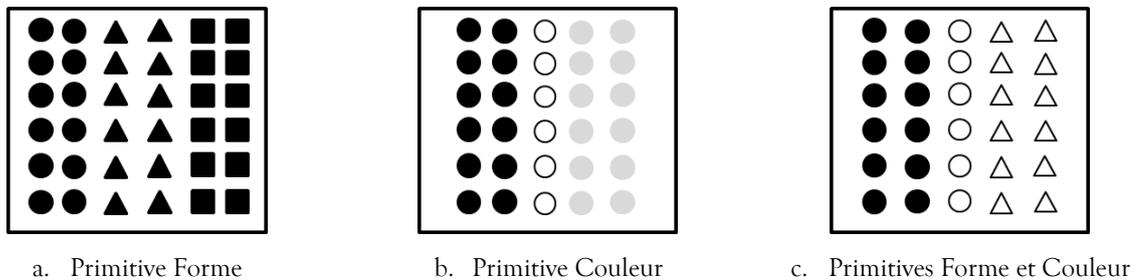


Figure 4.1 Primitives et phase pré-attentive [Treisman 85]

Dans un contrôle visuel, le contrôleur détectera, de façon pré-attentive plus facilement, une anomalie ("l'anomalie lui saute aux yeux") si celle-ci se différencie par une seule primitive (couleur, forme, orientation ou brillance) des autres configurations situées à sa proximité. Dans la Figure 4.2, l'anomalie est détectée facilement (le triangle dans la Figure 4.2a. se distingue par sa forme, le rond gris dans la Figure 4.2b. se distingue par sa couleur et le triangle tourné vers la droite dans la Figure 4.2c. se distingue par son orientation). Pour cet exemple, la détection immédiate s'exprime également par la loi de similitude de Gestalt.

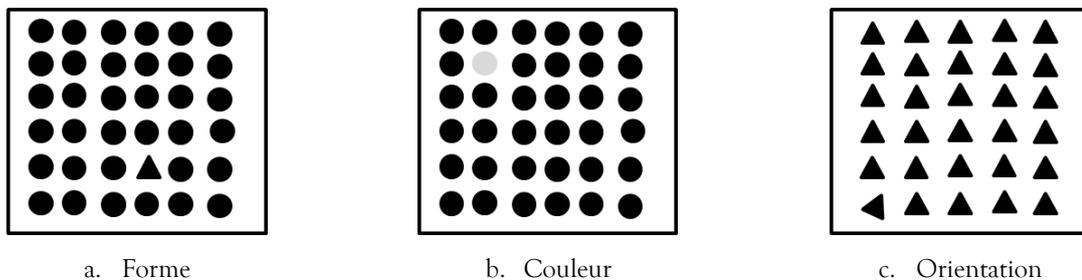


Figure 4.2 Détection - Phase pré-attentive

Lorsque l'anomalie ne se distingue des autres objets que par une seule primitive, elle peut être plus facilement perçue. Mais cela n'est pas systématique comme l'illustre la Figure 4.3. Dans cet exemple, l'observateur distinguera effectivement les anomalies (les mêmes que celles de la Figure 4.2) si son observation se pose successivement sur plusieurs zones très localisées. En revanche, il est probable que certaines de ces anomalies lui échappent si son observation se pose de manière globale sur l'ensemble de la zone d'observation. Cela laisse à penser qu'une bonne détection, durant la phase pré-attentive, consiste à parcelliser autant que possible l'observation pour mieux distinguer les anomalies.

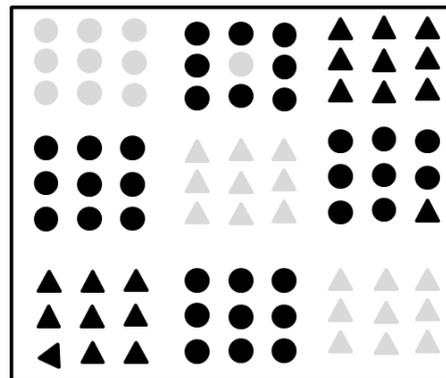


Figure 4.3 Phase pré-attentive - Présence de plusieurs textures (adapté de [Treisman 85])

La phase pré-attentive ne suffit cependant pas à détecter toutes l'ensemble des anomalies présentes sur une surface. C'est particulièrement le cas lorsque la zone d'observation présente simultanément plusieurs primitives. Dans la Figure 4.4 par exemple, les deux anomalies présentes (le carré noir et le triangle marron) sont difficilement détectables. Les deux anomalies partagent la couleur et la forme avec les autres objets présents sur la zone observée.

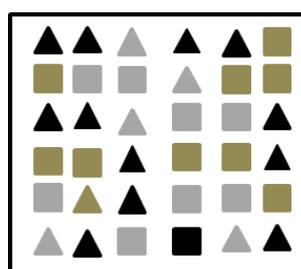


Figure 4.4 Détection - conjonction de primitives (adapté de [Treisman 85])

La phase pré-attentive ne suffit donc pas à détecter l'ensemble des anomalies. Une détection nécessite le plus souvent un traitement supplémentaire. Treisman (1985) [Treisman 85] et Treisman et Gormican (1988) [Treisman 88] citent de nombreux exemples, notamment liés aux asymétries entre objets, pour montrer ce qui relève d'une détection pré-attentive, la première phase de la perception, et ce qui nécessite une détection plus focalisée, la seconde phase de la

perception. La *Feature Integration Theory* (FIT) explique comment les primitives de la configuration conditionnent la vitesse de détection des groupes d'objets. Treisman considère que, si une configuration, sa recherche s'effectue en parallèle¹² et que, si elle se diffère par plusieurs primitive, sa recherche s'effectue en série¹³ [Treisman 85].

D'autres théories ont été développées, surtout par rapport aux mécanismes de recherche (parallèle et/ou série). Duncan et Humphreys (1989) considèrent que la recherche s'effectue, quelles que soient les configurations, à la fois en parallèle et en série et que la difficulté d'une détection n'est pas liée à la présence simultanée de plusieurs primitives, mais à la similarité entre l'objet recherché et les autres objets présents [Duncan 89]. Pour Wang *et al.* (1994), la recherche en parallèle s'effectue uniquement lorsque l'objet recherché n'est pas familier à l'observateur et que les objets qui l'entourent le sont [Wang 94]. Enfin, pour Gilden *et al.* (2010), la recherche en série s'effectue quand l'objet recherché et les autres objets ont un effet miroir entre eux ou quand l'objet recherché n'a pas un significat par rapport à son orientation [Gilden 10].

Le type de recherche, en parallèle ou en série, impacte le temps de détection. Mais ce sont vraisemblablement les interactions entre les caractéristiques de l'anomalie et les autres objets qui l'environnent qui ont un impact bien plus important encore sur cette vitesse. C'est là toute la difficulté du contrôle visuel pour lequel, à moins de disposer de la liste exhaustive de toutes les anomalies qui peuvent être détectée, le contrôleur ne dispose souvent pas de la totalité des caractéristiques des anomalies qu'il doit détecter. En effet, une anomalie peut présenter simultanément plusieurs caractéristiques (couleur, forme, relief, orientation et localisation) dans un décor aux caractéristiques là encore très variées. La détection d'une anomalie peut dans certains cas être très rapide, mais elle nécessite dans la majorité des cas que le contrôleur fasse une exploration plus poussée. Nous pensons que le choix de la stratégie d'exploration, et les applications que nous avons réalisées dans les entreprises avec lesquelles nous avons collaboré l'ont montré, est déterminant pour la vitesse et la qualité de la détection.

De manière très globale, il y a deux stratégies d'exploration d'une anomalie : une stratégie aléatoire et une stratégie systématique. La stratégie aléatoire considère que le processus de recherche est sans mémoire et que chaque zone de fixation peut, comme l'illustre la Figure 4.5a qui montre le parcours de l'œil du contrôleur, être observée plusieurs fois, comme si elle n'avait jamais été observée auparavant. La stratégie systématique considère au contraire, comme l'illustre la Figure 4.5b, que le contrôleur a une mémoire dans la détection et que chaque zone de fixation est vue une seule fois durant l'exploration d'une surface [Nickles III 03] [Wang 97].

¹² *Recherche en parallèle* : l'anomalie est détectée parmi les autres objets sans aucune difficulté (« elle saute aux yeux ») et une seule fixation de manière globale de la zone est généralement suffisante pour sa détection.

¹³ *Recherche en série* : l'observateur doit regarder chaque objet présent, jusqu'à qu'il trouve l'anomalie. La recherche s'effectue par des fixations localisées et successives

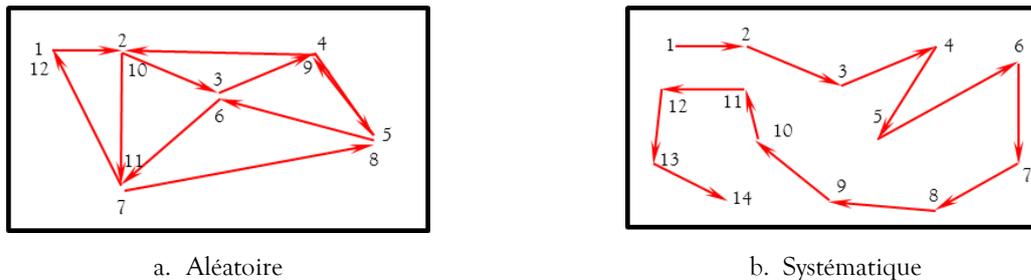


Figure 4.5 Deux stratégies d'exploration

Arani et al. (1984) [Arani 84] et Wang et al. (1997) [Wang 97] ont montré que la stratégie systématique améliore significativement la détection par rapport à une stratégie aléatoire. C'est donc ce type de stratégie qu'il faut privilégier parce qu'il accroît la probabilité de détection de l'anomalie et le temps de sa détection. Si l'homme, naturellement, utilise une stratégie qui se trouve entre l'aléatoire et la systématique et a donc une mémoire imparfaite [Morawski 80], il peut devenir avec l'entraînement de plus en plus systématique et augmenter ainsi sa performance en détection [Wang 97].

2.3. ACTIONS MAIN D'ŒUVRE

Le contrôle visuel est principalement réalisé par l'homme. Son efficacité et son efficacité ne sont pourtant pas très satisfaisantes [Juran 35] [Nickles III 03]. Le plus souvent, par rapport à des moyens automatiques de contrôle, il est bien meilleur dans l'étape de décision mais nettement moins bon dans l'étape de détection. On considère généralement que l'efficacité d'un contrôle effectué par l'homme est de 80%, soit 20% d'erreurs qui trouvent leur origine dans une mauvaise détection ou une mauvaise décision.

La difficulté à maintenir un état permanent de concentration est une des causes d'erreurs les plus souvent évoquées. Il existe des processus subconscients et autonomes (liés au fonctionnement de l'organisme) qui peuvent influencer l'attention du contrôleur et qui peuvent lui rendre non visible une anomalie y compris lorsqu'il fixe la zone où elle est présente. Son attention peut également être impactée par la fatigue, le stress, l'inconfort physique, le bruit etc. [Sylla 95].

Parmi les autres facteurs qui influencent l'efficacité du contrôle visuel, on peut citer le niveau d'expérience du contrôleur, son niveau d'entraînement, son mouvement oculaire, ou encore, plus simplement, son acuité visuelle [Chabukswar 03] [Sannen 09]. Mais, sa mémoire et à travers elle, l'apprentissage du contrôle, est également un élément déterminant de cette efficacité qu'il s'agit d'améliorer.

2.3.1. MÉMOIRE ET EXPLORATION VISUELLE

Nous avons vu précédemment que la stratégie d'exploration doit être privilégiée pour une détection efficace. Le contrôleur doit pour cela explorer chaque zone et ne pas y revenir ensuite. Ceci lui demande d'utiliser sa mémoire [Kristjansson 00].

En effet, si le contrôleur sait qu'une anomalie est présente sur la surface à explorer, en moyenne, c'est la moitié des zones qu'il explorera. S'il ignore si l'anomalie est présente ou non sur la surface, il explorera différentes zones jusqu'à détecter l'anomalie, si elle présente. En revanche, si l'anomalie n'est pas présente sur la surface, c'est l'ensemble des zones de la surface qu'il explorera pour en conclure qu'aucune anomalie n'est présente [Shore 01]. Posner et Cohen (1984) ont proposé un mécanisme, appelé IOR (*Inhibition Of Return*), pour éviter une exploration d'une zone déjà explorée [Posner 84]. Ce mécanisme fait appel au processus de mémorisation du contrôleur. Castel *et al.* (2003) ont explicité le rôle de la mémoire de travail dans les tâches de recherche visuelle¹⁴ [Castel 03]. En fait, l'IOR se désactive dès lors que le contrôleur doit partager sa mémoire avec une tâche parallèle à celle de la recherche de l'anomalie.

2.3.2. MÉMOIRE ET APPRENTISSAGE

La mémoire associée à l'apprentissage est la mémoire procédurale. Elle est responsable des apprentissages sensori-moteurs, du conditionnement, des savoir-faire, etc. et permet l'acquisition des habiletés de façon automatique. Elle s'exprime par une amélioration de la performance du sujet par rapport à une tâche, cette amélioration s'exprimant en général par une diminution du temps utilisé pour réaliser cette tâche. Cet apprentissage ne nécessite pas de se souvenir des essais précédents. Par contre, pour arriver à cet apprentissage, le sujet doit disposer d'une mémoire déclarative¹⁵ [Eustache 98] [Lieuury 11]. Il a donc besoin d'un nombre suffisant d'essais (i.e. de pratique) pour arriver à l'automatisme.

Maxwell *et al.* (2003) ont montré que la mémoire aide à améliorer la performance seulement si les individus s'en servent [Maxwell 03], cette mémoire de travail étant activée par des feedbacks donnés aux individus sur leur performance. Cela nous montre l'importance, dans le contrôle visuel, des feedbacks lors de tests réalisés avec les contrôleurs, sur leur performance. Les contrôleurs font le rapport entre leur résultat et la stratégie qu'ils ont utilisé, pour trouver une solution capable d'améliorer leur performance.

¹⁴ La mémoire de travail sert à maintenir temporairement et à manipuler les informations pendant la réalisation de tâches cognitives [Eustache 98]. Elle possède des caractéristiques qui la rapproche de la mémoire à court terme, comme celle d'être transitoire (elle ne porte que sur une petite quantité d'informations), d'être très sensible à l'oubli et aux interférences [Cordier 10].

¹⁵ La mémoire déclarative porte sur des informations dont on peut rendre compte ou que l'on peut transmettre par le langage. Le langage joue le rôle vecteur particulièrement efficace des informations mémorisées [Cordier 10]. Elle prend en compte les souvenirs et la reconnaissance consciente de ce que l'on fait et des épisodes [Lieuury 11].

Un autre facteur important à considérer est le transfert d'apprentissage en fonction d'un apprentissage antérieur. Il existe trois types de transfert [Lieury 11] :

- Le transfert bilatéral : l'individu apprend à faire avec une main ce qu'il sait déjà faire avec l'autre. Il prendra moins de temps pour apprendre avec la deuxième main qu'il a pris pour la première.
- Apprendre à apprendre : plus on apprend à réaliser une tâche, plus vite on apprend à réaliser une tâche de même type. En effet, la mémoire trouve des parties équivalentes ou des stratégies qui rendent plus faciles les nouveaux apprentissages, en mettant en évidence l'importance de l'entraînement.
- Le transfert négatif : un apprentissage antérieur peut gêner le suivant (par exemple, taper avec les dix doigts quand on a appris à taper avec deux doigts).

3. RECOMMANDATIONS POUR AMÉLIORER LA PERFORMANCE DE L'EXPLORATION

Dans le paragraphe précédent, nous avons expliqué de façon plus détaillée les facteurs qui influencent l'exploration visuelle. Ces facteurs ont été séparés selon le diagramme d'Ishikawa, mais notre focus s'est limité aux facteurs liés au Moyen, à la Méthode et à la Main d'œuvre.

En tenant compte ces facteurs, nous donnons maintenant les recommandations pour que l'entreprise puisse améliorer la performance des contrôleurs par rapport à la détection d'anomalies.

3.1. RECOMMANDATIONS MOYEN

Nous avons présenté les principaux éléments à prendre en compte pour minimiser les facteurs liés au Moyen. Ces éléments ont été extraits de plusieurs normes qui définissent les conditions standards à réunir pour un poste de contrôle, les conditions d'éclairage, les conditions de l'environnement de travail, etc. Ces normes sont assez généralistes puisqu'elles ont été rédigées pour donner des indications pour plusieurs types de métier. Nous donnons ici les recommandations par rapport au poste de contrôle et du système d'éclairage adapté à un contrôle visuel d'aspect.

3.1.1. POSTE DE CONTRÔLE

Comme nous l'avons vu, le référentiel de bonnes pratiques BP X 10-042 (2006) recommande l'utilisation des cabines pour les essais sensoriels [AFNOR 06a]. Le recours à ces cabines pour le contrôle visuel n'est cependant pas toujours possible. C'était en tout cas le cas pour les entreprises avec lesquelles nous avons collaboré. Pour l'une d'elles, ce contrôle visuel est réalisé par les opérateurs de production tout au long du processus de fabrication du produit. Il n'est

pas possible de mettre en place des cabines tout au long de ce processus. Pour l'autre entreprise, la taille importante du produit ne permet pas d'utiliser une cabine. Il s'agit donc de créer un poste pour le contrôle visuel qui se rapproche au mieux des conditions d'une cabine de contrôle.

Une cabine est généralement conçue de manière à isoler le contrôleur de son environnement. Le poste de contrôle doit être envisagé sur le même principe avec des conditions qui permettent que le contrôle visuel soit réalisé de manière individuelle pour améliorer la concentration du contrôleur et l'isoler des avis extérieurs.

La couleur du poste de travail est également importante, soit pour éviter l'influence sur les couleurs des produits analysés, soit pour éviter l'éblouissement dû à un coefficient de réflexion inadéquat. Les coefficients de réflexion préconisés [AFNOR 06a], en fonction des surfaces de locaux, sont donnés dans le Tableau 4.9. Il est recommandé que les surfaces du poste aient un revêtement d'aspect mat ou satiné, de préférence de couleur gris très clair (gris N5 de Munsell) pour le plafond et clair (gris N7 ou RAL 7038) pour les murs, sols et fond. Le gris N7 de Munsell (référence : L=71,6, a=0, b=0 et $\Delta E=\pm 1$) est utilisé dans un but de discrimination des couleurs [AFNOR 06a] [AFNOR 03].

Tableau 4.9 Coefficient de réflexion [AFNOR 06a]

Surfaces do local	Coefficients de réflexion
Plafond	$\geq 0,070$
Murs	0,40 à 0,60
Sols	0,20 à 0,40
Fond par rapport à l'objet	0,25 à 0,50

Les cabines isolent le contrôle des perturbations de l'environnement. En l'absence de cabine, l'entreprise doit chercher autant que possible à minimiser les facteurs liés au Milieu, comme les lumières parasites, la lumière naturelle, les bruits, etc. Pour la lumière, il est recommandé de masquer toute fenêtre située à proximité par un rideau, de couleur gris neutre (gris N5 et N7 de Munsell) [AFNOR 06a].

3.1.2. SYSTÈME D'ÉCLAIRAGE

Nous avons présenté les principales caractéristiques qu'un système d'éclairage doit disposer. La prise en compte de ces caractéristiques pendant l'implantation du système d'éclairage permettra une meilleure visibilité par rapport à la tâche à accomplir et un meilleur confort visuel, minimisant ainsi la fatigue oculaire. Le Tableau 4.10 résume les recommandations à suivre pour un éclairage optimal.

Tableau 4.10 Résumé des recommandations pour un système d'éclairage adapté

Facteur	Recommandations
Niveau d'éclairage	1000 à 2000 lux
Éviter éblouissement	Utilisation de grille de défilement ou diffuseur Pas de source lumineuse non protégé dans un angle de 30° au-dessus de la ligne horizontale de l'œil Surfaces mat ou satiné – gris N5 ou N7 de Munsell
Éviter contraste	Rapport maximum de 3 pour les zones immédiates Rapport maximum de 5 pour l'éclairage général
Caractéristiques de l'opérateur	Niveau d'éclairage – suivre la norme NF X35-103 (1990) Mettre en place de luminaires réglables
IRC	>85
Maintenance	Préférer un seul fournisseur Entretien régulier du système
Choix du système	Zone de travail large – luminaire au-dessus de la zone – illuminant D65 Zone de travail de maximum 1 mètre – éclairage local – luminaires CH, SH, SM, UL ou PL selon la tâche visuelle

3.2. RECOMMANDATIONS MÉTHODE

Concernant les facteurs liés à la Méthode, nous nous sommes concentrés sur la stratégie d'exploration. Nous avons vu que le type d'anomalie à détecter peut influencer le type de recherche visuelle (série ou parallèle) utilisée par le contrôleur. La diversité d'anomalies pouvant être présentes sur la surface, ainsi que la diversité des décors, incite à choisir une stratégie d'exploration systématique. La procédure associée à cette stratégie doit inclure :

- Le « quoi » : ce que le contrôleur doit détecter.
- Le « où » : les zones à explorer.
- Le « temps » : le temps disponible pour l'exploration.
- Le « comment » : le parcours que les yeux du contrôleur, le mouvement angulaire, etc.
- Le « quand » : l'étape de production concernée par le contrôle.

Pour le « quoi », comme nous l'avons dit précédemment, la procédure peut lister les anomalies qui apparaissent fréquemment sur la surface contrôlée. Cette liste peut être générale (par exemple, marque, déformation, hétérogénéité ou pollution) ou plus précise (par exemple, rayure, graton, pollution, choc, etc.).

Pour le « où », la procédure doit indiquer la surface du produit concernée par le contrôle (façade, bords, contre face, chant, etc.).

Le « temps », peut être donné à titre indicatif, ou selon le rythme moyen de production permettant le contrôle sans interrompre le cycle de production.

Le « quand » sert à indiquer à quel moment de la production le contrôle doit être réalisé (en début de série, sur prélèvement régulier, ...).

Le « comment » détaille le parcours des yeux à réaliser pour une stratégie d'exploration systématique (Figure 4.6), l'ordre de contrôle des zones, l'orientation de la pièce (verticale et/ou horizontale) et le mouvement angulaire à réaliser (Figure 4.7).

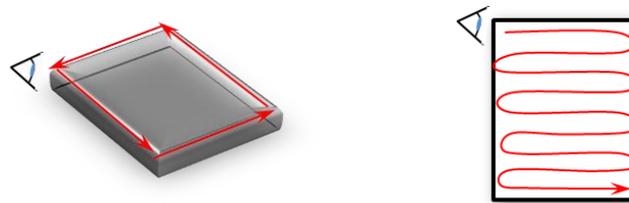


Figure 4.6 Exemples de parcours des yeux

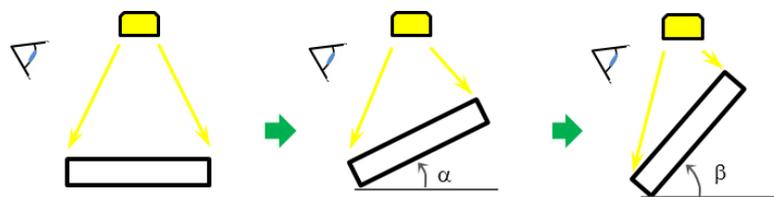


Figure 4.7 Exemples de mouvement angulaire

Comme l'illustre la Figure 4.6, nous recommandons que le parcours des yeux suive le même sens que la lecture d'un document (de haut à gauche et de haut en bas) avec un modèle d'inspection systématique du type de celui proposé par Nickles III et al. (2003) [Nickles III 03]. L'aspect « systématique » du contrôle est également apporté par l'ordre d'exploration qui indique au contrôleur dans quel ordre les zones de la surface doivent être explorées et qui permet d'éviter que le contrôleur oublie d'explorer une zone.

Le mouvement angulaire à réaliser (Figure 4.7) est également important dans la détection d'anomalies pour tout type de surface. Il permet une réflexion de la lumière par l'anomalie qui a pour effet de provoquer ou augmenter le contraste de luminance, facilitant ainsi la détection [Näsänen 01].

3.3. RECOMMANDATIONS MAIN D'ŒUVRE

Pour la Main d'œuvre, il y a plusieurs facteurs qui influencent la détection d'anomalies, comme par exemple, les différents niveaux d'expérience et d'entraînement du contrôleur, l'acuité visuelle, le mouvement oculaire, la stratégie d'exploration utilisée, la fatigue etc. [Chabukswar 03] [Sannen 09] [Sannen 11].

Pour limiter la fatigue, les recommandations liées au Moyen sont adaptées, car c'est en général le moyen de contrôle qui est responsable de la fatigue des contrôleurs, qu'elle soit oculaire ou physique.

Concernant l'acuité visuelle, des tests peuvent être mis en place lors de la sélection des nouveaux contrôleurs.

Pour la stratégie d'exploration, nous avons vu que la mémoire peut influencer le type de stratégie utilisée et son apprentissage.

Il est recommandé de faire appliquer aux contrôleurs la procédure de contrôle et de s'assurer qu'elle est correctement appliquée. Si aucune procédure de contrôle n'est mise en place, le contrôleur créera son propre automatisme, rendant difficile, via un transfert négatif d'apprentissage, l'application d'une autre stratégie de recherche. Le nouvel apprentissage sera d'autant plus difficile à acquérir par le contrôleur si celui-ci ne voit pas l'intérêt de changer sa stratégie. Lors de la mise en place d'une nouvelle stratégie d'exploration, il est donc important de l'associer à un programme d'entraînement à son application. Le retour des résultats sur leur performance avec l'application de la nouvelle stratégie est également, nous l'avons dit précédemment, un facteur de motivation important qui améliore la détection des anomalies.

La motivation des contrôleurs peut également être obtenue par la formation. Celle-ci joue également un rôle important dans la mise en place de la procédure de contrôle [Chabukswar 03] [Gramopadhye 97] [Wang 97] [Gramopadhye 97].

Il est donc recommandé pour le contrôle visuel de développer un module de formation, celui-ci devant inclure :

- Une présentation des étapes du contrôle
- Un rappel sur l'importance du contrôle visuel (constat actuel et conséquences)
- Une présentation des facteurs d'influence du contrôle visuel
- Les solutions mises en place par l'entreprise pour minimiser l'impact de ces facteurs (éclairage, procédure de contrôle, etc.)

Il est important d'expliquer au contrôleur que le contrôle visuel se décompose en trois étapes bien distinctes (exploration, évaluation et décision) et que chaque étape possède ses particularités et est sensible à des facteurs spécifiques. La formation doit donc se décomposer en trois volets. Pour le volet « Exploration », il est important de montrer l'impact d'une mauvaise détection sur les clients (internes et externes). Comme nous l'avons vu, l'exploration est sensible à plusieurs facteurs (Milieu, Moyen, Main d'œuvre, Matière et Méthode). Il est fondamental d'expliquer au contrôleur en quoi ces facteurs influencent les résultats du contrôle et comment minimiser leur influence.

Pendant la formation des contrôleurs, il est également souhaitable de faire le rappel des procédures de contrôle et de montrer l'importance du mouvement angulaire lors de l'exploration de la pièce. L'entraînement spécifique à la procédure de contrôle doit faire l'objet d'une formation spécifique avec des exercices pratiques, suivis d'un test R&R (Répétabilité et

Reproductibilité) pour s'assurer de la capacité des contrôleurs à contrôler efficacement et corriger au besoin leurs éventuelles erreurs dans l'application de la stratégie d'exploration.

4. APPLICATION

Nous avons présenté les facteurs qui influencent l'étape d'exploration du contrôle visuel et nous avons donné les recommandations pour minimiser leur influence. L'objectif de ce paragraphe est de présenter comment ces recommandations ont été appliquées chez nos partenaires industriels avec lesquels nous avons collaborés.

4.1. APPLICATION MOYEN

Concernant les actions Moyen, nous avons indiqué que le poste de contrôle constituait l'un des facteurs les plus influents dans l'étape d'exploration. Mieux maîtriser ce facteur peut contribuer à améliorer l'étape d'exploration du contrôle visuel. C'est ce qu'a cherché à faire l'entreprise FOURNIER.

L'entreprise FOURNIER possède plus d'une vingtaine d'ateliers, chaque atelier ayant la responsabilité d'une opération spécifique de production. Chacun des ateliers utilise le contrôle visuel pour s'assurer de la conformité des produits réalisés.

Malgré l'importance du contrôle visuel pour diminuer les retours clients, les postes de contrôle présents dans ces ateliers n'étaient pas, pour l'essentiel, en accord avec les recommandations données par les normes NF EN ISO 3668 (2003) et NF X 35-103 (1990) [ISO 03b] [AFNOR 90], par les fiches de sécurité de l'INRS [Floru 96] [INRS 99] ou par le manuel de bonnes pratiques BP X 10-042 (2006) [AFNOR 06a]. Le Tableau 4.11 résume les principales caractéristiques des postes de contrôle dans l'entreprise.

Tableau 4.11 Moyen avant formalisation - Fournier

Poste de contrôle	Analyse de l'existant	Observation
Structure	Le plan de travail est fait avec du matériel récupéré dans les ateliers	- différentes couleurs (blanc surtout) - différents coefficients de réflexion
	La hauteur des luminaires n'est pas adaptée	
Système d'éclairage	Éblouissant	Provoqué soit par la hauteur du luminaire, soit par le plan de travail
	Faible niveau d'éclairage (~ 200 lux)	
	Différentes températures de couleur	
	Faible IRC Présence de lumières parasites	

Ces informations suggèrent la nécessité de définir un poste de contrôle standard pour l'ensemble des contrôles visuels à réaliser.

Cependant, ce standard ne peut pas être unique car les types de produits à contrôler varient d'un atelier à un autre et réclament chacun des contrôles spécifiques. En effet, les produits sont de types différents (laque, polymère, bois, miroir, etc.), leurs tailles sont variables (de quelques centimètre à quelques mètres) et les types de contrôle à réaliser (unitaire, lot, etc.) demandent un système d'éclairage adapté à chaque situation.

L'entreprise FOURNIER a pris en compte l'ensemble de ces particularités et, en suivant les recommandations listées dans ce chapitre, a créé un standard partagé pour l'ensemble des postes de contrôle. Le Tableau 4.12 présente la partie de ce standard qui concerne le système d'éclairage des postes.

De plus, l'entreprise a défini un ensemble de conditions à respecter pour ses postes de contrôle visuel, parmi celles de :

- Privilégier la couleur gris mate pour le plan de travail du contrôle.
- Éviter un rapport supérieur à 5 entre l'éclairement du poste et l'environnement (poste = 1000 lux et environnement min 200 lux).
- Laisser au service qualité l'entière responsabilité de s'occuper de toute nouvelle installation de poste de contrôle, et ceci de manière à faire appliquer le standard.

Concernant la lumière parasite, l'entreprise FOURNIER n'a pas pu effectuer de grandes modifications. Nous avons dit que l'idéal était de masquer les fenêtres proches des locaux de contrôle. Cependant, chez FOURNIER, il n'y pas de locaux spécifiques au contrôle. La norme, pour l'éclairage général dans les locaux de travail, demande de privilégier l'éclairage naturel autant que possible pour assurer le bon équilibre physiologique et psychologique des travailleurs. Par conséquent, FOURNIER a préféré privilégier l'éclairage naturel et seulement dans certains cas, où l'éclairage est vraiment gênant, minimiser son influence, en masquant la fenêtre ou en changeant l'orientation du poste.

4.2. APPLICATION MÉTHODE

Comme nous l'avons dit, une des actions Méthode importantes à mener par l'entreprise pour améliorer son contrôle visuel, est de formaliser la procédure d'exploration du produit. Cette procédure doit suivre une stratégie systématique. Elle aide à améliorer la performance des contrôleurs, non seulement, en leur évitant l'oubli de l'exploration d'une zone du produit, mais aussi en améliorant la détection d'anomalies qui ne sont pas facilement perçues.

Les entreprises partenaires avec lesquelles nous avons collaboré n'avaient pas toutes une procédure d'exploration clairement définie et totalement formalisée. Le plus souvent, les procédures existantes variaient d'un contrôleur à l'autre. Nous avons donc créé, pour chacune des entreprises (FOURNIER, EUDICA, NTN-SNR Roulements et S.T. DUPONT), une procédure d'exploration adaptée à leur contrôle visuel.

Tableau 4.12 Standard FOURNIER – Système d'éclairage

Type de luminaire*	Préconisé pour...	Température de couleur	Distance luminaire / pièce à contrôler (m)	Position / angle	Dispositif anti-éblouissement	Maintenance	Remarques
Ale 458	Poste de contrôle, sans valeur ajoutée au produit, sans éléments gênant sur le dessus du poste (visseuses, bacs...)	Blanc lumière du jour 5300K	1,5	Au-dessus.	Acrylique opaque	Changer les néons toutes les 8000h (compteur sur l'appareil, environ 2 ans en 2X8, 5J/7).	Très enveloppant, pas de zone d'ombres.
SAMCE 240	Poste de contrôle avec produits variés, et défauts de surface ("trous et bosses").	Blanc neutre 4000K	1	À l'arrière sur le dossier à 45° vers le PT, à hauteur des yeux.	Grille parabolique métallisée.	Changer les néons tous 7 ans (2X8, 5J/7).	Très polyvalent (matières, couleurs, types de défauts).
SAMCE 336	Poste de contrôle avec produits variés, et défauts de surface ("trous et bosses").	Blanc neutre 4000K	1	À l'arrière sur le dossier à 45° vers le PT, à hauteur des yeux.	Grille parabolique métallisée.	Changer les néons tous 7 ans (2X8, 5J/7).	Très polyvalent (matières, couleurs, types de défauts).
SAMKCE 136	Postes de travail avec un contrôle qui n'est pas pointu. Quand l'éclairage par le dessus ou l'arrière n'est pas possible (visseuses, bacs...).	Blanc neutre 4000K	1	1 de chaque côté à 45° vers le PT, à hauteur des yeux.	Grille parabolique métallisée.	Changer les néons tous 7 ans (2X8, 5J/7).	Peu puissant.
CERTO	Contrôle d'appoint.	Blanc neutre 4000K	1	Au-dessus.	Grille de défilement en plastique.	Changer les néons toutes les 5000 heures (62 semaines en 2X8, 5J/7).	Ballast conventionnel. Ajouter équerre de fixation.

* tous les luminaires sont de la marque Waldmann.

Nous détaillons ici les procédures qui ont été établies pour les entreprises EUDICA et S.T. DUPONT.

4.2.1. EUDICA

L'objectif du contrôle visuel, chez EUDICA, est principalement technique. L'entreprise réalise plusieurs types de produits, avec des caractéristiques physiques différentes et devant répondre à des spécifications propres (l'Annexe 2 montre un exemple de spécification utilisée). Cette spécification donne les indications sur les critères à évaluer lors du contrôle, mais ne donne en revanche pas d'indications sur comment le contrôle doit s'effectuer. La Figure 4.8 montre le modèle de procédure que nous avons proposé pour inclure l'ensemble des éléments nécessaires au contrôle.

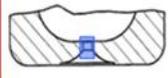
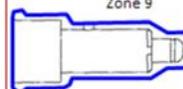
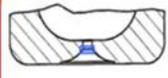
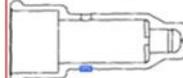
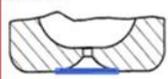
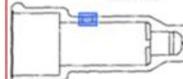
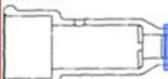
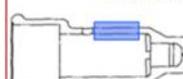
Référence interne		Désignation		Client		Référence client	
		CORPS DF60.5/48E					
Contrôler l'intégralité d'une pièce avant de passer à la pièce suivante. Temps de contrôle estimé par pièce : 1min 30s							
 <p>Orientation de la pièce : Ø0.30 face opérateur Moyen de contrôle : Binoculaire Réglage : Molette latérale indice 2 (équivalent à grossissement X 20)</p>				 <p>Orientation de la pièce : face extérieure pièce face opérateur Moyen de contrôle : Binoculaire Réglage : Molette latérale indice 2 (équivalent à grossissement X 20)</p>			
Zone	Critère	Code	Condition d'acceptation	Zone	Critère	Code	Condition d'acceptation
Zone 5: 	Toile horizontale	Yellow	Trou débouchant	Zone 9: 	Ligne de soudure Aspect piqué Rayures	Yellow Green	absence de sillon
Zone 6: 	Toile verticale	Yellow	Non dépassante de l'extrémité du corps	Zone 3: 	3 godrons d'accrochage avec arrachement	Yellow	non détachable
Zone 7: 	Toile verticale	Yellow	0.20 mm maxi	zone 12: 	Toile verticale Trou	Yellow	0,10 mm maxi débouchant
Zone 4: 	Manque matière Chocs	Red Yellow	 Petit	zone ø 1.20: 	Rayure	Red	

Figure 4.8 Mode opératoire – EUDICA

La nouvelle procédure d'exploration, désormais utilisée, indique notamment :

- Comment l'exploration doit être réalisée, en précisant, par exemple, si le contrôle doit être effectué à l'œil nu ou en utilisant une binoculaire et, dans ce dernier cas, avec le grossissement à appliquer.
- Dans quel ordre le contrôle doit s'effectuer, en précisant par exemple, la position de prise du produit, l'ordre d'exploration des zones, les parties à explorer dans chaque zone.

Cette procédure suit une stratégie systématique d'exploration, le contrôleur devant vérifier chaque zone avant de passer à la suivante.

4.2.2. S.T. DUPONT

Contrairement à EUDICA, chez S.T. DUPONT, il n'est pas possible de définir précisément l'ensemble des critères à considérer lors d'un contrôle. Le contrôleur a en charge d'explorer l'ensemble du produit pour s'assurer qu'elle ne présente aucune anomalie de surface. En effet, pour S.T. DUPONT, l'objectif du contrôle visuel est principalement esthétique.

Pour répondre à ce besoin, la procédure de contrôle doit expliquer comment le contrôleur doit procéder pour que son exploration soit efficace, et cela plutôt que de détailler ce qui doit être cherché et où chercher. La Figure 4.9 montre un extrait de la procédure d'exploration que nous avons mise en place dans l'entreprise S.T. DUPONT.

La nouvelle procédure, aujourd'hui utilisée, définit :

- L'ordre des faces du produit à contrôler (cet ordre est établi en fonction de la criticité de la face, une anomalie présente sur la face d'un briquet étant par exemple beaucoup plus sévère que la même anomalie présente sur le fond du briquet).
- Le parcours des yeux à réaliser par le contrôleur.
- Le mouvement angulaire à effectuer, en jouant sur les effets lumières.
- Les types d'anomalies pouvant être présentes sur la surface (les anomalies varient selon l'étape de production précédant le contrôle).
- Des critères spécifiques à contrôler, s'il y en a (dans cet exemple, la gravure).

4.3. APPLICATION MAIN D'ŒUVRE

Nous avons évoqué le rôle du contrôleur lui-même dans l'exploration. Il est en effet fondamental pour l'entreprise, pour améliorer le contrôle visuel, de mettre en œuvre des actions visant à mieux maîtriser les facteurs Main d'œuvre.

C'est ce qui a été fait dans l'entreprise FOURNIER avec la réalisation d'un module de formation dédié totalement aux deux étapes d'un contrôle visuel, l'exploration et l'évaluation. L'Annexe 3 présente la partie Exploration de ce module. Cette partie a pris, autant que possible, les recommandations que nous avons listées dans le paragraphe 3.3. Le module a été de plus conçu de façon à établir une grande interaction entre le formateur et les contrôleurs, avec des jeux et des exercices pour illustrer la difficulté et pour expliquer comment bien réaliser le contrôle.

Bien évidemment, une première et unique formation n'est pas suffisante pour garantir la pérennité d'une amélioration dans le contrôle visuel. La formation doit être suivie par des séances d'entraînement périodiques et/ou par des tests réguliers pour vérifier la performance

des contrôleurs. Dans l'entreprise FOURNIER, ces séances et ces tests ne sont pas exclusivement réalisés par le service Qualité, mais également par les responsables directs des opérateurs/contrôleurs dans les ateliers. L'entreprise FOURNIER a défini pour cela une organisation définissant le rôle de chacun et leurs missions respectives à remplir pour pérenniser la formation et l'entraînement des contrôleurs.

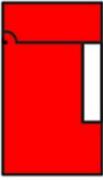
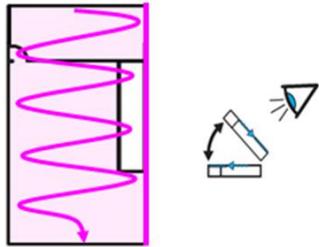
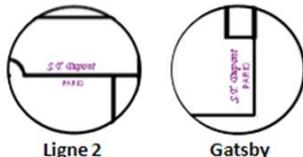
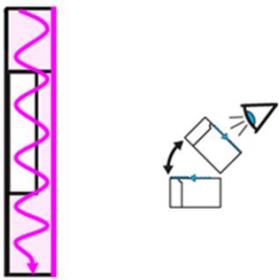
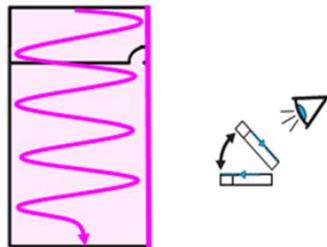
		CONTRÔLE D'ASPECT APRES POLISSAGE MODE OPERATOIRE D'EXPLORATION BRIQUET L2	FIC N° : POMO0177 Rédigé le : 26/05/11 Par : M. Guttin Indice : A 2/4
II. CONTRÔLE DES SURFACES			
MATERIEL : Gants ou doigts latex Coton Biosane/alcool		LEGENDE : Contrôle visuel  Pans à vérifier  Parcours des yeux 	Criticité des faces :          
Criticité des faces	Instructions		Types d'anomalies à détecter
	4. CONTRÔLE FACE AVANT  		Briquets laque et orfèvre : Marques Déformations Zones (tâches) Gravure : Netteté Gravure complète
	5. CONTRÔLE PETIT CÔTE ENTRAINEUR 		Briquets laque et orfèvre : Marques Déformations Zones (tâches)
	6. CONTRÔLE FACE ARRIERE 		Briquets laque et orfèvre : Marques Déformations Zones (tâches)

Figure 4.9 Procédure d'exploration – S.T. DUPONT

5. CONCLUSION

L'étape d'exploration est très sensible à l'influence de très nombreux facteurs.

À l'issue de notre travail sur le recensement de ces facteurs, nous avons bien conscience de la difficulté pour une entreprise à maîtriser l'ensemble de ces facteurs. En se fondant sur les compétences du laboratoire SYMME sur le contrôle visuel, nous avons toutefois listé quelques recommandations importantes à suivre par l'entreprise pour améliorer l'étape d'exploration de son contrôle visuel.

Pour les facteurs et les actions liés au Moyen, nous avons ainsi listé quelques recommandations concernant le poste de contrôle à utiliser en mettant l'accent notamment sur la nécessité de prendre en compte autant que possible l'environnement de ce poste. Nous avons également rappelé les conditions à réunir par disposer d'un système d'éclairage adapté à un contrôle visuel efficace.

Pour les facteurs liés à la Méthode, les recommandations que nous avons présentées concernent principalement le contenu de la procédure de contrôle à mettre en place. Nous avons également évoqué l'importance de la stratégie d'exploration utilisée, en lien avec les mouvements angulaires pour une détection des anomalies plus efficace.

Pour les facteurs liés à la Main d'œuvre, les recommandations que nous avons données portent sur la formation et l'entraînement des contrôleurs. Nous avons noté que cette formation devait prendre en compte le risque d'un transfert négatif d'apprentissage lors de la mise en place d'une nouvelle stratégie d'exploration.

Nous avons également présenté comment certaines des recommandations ont été appliquées dans les entreprises avec lesquelles nous avons collaborées (poste de contrôle et éclairage pour FOURNIER, procédures de contrôle pour EUDICA et S.T. DUPONT et formation pour FOURNIER).

CHAPITRE 5

CONTRÔLE VISUEL : MAÎTRISER L'ÉVALUATION/DÉCISION

Nous avons présenté dans le chapitre précédent l'étape d'exploration, les facteurs d'influence et quelques recommandations pour améliorer cette étape. Cependant, le contrôle ne se limite pas à l'étape d'exploration. Le contrôleur, après avoir détecté une anomalie, doit l'évaluer et décider si elle est acceptable ou non.

Du point de vue du contrôleur, le passage de l'étape d'exploration à l'étape d'évaluation est illustré par la Figure 5.1. Pendant l'étape d'exploration, le contrôleur détecte l'anomalie sans préjuger de l'incidence de sa présence sur l'acceptabilité future du produit. Après cette détection, le contrôleur fait une première classification de l'anomalie qui consiste à identifier le type d'écart auquel elle appartient. Pour un écart par rapport à une référence ou un écart par rapport à l'intention du concepteur, il fait ensuite une deuxième classification en identifiant s'il s'agit d'un écart en couleur ou en relief. Pour un écart local, il vérifie s'il s'agit d'une Marque, d'une Pollution, d'une Hétérogénéité ou d'une Déformation. Indépendamment de ce type d'écart, si l'anomalie est du type non évolutive, il l'évalue en lui attribuant une valeur sur une échelle d'intensité. Les anomalies du type "évolutive" doivent être refusées dès leur identification.

L'approche présentée dans la Figure 5.1 décrit le contrôle tel qu'il est réalisé par le contrôleur (exploration, évaluation puis décision). L'évaluation d'une anomalie se base sur l'évaluation de ses attributs. Nous montrons dans ce chapitre comment choisir ces attributs. Nous montrons ensuite le lien entre ces attributs et la décision finale du contrôle. Nous montrons enfin comment l'entreprise pourra vérifier que les contrôleurs seront capables de maintenir ce système.

Notre première contribution dans ce chapitre est de détailler les mécanismes cognitifs entrant en compte dans la phase d'évaluation et de proposer une approche permettant aux entreprises de réaliser un contrôle visuel performant.

Nous proposons également deux approches de formalisation de l'étape d'évaluation/décision : la grille d'évaluation hiérarchique corrigée pour les cas où la relation entre les attributs et la

décision est linéaire et l'approche par réseaux de neurones pour les cas où cette relation est non linéaire.

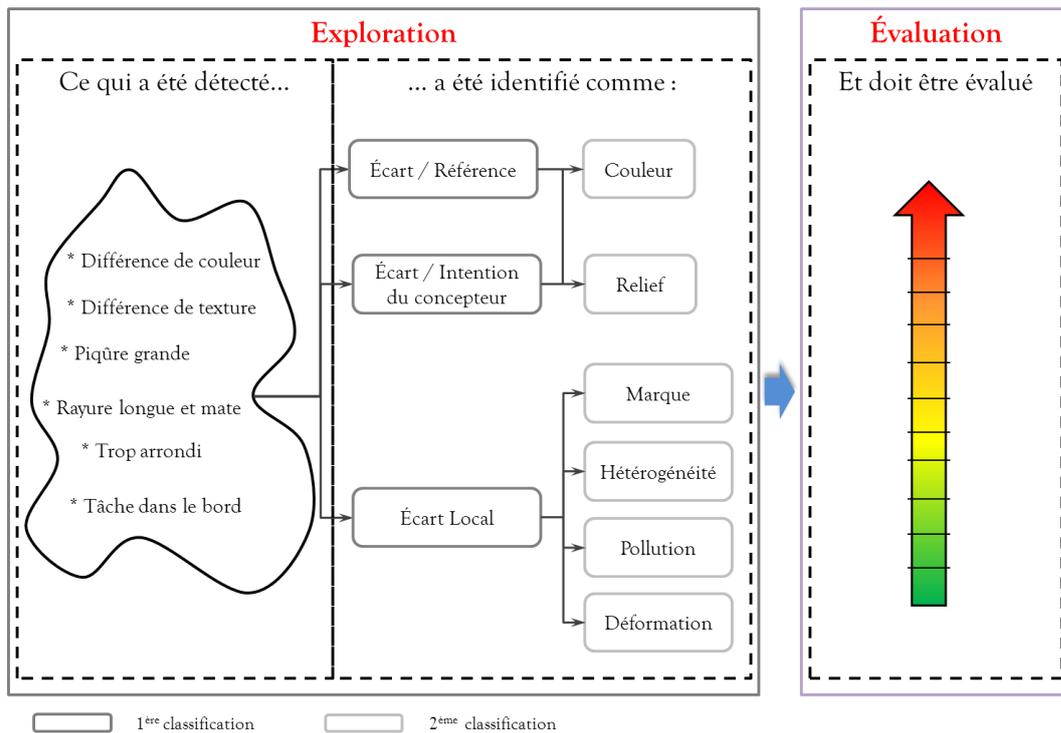


Figure 5.1 De l'exploration à l'évaluation

1. LE CHOIX DES ATTRIBUTS

Dans le Chapitre 2, nous avons expliqué quels sont les tests sensoriels qui peuvent être utilisés pour l'évaluation de l'anomalie : le test d'évaluation pour un écart par rapport à une référence ou un écart par rapport à l'intention du concepteur, et le profil descriptif quantitatif pour un écart local. Nous avons également listé les attributs qui peuvent être utilisés pour évaluer un écart local.

La liste d'attributs, que nous avons proposée, sert à donner un modèle au moment de leur choix. Pour aboutir à la liste exacte des attributs, l'entreprise doit faire le lien entre les caractéristiques de l'anomalie et leur influence dans la décision sur l'acceptation du produit.

Suite à ce choix, un Standard Écrit peut être construit. Ce standard pourra se présenter sous la forme d'un document contenant la définition des attributs et de leurs niveaux qui sont à utiliser pour déterminer si le produit respecte ou non la qualité attendue. Le choix de ces attributs, ainsi que la construction du Standard Écrit, sont à réaliser par un groupe d'experts qu'il s'agit de définir. Ces « experts » ne sont pas toujours choisis par l'entreprise en respectant les recommandations de la norme ISO 8586-2 [ISO 94a]. Le plus souvent, les collaborateurs choisis sont ceux qui ont la meilleure connaissance des produits et du niveau de qualité à atteindre pour ces produits (responsables marketing, production et/ou qualité). Même s'ils ne

possèdent pas toujours les compétences que préconise la norme, le plus important reste que ces experts maîtrisent et partagent totalement le standard de qualité souhaité défini par l'entreprise.

1.1. CONDITION À REMPLIR – TEST DE CLASSEMENT PAR RANG

Nous avons présenté dans le Chapitre 2 les différentes manières de représenter, maintenir et assurer le standard de qualité de l'entreprise. Nous avons également expliqué les difficultés associées à l'utilisation du Produit Standard et à l'utilisation du Standard Mental, suggérant ainsi l'utilisation d'un Standard Écrit dans le cadre du contrôle visuel avec un objectif esthétique.

Par contre, comme nous l'avons dit précédemment, c'est à partir des connaissances des experts, c'est-à-dire un Standard Mental, qu'un Standard Écrit pourra être construit. Le standard de qualité de l'entreprise sera traduit en termes d'attributs sensoriels, comme l'illustre la Figure 5.2.

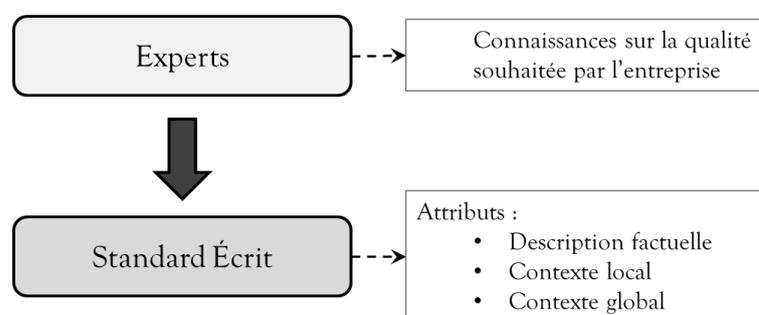


Figure 5.2 Base de construction du standard écrit

Pour que le Standard Écrit puisse être parfaitement représentatif de la qualité souhaitée par l'entreprise, il est indispensable que les experts évaluent de la même manière une anomalie. Le test de classement par rangs est un des moyens permettant de vérifier si cet accord existe.

La méthode de classement par rangs *permet d'évaluer des différences entre plusieurs échantillons, ces différences se basant sur l'intensité d'un seul attribut, de plusieurs attributs (évalués séparément) ou de l'impression globale. Elle sert à trouver si des différences existent [ISO 06].* Cette méthode est classiquement utilisée en analyse sensorielle, le plus souvent pour classer des produits les uns par rapport aux autres lors du développement de nouveaux produits. Dans le cas du contrôle visuel, l'objectif du test sera de vérifier s'il existe des différences entre les évaluations d'une même anomalie réalisées par les experts.

1.1.1. CONDITIONS DU TEST

La norme ISO 8587 (2006) préconise que tous les participants réalisent le test dans les mêmes conditions expérimentales [ISO 06].

Chaque test doit d'abord être réalisé individuellement. Un ensemble d'anomalies est présenté à chaque expert qui doit les classer par ordre croissant en fonction de leur intensité. Ces anomalies sont présentées de façon aléatoire et au même moment. Il est demandé aux experts d'éviter des rangs *ex æquo*, et cela de manière à opérer une différenciation claire entre les anomalies.

Idéalement, le test doit impliquer au moins trois experts. Ceux-ci doivent posséder des qualités spécifiques, parmi lesquelles celles [ISO 94a] :

- D'être motivés et intéressés par le développement futur de leurs compétences et du standard de l'entreprise.
- D'être disponibles pour pouvoir s'entraîner et pratiquer régulièrement le contrôle visuel de manière à maintenir leur expérience.
- D'avoir des connaissances générales mais aussi des connaissances techniques sur les produits concernés (leurs composants, le processus de fabrication, etc.).
- De posséder une aptitude à communiquer le standard de qualité de l'entreprise.

Par rapport au nombre d'anomalies à classer, la norme ISO 6658 (2005) recommande d'utiliser un échantillon réduit (6 anomalies environ) si des propriétés complexes sont à évaluer, ou un échantillon plus important (20 anomalies environ) si c'est uniquement un aspect du produit qui est à évaluer [ISO 05]. Cette norme a été développée pour l'agroalimentaire mais peut être appliquée au contrôle visuel. Dans notre cas, idéalement, 20 anomalies environ seront à classer par les experts, puisque la classification à effectuer concerne uniquement l'intensité globale de l'anomalie.

Les données du test sont ensuite analysées à l'aide du coefficient de concordance de Kendall W.

1.1.2. COEFFICIENT DE CONCORDANCE DE KENDALL W

Le test de Kendall¹⁶ est un test non-paramétrique utilisé pour évaluer la concordance entre sujets, par rapport à une classification.

Pour illustrer comment calculer le coefficient de Kendall W, nous détaillons ici un exemple dont le Tableau 5.1 résume les données.

Tableau 5.1 Coefficient de Kendal - Exemple

expert \ anomalie	anomalie									
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
E1	4	3	8	10	1	9	5	6	7	2
E2	2	3	5	10	4	8	9	7	6	1
E3	1	4	6	9	3	10	7	8	5	2
E4	1	4	6	10	2	7	8	9	5	3
E5	1	4	6	10	8	7	5	9	2	3

¹⁶ http://en.wikipedia.org/wiki/Kendall%27s_W

Exemple : Il est demandé à 5 experts (E1 à E5) de classer 10 anomalies (A1 à A10) par ordre croissant d'intensité. Les résultats sont présentés dans le Tableau 5.1.

Le total du rang R_j pour chaque anomalie et pour tous les experts est ensuite calculé, ainsi que la moyenne \bar{R}_j des rangs R_j . Les valeurs obtenues pour l'exemple sont présentées dans le Tableau 5.2.

Tableau 5.2 Test de Kendall

Anomalie	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	R_j
R_j	9	18	31	49	18	41	34	39	25	11	27,5

Le coefficient de Kendall W est donné par l'Équation 5.1 [Saporta 06].

$$W = \frac{s}{1/12(k^2(n^3-n))} \quad (\text{Équation 5.1})$$

avec :

- n = nombre d'anomalies à classer
- k = nombre d'experts
- s = somme des carrés de la différence entre les R_j observées et la moyenne des R_j [Saporta 06].

$$s = \sum \left(R_j - \sum \frac{R_j}{n} \right)^2 = \sum (R_j - \bar{R}_j)^2 \quad (\text{Équation 5.2})$$

On a donc $0 \leq W \leq 1$. La valeur $W = 0$ est obtenue quand les valeurs de rangs sont identiques, indiquant une indépendance entre les classements [Saporta 06], c'est-à-dire un total désaccord. La valeur $W = 1$ est obtenue quand à elle quand la somme des rangs suit la série¹⁷ : $k, 2k, 3k, 4k, 5k, \dots, nk$ exprimant ainsi un très bon accord entre les experts.

Pour l'exemple donné, la valeur de W est de 0,79. On peut donc estimer qu'il y a un accord assez satisfaisant entre les experts mais cependant insuffisant pour pouvoir établir un Standard Écrit. Sur la base de nos expérimentations, nous recommandons d'obtenir un coefficient $W > 0,9$ pour l'accord entre les experts.

Dans le cas où le test révèle un désaccord entre les experts, une analyse plus approfondie des anomalies doit être faite pour vérifier ce qui est à l'origine de ce désaccord. Dans un premier moment, un débriefing concernant les anomalies évaluées au cours du test doit être réalisé, et cela jusqu'à obtenir un consensus entre experts ($W > 0,9$). Pour y parvenir, il est important d'éviter durant ces échanges entre experts que l'anomalie soit considérée comme un cas de

¹⁷ <http://www.cons-dev.org/elearning/stat/stat7/st7.html>. adapté - introduction aux statistiques - Ramousse, R. and le Berre, M. and Le Guelte, L., 1996.

dérogation. L'évaluation doit se baser au niveau de qualité que l'entreprise souhaite que les contrôleurs soient aptes à maintenir. Les dérogations seront toujours faites par les experts.

Suite au débriefing, un deuxième classement par rangs doit être réalisé avec un échantillon constitué par d'autres anomalies. Suite à ce second classement, si un expert n'est toujours pas en accord avec les autres, il sera écarté du groupe, au moins pour la construction du standard écrit. Par contre, il pourra être toujours être sollicité en cas de dérogation.

1.2. COMMENT CHOISIR LES ATTRIBUTS D'ÉVALUATION

Après s'être assuré de l'accord entre les experts, le standard écrit peut être construit. Pour cela, les attributs nécessaires à la caractérisation de l'anomalie doivent être choisis. La norme ISO 13299 (2003) liste les étapes à suivre pour le développement d'un profil sensoriel (test choisi pour le contrôle visuel avec un objectif esthétique - Chapitre 2) [ISO 03a]. La Figure 5.3 illustre l'enchaînement de ces étapes pour un contrôle visuel.

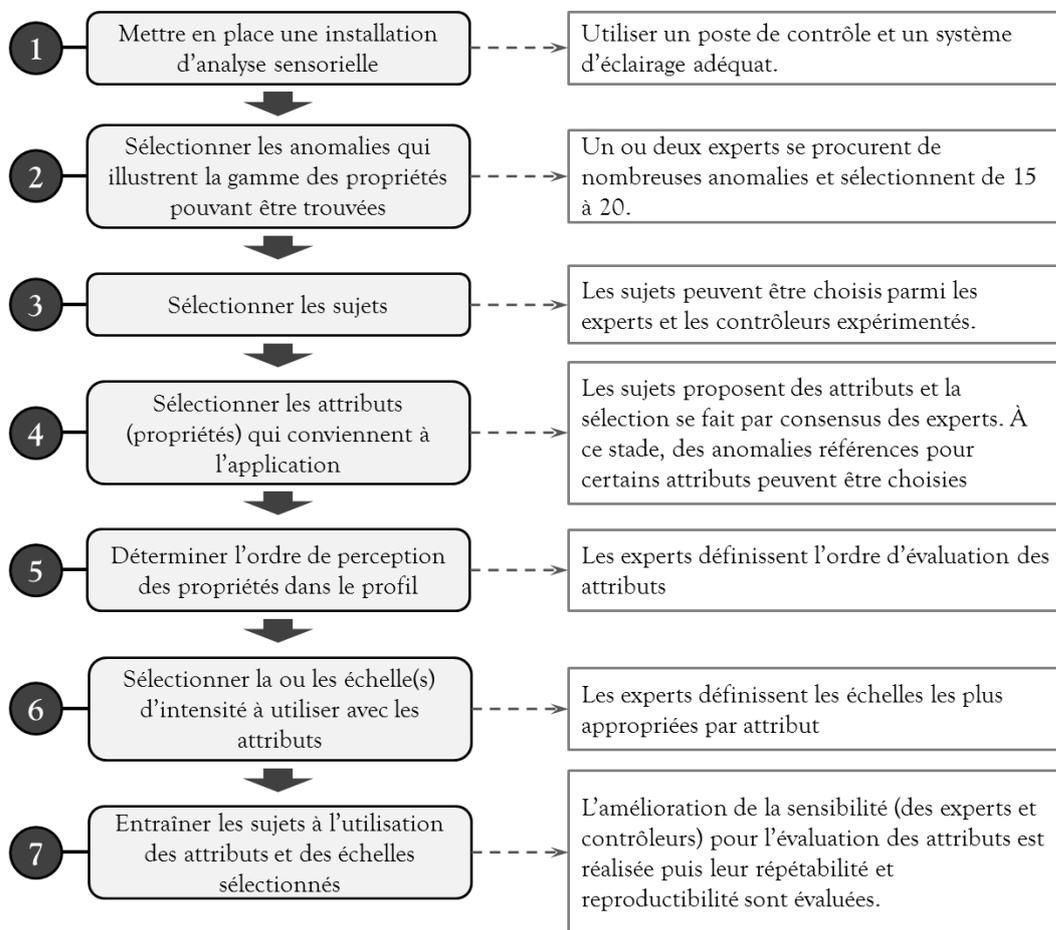


Figure 5.3 Développement du profil sensoriel adapté au contrôle visuel (adapté [ISO 03a])

L'enchaînement des quatre premières étapes doit aboutir au choix des attributs nécessaires à la caractérisation d'une anomalie. La cinquième et la sixième étape visent à construire le standard qui peut se présenter sous la forme d'une grille d'évaluation. L'objectif de la dernière étape

enfin, est d'entraîner les contrôleurs à la manipulation des attributs et de leurs niveaux, ainsi qu'à l'utilisation de la grille. Nous détaillons maintenant l'ensemble de ces étapes.

1.2.1. PREMIÈRE ÉTAPE

Pour le bon développement du profil sensoriel, la norme ISO 13299 (2003) recommande d'utiliser une installation appropriée pour l'analyse sensorielle [ISO 03a].

Nous avons évoqué dans le Chapitre 4 la difficulté d'utiliser une cabine pour un contrôle visuel. Cette difficulté ne pose en fait pas réellement un problème puisque les attributs sensoriels doivent être choisis dans une situation réelle de contrôle. Cependant, le poste de contrôle à mettre en place devra respecter les conditions que nous avons listées dans le chapitre précédent.

1.2.2. DEUXIÈME ÉTAPE

La deuxième étape consiste à sélectionner les anomalies nécessaires au choix des attributs sensoriels. La norme ISO 13299 (2003) recommande une sélection de 6 à 10 échantillons [ISO 03a]. Rappelons que cette norme a été établie pour le secteur agroalimentaire où la construction du profil sensoriel doit prendre en compte plusieurs sens. Pour le contrôle visuel, il est nécessaire de disposer d'une quantité d'anomalies suffisante couvrant l'ensemble d'échelle d'évaluation, d'un niveau acceptable à un niveau inacceptable. Nous recommandons donc de disposer de 15 à 20 anomalies. Ces anomalies seront également représentatives de celles les plus fréquemment observées.

1.2.3. TROISIÈME ÉTAPE

Cette étape vise à sélectionner les collaborateurs de l'entreprise en charge d'établir la liste des attributs et de leurs niveaux. Comme nous l'avons évoqué précédemment, ce sont les experts dont on a vérifié précédemment l'accord, qui seront de préférence sollicités. Des contrôleurs qualifiés pourront également être impliqués. La norme ISO 13299 (2003) ne précise pas le nombre de sujets devant établir le profil sensoriel [ISO 03a]. Le nombre d'experts dépend, en effet, de plusieurs facteurs, comme les caractéristiques à évaluer, la précision souhaitée, etc. Pour un contrôle visuel, nous recommandons un nombre de 4 à 6 experts et contrôleurs.

1.2.4. QUATRIÈME ÉTAPE

La quatrième étape doit fournir la liste des attributs sensoriels nécessaires à la caractérisation d'une anomalie. Nous avons donné, dans le Chapitre 2, une liste d'attributs pouvant servir de modèle. Cette liste peut être adaptée et/ou complétée de manière à correspondre au standard de l'entreprise.

Durant cette étape, les participants sont mis dans une situation de contrôle et doivent décrire les critères qu'ils utilisent lors de l'évaluation d'une anomalie. Cette activité est fondamentale puisqu'elle permet :

- De faire partager un vocabulaire commun et aux contrôleurs.

- De vérifier la gestuelle correcte à réaliser au moment de l'évaluation
- De vérifier les attributs utilisés pour l'évaluation.
- De définir des niveaux pour chaque attribut.

Pour parvenir à bien identifier les attributs, le choix de la question à poser aux participants est important. Au lieu d'être « Comment caractérisez-vous cette anomalie ? », elle sera plutôt « Acceptez-vous ce produit (indiquant l'anomalie) ? » et « Pourquoi ? ». L'important en effet n'est pas d'aboutir à une liste de l'ensemble des attributs descriptifs de chaque anomalie mais d'obtenir une liste des attributs qui soient déterminants pour la décision concernant l'acceptabilité du produit. Comme l'illustre la Figure 5.4, certains attributs ont des niveaux qui amènent le contrôleur à accepter (zone verte) à ou à refuser le produit (zone rouge). C'est le cas de l'attribut Taille qui possède deux niveaux, *Petite* et *Grande*. D'autres attributs ont des niveaux qui se situent tous à la frontière de l'acceptabilité (zone orange). C'est le cas de l'attribut Position dont les niveaux *Sur la face*, *Dans le fond* et *Sur le dos* se positionnent à la limite de l'acceptation et du refus du produit. Bien évidemment, ce sont ces attributs qui sont importants à lister, puisque ce sont ces attributs qui sont généralement à l'origine de la variabilité des résultats du contrôle visuel.

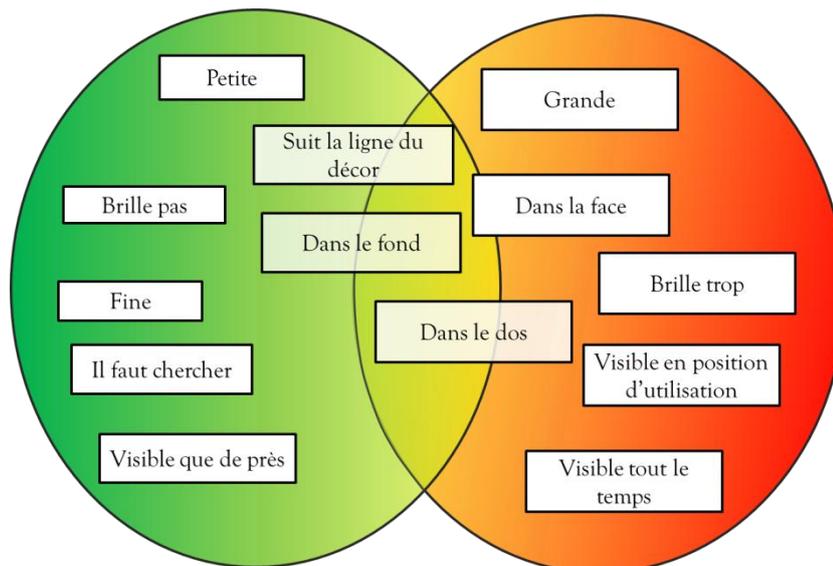


Figure 5.4 Rapport entre les attributs et la décision

La recherche des attributs amène les experts et les contrôleurs à proposer des mots et des expressions pour expliquer comment ils acceptent ou refusent un produit. Un questionnaire peut également être utilisé, comme le recommande, par exemple, Depledt [Depledt 09]. La Figure 5.5 montre un exemple de ce questionnaire. Cependant, il peut rendre cette description moins spontanée.

Questionnaire	
Nom :	Date :
Prénom :	
Élaboration d'une liste d'attributs pour le contrôle visuel.	
Décrivez la perception que vous avez de cette anomalie, selon la facilité à la détecter (visibilité), ses caractéristiques, son rapport avec le décor et le produit.	
Description	
Visibilité de l'anomalie	Visible sous un angle particulier Il faut chercher Visible de près
Caractéristique de l'anomalie	Petite Bien ronde
Rapport anomalie - décor	Contraire à la ligne du décor De la même couleur
Rapport anomalie - produit	Sous la face

Figure 5.5 Exemple de questionnaire (rempli) pour la génération de mots utilisés par les sujets lors du contrôle visuel (adapté de [Depledt 09]).

Une analyse du vocabulaire utilisé peut ensuite être réalisée. Les expériences que nous avons eues avec les entreprises avec lesquelles nous avons travaillé ont montré la réelle difficulté à aboutir à un vocabulaire concis et partagé par l'ensemble des contrôleurs.

Une première action consiste à éliminer tous les termes hédoniques (par exemple, « ça ne me gêne pas », « il n'est pas beau » etc.) et les termes non pertinents (par exemple, « causé par un problème dans la machine ») [Depledt 09] [ISO 95]. Ce premier groupement peut être effectué en se basant sur la distinction entre les paramètres proposés dans le Chapitre 2 (Conditions d'observation, Description factuelle, Contexte local et Contexte global).

Une autre action consiste à regrouper sous le même terme les mots ou expressions désignant, non pas des attributs, mais des niveaux d'attribut. Dans la Figure 5.4, c'était le cas des mots *Petite* et *Grande* qui font référence à l'attribut Taille. Une autre action consiste à s'inspirer du modèle d'attributs, que nous avons proposé pour les différents paramètres d'un contrôle visuel dans le Chapitre 2, pour renommer les mots ou les expressions. Par exemple, dans la Figure 5.4, l'expression *Visible de près* sera remplacée par l'attribut « Distance » que nous avons défini comme un des attributs du paramètre Conditions d'observation.

Ces deux actions contribuent à établir une liste d'attributs réduite à celle composée des attributs réellement pertinents, non pas pour la description d'une anomalie, mais uniquement pour son évaluation. À l'issue de la deuxième action, les experts pourront faire une pré-sélection des attributs qui seront utilisés dans le standard écrit. Cette pré-sélection peut être basée, par exemple, sur le nombre de citations de chaque attribut.

La sélection des attributs étant faite, la construction du Standard Écrit peut être envisagée.

2. CONSTRUCTION DU STANDARD ÉCRIT

La construction du standard écrit couvre les étapes 5 et 6 de la Figure 5.3. Durant ces étapes, les experts doivent décrire le raisonnement qu'ils utilisent pour évaluer une anomalie.

Ce raisonnement peut être modélisé comme une boîte noire dont les entrées sont les attributs de l'anomalie avec leurs niveaux et dont la sortie est une décision concernant l'acceptabilité du produit. Il est possible de considérer que ces niveaux puissent être corrélés entre eux pour générer une valeur finale, qui en fonction d'un seuil donné, lui-même dépendant de la gamme du produit concernée, amènera le contrôleur à accepter ou à refuser le produit. La Figure 5.6 illustre ce raisonnement.

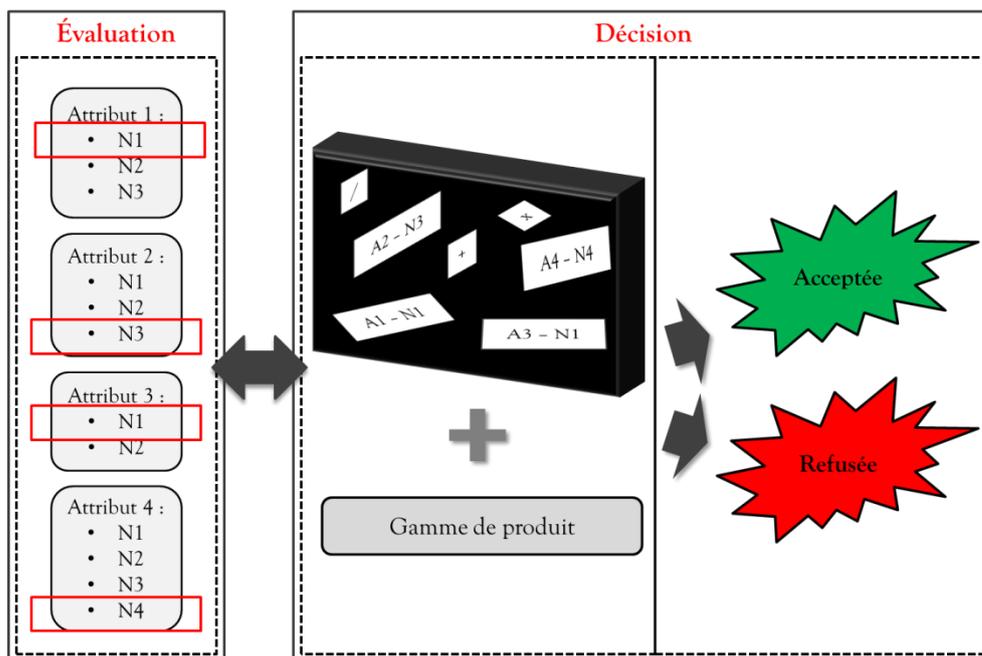


Figure 5.6 Démarche de décision réalisée par les experts

La difficulté est bien évidemment d'extraire les informations de la boîte noire, les experts ayant généralement eux-mêmes des difficultés à formaliser le raisonnement qui les amène à prendre une décision.

Une démarche simple consiste à identifier les poids à associer à chaque attribut et à déterminer la corrélation qui s'établit entre ces attributs pour aboutir à la valeur finale d'évaluation pour l'anomalie. Cette corrélation peut parfois être linéaire, c'est le cas simple, ou non linéaire. Nous détaillons à présent ces deux types de situation.

2.1. CORRÉLATION LINÉAIRE

Nous avons présenté dans le Chapitre 2 des exemples de Standard Écrit. Tous les standards présentés utilisent la corrélation linéaire pour faire le lien entre l'évaluation et la décision sur l'acceptation.

Le standard le plus robuste est la grille d'évaluation hiérarchique corrigée (Figure 5.7). Cette grille, que nous avons proposée, prend en compte plusieurs combinaisons possibles entre les niveaux des attributs. Elle présente l'avantage d'être simple à lire et à comprendre. Le raisonnement utilisé par les experts pour leur décision est également facilement observable. Ainsi, dans la grille de la Figure 5.7, les flèches et les coefficients indiquent les attributs/niveaux qui augmentent ou au contraire diminuent l'intensité finale de l'anomalie. La partie droite indique, en fonction de la valeur obtenue et de la gamme du produit, la décision à fournir (le produit est accepté s'il se situe dans la partie verte, refusé s'il se situe dans la partie rouge).

Conditions d'observation			Description de l'anomalie		Contexte Local		Contexte global	Intensité totale	Gamme 1	Gamme 2	
Distance	Effet lumière	Sens	Forme	Taille	Contraste de forme	Contraste de couleur	Localisation				
D	EL	S	F	T	CF	CC	L	IT			
3	Visible à 30cm	Visible sous certains angles +0 →	Visible dans un sens +0 →	Rond +0 →	Petit +0 →	Se noie dans le décor -1 →	Aucun -1 →	Criticité de la face = 1 +0 →	1	Vert	Vert
									2		
									3		
4	Visible à 1 m	Visible sous tous les angles +0 →	Visible dans tous les sens +0 →	Allongé +1 →	Moyen +1 →	Contraste avec le décor +0 →	Faible +0 →	Criticité de la face = 2 +0 →	4	Rouge	Vert
									5		
									6		
5	Visible à 3 m	+1 →	+1 →	+1 →	Grand +2 →	Décor uni +1 →	Important +1 →	Criticité de la face = 3 +1 →	7	Rouge	Rouge
									8		
									9		
									10		
									11		
									12		
									13		

Figure 5.7 Grille d'évaluation hiérarchique corrigée

La grille d'évaluation de la Figure 5.7 est un modèle de grille puisqu'elle contient l'ensemble attributs que nous avons listés pour un contrôle visuel à objectif esthétique (voir Chapitre 2). Les experts peuvent s'inspirer de cette grille pour établir une grille plus spécifique à leur contrôle en y faisant apparaître les attributs qu'ils ont précédemment listés. Pour cela, les experts doivent définir les niveaux pour chaque attribut et donner leur signification dans le Standard Écrit. Cette définition est parfois difficile à établir. Par exemple, pour l'attribut Taille, il s'avérera parfois difficile de définir les niveaux *Petite* et *Grande*, surtout quand la grille sera utilisée pour différents produits dont les tailles pourront varier considérablement d'un produit à une autre. On retiendra dans ce cas l'idée que la perception doit être davantage liée à la taille de la surface où se trouve l'anomalie plutôt qu'à celle du produit. Si la difficulté persiste, il est possible de supprimer cet attribut et pallier son absence en recourant à un autre attribut. Comme nous l'avons vu dans le Chapitre 2, l'attribut Distance sert à évaluer (indirectement) la taille de l'anomalie.

Pour la définition de niveaux, il est nécessaire d'utiliser un vocabulaire simple qui pourra être compris par l'ensemble des contrôleurs. La réutilisation des expressions et des mots collectés

durant l'étape 4 est fortement recommandée puisque ces mots et expressions correspondent au vocabulaire utilisé dans l'entreprise.

À ce stade, les experts peuvent également sélectionner les anomalies références (i.e. des anomalies qui soient représentatives d'un niveau particulier d'un attribut) pour documenter le Standard Écrit.

Concernant l'ordre d'évaluation, il est donné par le chemin suivi par le contrôleur lorsqu'il détecte une anomalie. Comme l'illustre la Figure 5.8, à la détection d'une anomalie, le contrôleur vérifie sous quelles conditions cette anomalie est visible (c'est-à-dire, sous quelles conditions le client percevra cette anomalie), évalue les caractéristiques de l'anomalie, prend en compte son influence dans le décor du produit, puis dans le produit. En contrôle visuel, il ne nous semble pas nécessaire de préciser quel est l'ordre d'évaluation, comme cela est préconisé par la norme ISO 13299 (2003) pour la construction d'un profil sensoriel [ISO 03a].

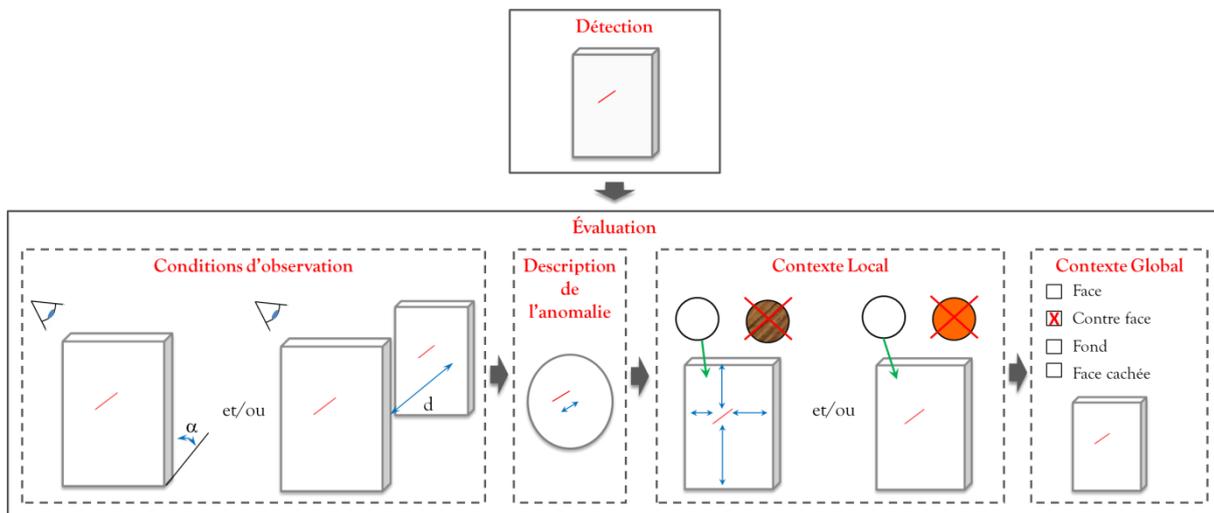


Figure 5.8 Chemin de perception-évaluation de l'anomalie

Après que les attributs et leurs niveaux aient été choisis, il s'agit ensuite que soient déterminés les coefficients à affecter à chacun des niveaux des attributs. Ce coefficient sera fonction de l'impact du niveau de l'attribut sur l'intensité finale de l'anomalie. Par exemple, comme indiqué dans la Figure 5.7, une absence de contraste de couleur (niveau *Aucun* de l'attribut CC) a un coefficient égal à -1 indiquant que ce niveau tend à atténuer la perception de l'anomalie par le client. À l'inverse, un contraste fort (niveau *Important* de l'attribut CC) a un coefficient égal à +1 indiquant que ce niveau tend à favoriser la perception de l'anomalie.

Après la détermination des coefficients, les experts décident enfin des limites de tolérance pour l'acceptation du produit en fonction de la valeur d'intensité de l'anomalie. Cette action s'effectue généralement en réalisant des tests successifs d'utilisation de la grille et s'accompagne généralement d'un ajustement progressif des limites de tolérance et, au besoin, des coefficients. En cas de difficultés, les experts peuvent être amenés définir d'autres niveaux, voire dans certains cas, de nouveaux attributs par rapport à ceux préalablement définis.

Dans certains cas, nous l'avons dit, les experts ne parviennent pas à définir la relation entre les niveaux des attributs et la décision finale sur l'acceptabilité du produit. En effet, cette relation prend parfois la forme d'une relation non linéaire. Le paragraphe suivant montre comment les réseaux de neurones peuvent être utilisés pour exprimer cette non-linéarité.

2.2. RÉSEAU DE NEURONES

Le réseau de neurones peut être utilisé pour exprimer une relation non linéaire entre, d'une part, les niveaux des attributs de l'anomalie qui sont évalués par le contrôleur et, d'autre part, la décision finale d'un expert concernant l'acceptabilité du produit.

2.2.1. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

Les réseaux de neurones ont été développés pour résoudre de problèmes d'optimisation, de classification, etc. Aujourd'hui, ils sont utilisés également pour d'autres applications comme, par exemple, le traitement d'image, le contrôle ou encore la simulation.

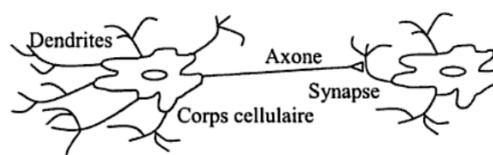
Le réseau des neurones artificiel (ANN - Artificial Neural Network) est un système efficace de traitement de données basé sur une modélisation par réseaux de neurones artificiels, par analogie avec ce qui existe dans notre cerveau avec des réseaux de neurones biologiques¹⁸.

La Figure 5.9 schématise l'analogie qui est faite entre un réseau de neurones biologiques et un réseau de neurones artificiels.

Un réseau de neurones artificiels a également vocation à posséder des caractéristiques analogues à celles d'un réseau biologique, comme celles par exemple de disposer [Borne 07] :

- D'une capacité à apprendre.
- D'un traitement d'informations en parallèle.
- D'une capacité à mémoriser les informations dans les connexions inter-neurones.
- D'une capacité à traiter des informations incomplètes.

¹⁸ La figure ci-dessous montre la composition d'un neurone biologique. Celui-ci est composé d'un corps cellulaire ou soma, de dendrites et d'un axone. Les dendrites sont des récepteurs d'informations. Le corps cellulaire regroupe les informations reçues par les dendrites et les axones font le transfert des informations du corps cellulaire au neurone suivant. Ce transfert d'information s'effectue via des synapses [Kolb 02] [Borne 07].



Structure d'un neurone biologique [Borne 07]

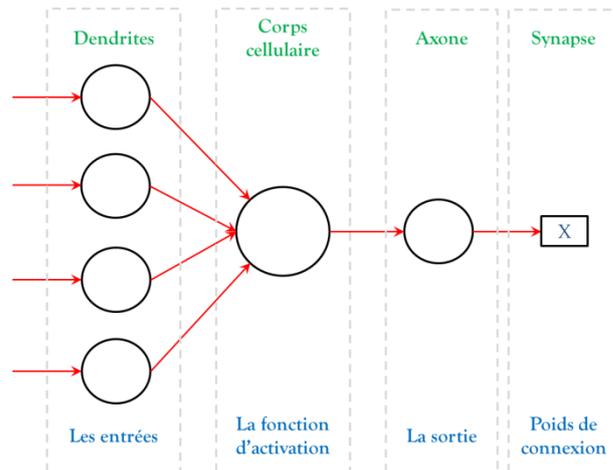


Figure 5.9 Analogie entre un réseau de neurones biologiques et un réseau de neurones artificiel (adapté de [Younes 10])

Avec les mêmes caractéristiques qu'un cerveau en termes d'apprentissage, d'adaptation et d'auto-organisation [Singh 09], un réseau de neurones peut extraire les caractéristiques essentielles et pertinentes de ses entrées. Il est capable de gérer des relations non-linéaires complexes lorsque celles-ci ne sont pas connues [Boccorh 02] [Krishnamurthy 07].

Il nous a donc paru pertinent d'utiliser le réseau de neurones artificiel pour résoudre des problèmes prenant en compte la perception humaine. En effet, l'utilisation en analyse sensorielle d'échelles de catégorie pour la quantification des attributs par niveaux peut générer des rapports non linéaires et de fortes interactions entre attributs. Même si cette relation peut être linéarisée par des transformations d'échelles, beaucoup d'informations traduisant la perception humaine peuvent être perdues [Boccorh 02].

L'utilisation des réseaux de neurones pour résoudre des problèmes liés à la perception humaine a fait objet de quelques études. Par exemple, Kengpol et Wangananon (2006) ont développé un réseau de neurones capable de prévoir la satisfaction des clients par rapport aux fragrances de parfums [Kengpol 06], Krishnamurthy *et al.* (2007) ont utilisé les réseaux de neurones pour prévoir les préférences des consommateurs à partir de l'évaluation sensorielle faite par des experts [Krishnamurthy 07], Singh *et al.* (2009) pour prévoir la qualité sensorielle du lait à partir des mesures physico-chimiques [Singh 09], Aires de Sousa (1996) pour identifier l'origine des vins [Aires de Sousa 96], Ikeda *et al.* (2004) pour analyser le rapport entre les caractéristiques sensorielles et les préférences des consommateurs [Ikeda 04]. Dans notre cas, les réseaux de neurones peuvent être utilisés pour exprimer une corrélation non linéaire entre l'évaluation sensorielle des anomalies et la décision sur la conformité de l'anomalie.

2.2.2. APPLICATION DU RÉSEAU DE NEURONES AU CONTRÔLE VISUEL

Si les attributs et les niveaux de la grille d'évaluation ont été correctement définis et inscrits dans le Standard Écrit, le réseau de neurones peut être construit. Pour cela, il est demandé aux

experts d'évaluer plusieurs produits et de donner une réponse (commune) sur l'acceptation ou non de chacun de ces produits en fonction de l'anomalie présente.

L'ensemble de ces données peut ensuite être utilisé pour construire le réseau de neurones. Comme le montre la Figure 5.10, ce réseau est composé [Baudet 12] :

- D'une couche d'entrée, qui reçoit les données à traiter. Dans notre cas, il s'agit des valeurs des niveaux des attributs obtenues lors des évaluations des experts.
- D'une ou plusieurs couches intermédiaires, qui effectuent le traitement spécifique du réseau.
- Une couche de sortie, qui délivre les résultats. Dans notre cas, il s'agit des décisions fournies par les experts lors de leur évaluation.

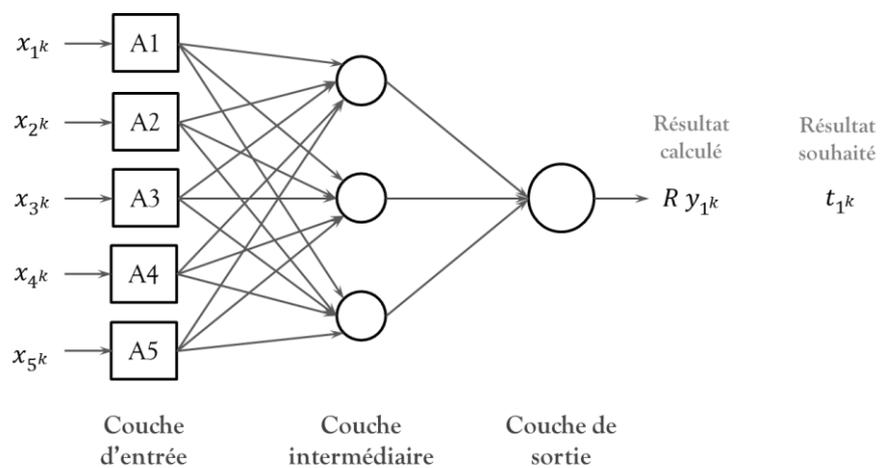


Figure 5.10 Réseau de neurone - contrôle visuel [Baudet 12]

Il n'y a pas vraiment de règles pour définir le nombre de neurones pour les couches intermédiaires. Pour [Younes 10], il est souhaitable que ce nombre soit égal au nombre de neurones de la couche d'entrée, à 75% de ce nombre, ou proche de la racine carrée du produit du nombre de neurones de la couche d'entrée et du nombre de neurones de la couche de sortie.

Le réseau se comporte donc comme une fonction non linéaire bornée qui traite des données « x » et produit des sorties « y », comme l'illustre la Figure 5.11. La fonction « φ » est définie par les poids du réseau et ceux-ci sont ajustés progressivement par apprentissage à partir d'une base d'exemples [Baudet 12].

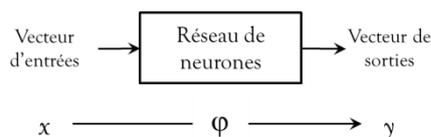


Figure 5.11 Réseau de neurone

La fonction sigmoïde (Équation 5.3) est une des fonctions d'activation utilisée pour calculer la sortie de chaque neurone du réseau.

$$y = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (\text{Équation 5.3})$$

L'apprentissage est supervisé à l'aide d'une base d'exemples. Les valeurs des niveaux des attributs doivent être comprises entre 0 et 1, ainsi que la valeur finale de décision sur l'acceptation (par exemple, 0 si le produit est refusé, 1 sinon). Cet apprentissage pourra s'effectuer à l'aide de l'algorithme de rétro-propagation (Voir Annexe 4).

Cet algorithme est le suivant :

Pour chaque exemple k ($1 \leq k \leq n$, où n = nombre d'exemples) :

- initialiser les poids w_{ij} aléatoirement, sur chacune des trois couches
- présenter les x_i^k aux neurones d'entrée ($1 \leq i \leq a$, où a = nombre d'attributs)
- calculer les activités, de couche en couche, jusqu'à la sortie y_1^k
- mesurer l'erreur entre la sortie calculée y_1^k et la sortie désirées t_1^k
- en sens inverse, calculer les gradients et modifier les poids w_{ij}

L'algorithme doit être exécuté avec un nombre d'itérations suffisant pour que l'erreur, entre la sortie calculée y_1^k et la sortie désirée t_1^k , soit la plus faible possible.

Si l'erreur obtenue est faible, on considérera que le réseau de neurones qui a été construit modélise correctement la démarche suivie par les experts pour l'évaluation des anomalies. Pour s'en assurer, le réseau sera testé sur d'autres anomalies. Dans le cas contraire, il s'agira de reconfigurer le réseau de manière différente, en ajustant le nombre de neurones par couches ou, au besoin, en augmentant le nombre de couches du réseau.

Dans le cas d'utilisation d'un réseau de neurones, le travail du contrôleur consiste donc seulement à identifier l'intensité des attributs. La relation entre cette description et la décision est faite par le réseau de neurones. À la place d'une grille d'évaluation, le Standard Écrit est représenté par une liste avec les attributs et leurs niveaux, comme l'illustre le Tableau 5.3.

Après avoir créé le Standard Écrit, et avoir trouvé le modèle le plus adéquat pour traduire la démarche de décision des experts sur l'acceptation, toutes les personnes concernées par le contrôle visuel doivent être formées et entraînées à l'étape d'évaluation et décision. Suite à la phase d'entraînement, un test doit être réalisé pour vérifier leur performance.

Tableau 5.3 Standard écrit – Réseau de neurones

Attribut	Niveau	Ordre d'intensité
Distance (D)	Visible à 30cm	1
	Visible à 1m	2
	Visible à 3m	3
Effet lumière (E.L)	Visible sous certains angles	1
	Visible sous tous les angles	2
Forme (F)	Rond	1
	Allongé	2
Taille (T)	Petit	1
	Moyen	2
	Grand	3
Contraste de forme (C.F)	Se noie dans le décor	1
	Contraste avec le décor	2
	Décor uni	3
Contraste de couleur (C.C)	Aucun	1
	Faible	2
	Important	3
Localisation	Criticité de la face = 1	1
	Criticité de la face = 2	2
	Criticité de la face = 3	3

3. VÉRIFICATION DE LA CAPACITÉ D'ÉVALUATION

Le Standard Écrit étant construit, la dernière étape consiste à former les futurs contrôleurs à l'utilisation de ce standard. Un test devra également être réalisé pour vérifier la performance des contrôleurs à l'issue de cette formation. Pour cela, nous utilisons le test $R^2&E^2$ détaillé dans Guerra (2008) [Guerra 08].

Ce test évalue la performance des contrôleurs en termes de répétabilité et de reproductibilité, aussi bien en exploration qu'en évaluation [Guerra 08] [Maire 12]. Le Tableau 5.4 décrit comment les données sont analysées.

Tableau 5.4 Résultats d'un test $R^2&E^2$ [Guerra 08]

Étape du contrôle	Analyse	Résultat
Exploration	Répétabilité	En pourcentage – proportion d'anomalies détectées par le contrôleur à deux reprises par rapport au nombre total d'anomalies perçues.
	Reproductibilité	En pourcentage – proportion d'anomalies détectées par le contrôleur par rapport au nombre d'anomalies donné par les experts.
Évaluation	Répétabilité	Donnée par l'écart-type, qui calcule la variabilité autour du biais
	Reproductibilité	Donnée par la moyenne des biais de l'évaluation
	Inertie	Prend en compte l'écart type des évaluations faites par le contrôleur et le décalage entre l'évaluation faite par le contrôleur et celle des experts.

Dans le but de mieux identifier les sources de variabilité des résultats du contrôle, nous proposons également que ce test soit couplé avec une analyse des attributs. En plus de leurs résultats, les contrôleurs renseignent également les niveaux des attributs des anomalies.

Le Tableau 5.5 montre le type de document qui doit être rempli par chaque contrôleur.

Tableau 5.5 Exemple de trame du document à remplir par les sujets lors du Test R²E²

# produit	# anomalie	Type d'anomalie	Attribut 1		Attribut 2		Attribut 3		Attribut 4		Intensité totale	
			1°	2°	1°	2°	1°	2°	1°	2°	1°	2°
	1											
	2											
	3											
	4											
	5											
	6											
	7											
...
	27											
	28											
	29											
	30											

Pour s'assurer de la performance globale du contrôle visuel (exploration, évaluation et décision), nous recommandons que le test s'applique sur 30 produits (8 produits ne présentant aucune anomalie, 11 produits présentant une anomalie non acceptable, 11 produits présentant une anomalie acceptable). Si le test vise uniquement à analyser la performance des contrôleurs en évaluation et en décision, ce nombre sera ramené à 20 anomalies, et celles-ci seront signalées au contrôleur pour ne pas introduire de la variabilité résultant de problèmes de détection des anomalies.

L'analyse des résultats d'un test R²E², sur la répétabilité et à la reproductibilité des contrôleurs, permet d'avoir une appréciation sur leur performance à détecter et à évaluer les anomalies. Par exemple, une reproductibilité exprimée par une moyenne des biais négative indique que le contrôleur est moins sévère que les experts.

Cependant, lorsque le test révèle des problèmes du contrôleur à évaluer correctement les anomalies, le test ne révèle pas où et quand ces problèmes sont apparus. Il est donc intéressant d'analyser les niveaux des attributs qu'il a renseignés. Le Tableau 5.6 montre un exemple des données à analyser.

Pour analyser des données, nous calculons trois indices :

- Le pourcentage d'accord entre le niveau d'attribut donné par le contrôleur et celui donné par les experts.
- L'écart moyen entre le niveau d'attribut donné par le contrôleur et celui donné par les experts.

Tableau 5.6 Exemple d'analyse de donnés pour l'évaluation de la performance en évaluation

n	Contrôleur 1										Contrôleur 2										Référence				
	A1	A1	A2	A2	A3	A3	A4	A4	IT	IT	A1	A1	A2	A2	A3	A3	A4	A4	IT	IT	A1	A2	A3	A4	IT
	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2					
1	2	2	-1	-1	4	4	0	2	5	7	3	3	-1	-1	4	4	0	0	6	6	3	-1	4	0	6
2	3	3	3	3	3	3	0	0	9	9	3	3	3	3	3	3	0	0	9	9	3	3	3	0	9
3	4	4	3	3	3	4	2	2	12	13	4	4	3	3	4	4	2	2	13	13	4	3	4	2	13
4	3	3	3	3	3	3	2	2	11	11	4	4	3	3	4	4	2	2	13	13	4	3	4	2	13
5	3	3	3	3	0	0	2	2	8	8	3	3	3	3	0	0	2	2	8	8	3	3	0	2	8
6	3	3	3	3	2	2	0	0	8	8	2	3	3	3	2	3	0	0	7	9	3	3	3	0	9
7	3	2	0	0	3	3	2	2	8	7	3	3	3	3	2	2	2	2	10	10	3	3	2	2	10
8	4	3	0	0	4	4	2	2	10	9	4	4	0	0	3	4	2	2	9	10	4	0	4	2	10
9	2	2	0	0	4	4	0	0	6	6	2	2	0	0	4	4	0	0	6	6	2	0	4	0	6
10	4	3	3	3	1	0	2	2	10	8	2	2	3	3	1	1	2	2	8	8	3	3	1	2	9
11	4	3	3	3	3	3	2	2	12	11	4	4	3	3	4	4	2	2	13	13	4	3	4	2	13
12	3	3	3	3	0	0	2	2	8	8	4	4	3	3	0	3	2	2	9	12	4	3	3	2	12
13	3	3	3	3	1	0	2	2	9	8	3	3	3	3	0	0	2	2	8	8	3	3	1	2	9
14	3	4	0	0	4	4	2	2	9	10	4	4	0	0	4	4	2	2	10	10	4	0	4	2	10
15	3	2	0	0	3	4	2	2	8	8	3	2	0	0	3	3	2	2	8	7	3	0	3	2	8
16	3	3	-1	-1	3	4	2	2	7	8	3	3	-1	-1	4	3	2	2	8	7	3	3	3	2	11
17	4	3	3	3	4	4	2	2	13	12	3	4	3	3	4	4	2	2	12	13	4	3	4	2	13
18	3	3	0	0	3	3	2	2	8	8	3	3	3	3	3	3	2	2	11	11	3	0	3	2	8
19	3	3	-1	-1	3	3	2	2	7	7	3	3	-1	-1	3	3	2	2	7	7	3	-1	3	2	7
20	3	3	-1	-1	1	0	2	2	5	4	3	3	-1	-1	1	1	2	2	5	5	3	-1	1	2	5

- Le rapport entre l'écart moyen et l'étendue.

Le Tableau 5.7 donne les équations utilisées pour les calculs des indices.

Tableau 5.7 Indices complémentaires pour l'analyse de la performance en évaluation

Indice	Équation	Détail*
% d'accord	$\% d'accord = \frac{n_i}{N}$	n_i = nombre total de niveaux d'attributs donnés par le contrôleur en accord avec les experts N = nombre total d'anomalies évaluées
Écart moyen	$écart_{moyen} = \frac{\sum(x_i - X_i)}{N}$	x_i = Valeur donnée par le contrôleur X_i = Valeur donnée par les experts
Écart Moyen/Étendue	$écart_{moyen} \text{ Étendue} = \frac{écart_{moyen}}{X_{max} - X_{min}}$	X_{max} = Niveau maximum de l'attribut X_{min} = Niveau minimum de l'attribut

* Il faut considérer les deux répétitions

Le Tableau 5.8 donne l'étendue des niveaux pour les données du Tableau 5.6.

Tableau 5.8 Étendue pour les niveaux des attributs

	A1	A2	A3	A4	IT
Minimum	2	-1	0	0	1
Maximum	3	3	4	2	13

Le Tableau 5.9 donne les valeurs obtenues en évaluation pour la répétabilité, la reproductibilité et l'inertie des deux contrôleurs.

Tableau 5.9 Performance en évaluation des contrôleurs

	Contrôleur 1		Contrôleur 2	
Répétabilité (σ)	1,28	À améliorer	1,23	À améliorer
Reproductibilité (biais)	-0,88	À améliorer	-0,33	OK
Évaluation (inertie)	1,56	À améliorer	1,27	À améliorer

Sur l'exemple, l'analyse révèle que la performance du Contrôleur 1 est à améliorer et que, concernant sa reproductibilité en évaluation, son contrôle est moins sévère en évaluation que celui des experts (valeur égale à -0,88). Une question qui se pose est de savoir si ce contrôleur a des difficultés dans l'évaluation sur l'ensemble des attributs des anomalies ou si ces difficultés se limitent uniquement à certains de ces attributs. Le calcul des trois indices donnés précédemment (Tableau 5.7) aide à apporter des éléments de réponse à cette question. Le Tableau 5.10 montre les valeurs des indices qui ont été obtenues pour l'exemple.

Tableau 5.10 Résultats des indices complémentaires

	Contrôleur 1					Contrôleur 2				
	A1	A2	A3	A4	IT	A1	A2	A3	A4	IT
% d'accord	68	90	60	98	45	88	90	85	100	68
Écart _{moyen}	-0,28	-0,35	-0,30	0,05	-0,88	-0,13	-0,05	-0,15	0,00	-0,33
Écart/étendue	28%	9%	8%	3%	7%	13%	1%	4%	0%	3%

Les résultats de l'analyse des attributs montrent que le contrôleur 1 a de difficultés pour évaluer les attributs 1 et 3 (respectivement 68% et 60% d'accord seulement avec les experts). Concernant l'attribut 2, la performance de son évaluation égale à celle du contrôleur 2 (90% d'accord avec les experts) mais son évaluation est moins sévère (respectivement -0,35 et -0,05). Une formation axée sur l'évaluation de ces attributs peut être envisagée pour ce contrôleur.

Comme nous avons dit dans le Chapitre 4, il est important de communiquer les résultats de ces analyses aux contrôleurs, à condition toutefois de leur transmettre correctement ce feedback¹⁹.

4. APPLICATION

Nous avons détaillé dans ce chapitre une approche de formalisation de l'étape d'évaluation/décision du contrôle visuel avec un objectif esthétique. Pour aboutir à cette formalisation, les entreprises rencontrent parfois des difficultés à construire un Standard Écrit. Comme nous l'avons dit, les experts du contrôle ont en effet souvent du mal à expliciter ce qui relève d'une anomalie acceptable et ce qui relève d'une anomalie non acceptable. C'était le cas dans les entreprises FOURNIER et S.T. DUPONT. Nous présentons ici comment nos propositions ont été appliquées dans ces deux entreprises. Auparavant, nous montrerons comment nous avons amélioré les spécifications de contrôle des entreprises EUDICA et NTN-SNR Roulements qui réalisent des contrôles visuels dont l'objectif est technique.

4.1. CONTRÔLE VISUEL AVEC OBJECTIF TECHNIQUE

L'objectif du contrôle visuel chez EUDICA et chez NTN-SNR Roulements est technique. Dans ces deux entreprises, les clients ont participé activement à la définition des limites de tolérances. Ces limites, très précises, ont été établies par type d'anomalie (rayure, arrachement, bavure, etc.). Cette précision n'empêche pas que les contrôleurs aient parfois des difficultés à comprendre les spécifications de contrôle qui sont mises à leur disposition. Le test R²&E² "Conformité" (voir Chapitre 3) que nous avons utilisé chez EUDICA a confirmé cette difficulté.

¹⁹ Le feedback du test de performance est un moment attendu pour le contrôleur. La façon dont on lui montre ses résultats peut influencer sa motivation [Brown 09]. Il faut en particulier éviter d'utiliser des expressions négatives, comme, par exemple, « inapte au contrôle ».

Pour rendre les spécifications de contrôle plus faciles à lire et à comprendre, nous avons proposé quelques modifications par rapport à celles existantes (voir Annexe 2). La Figure 5.12 montre un exemple de cette nouvelle spécification.

Référence interne		Désignation		Client		Référence client	
		CORPS DF60.5/48E					
Contrôler l'intégralité d'une pièce avant de passer à la pièce suivante. Temps de contrôle estimé par pièce : 1min 30s							
 Orientation de la pièce : Ø0.30 face opérateur Moyen de contrôle : Binoculaire Réglage : Molette latérale indice 2 (équivalent à grossissement X 20)				 Orientation de la pièce : face extérieure pièce face opérateur Moyen de contrôle : Binoculaire Réglage : Molette latérale indice 2 (équivalent à grossissement X 20)			
Zone	Critère	Code	Condition d'acceptation		Critère	Code	Condition d'acceptation
Zone 5:	 Toile horizontale	Jaune	Trou débouchant	Zone 9	Ligne de soudure	Jaune	absence de sillon
Zone 6:	 Toile verticale	Jaune	Non dépassante de l'extrémité du corps	Zone 3	Aspect piqué	Vert	
Zone 7:	 Toile verticale	Jaune	0.20 mm maxi	Zone 12	Rayures	Vert	
Zone 4:	 Manque matière	Rouge			3 godrons d'accrochage avec arrachement	Jaune	non détachable
	Chocs	Jaune	Petit	zone 12	Toile verticale	Jaune	0,10 mm maxi débouchant
				zone ø 1.20	Trou	Jaune	
					Rayure	Rouge	

Figure 5.12 Mode opératoire - EUDICA

Chez EUDICA en effet, le mode opératoire du contrôle visuel inclut simultanément la partie exploration et la partie évaluation/décision car les limites de tolérance d'une anomalie peuvent varier selon l'endroit où elle se trouve (par exemple, la limite de tolérance pour une toile verticale est fixée à 0,2mm si l'anomalie est localisée en zone 7 et à 0,1 mm si elle est localisée en zone 12).

Pour faciliter encore la lecture de la spécification, nous avons donc défini un code couleur pour aider le contrôleur dans sa décision. Ainsi,

- la couleur verte indique que, même si cette anomalie est présente, elle doit être considérée comme acceptable. Cette indication aide à éviter les fausses alarmes (révélées par un Test R²&E² "Conformité"),
- la couleur jaune indique que le contrôleur doit évaluer l'anomalie et, pour cela, doit vérifier si elle se situe ou non dans les limites de tolérance spécifiées,
- la couleur rouge indique que, si cette anomalie est présente, elle doit conduire le contrôleur à refuser le produit.

Chez NTN-SNR Roulements, les limites de tolérance de certaines anomalies sont données par une combinaison de critères (par exemple, une empreinte décelable au stylet sera jugée acceptable si elle ne chevauche pas un angle, si sa largeur et longueur sont inférieures à 0,8, etc.). Ces limites peuvent également varier selon le type de surface, fonctionnelle ou non. C'est pourquoi nous avons proposé une nouvelle spécification faisant la distinction entre surface non fonctionnelle (voir Figure 5.13) et surface fonctionnelle (voir Figure 5.14).

Comme pour EUDICA, nous avons utilisé un code couleur pour indiquer au contrôleur la décision à prendre selon l'évaluation du critère. Ainsi,

- si la couleur est verte, l'anomalie est jugée acceptable (par exemple, si l'arrachement n'est pas décelé au stylet),
- si la couleur est jaune, le contrôleur doit poursuivre l'évaluation de l'anomalie (par exemple, si l'empreinte est décelée au stylet, le contrôleur doit passer au critère suivant, c'est-à-dire, vérifier si l'anomalie chevauche un angle ou non),
- si la couleur est rouge, le contrôleur doit refuser le produit (par exemple, si l'arrachement est décelé au stylet, le produit est refusé).

Pour un contrôle visuel avec un objectif technique, les limites de tolérance sont donc généralement basées sur les caractéristiques physiques de l'anomalie. L'évaluation de l'anomalie est dans ce cas quantitative.

Quand le critère est qualitatif (par exemple, le terme *Petit* apparaît dans les spécifications utilisées chez EUDICA), l'entreprise met à disposition des contrôleurs une panoplie. Cela est possible car le critère est spécifique à l'anomalie et au produit.

4.2. CONTRÔLE VISUEL AVEC UN OBJECTIF ESTHÉTIQUE

Pour EUDICA et NTN-SNR Roulements, les difficultés dans l'étape d'évaluation et de décision se situaient principalement dans la lecture et la compréhension des spécifications de contrôle. Pour FOURNIER et S.T. DUPONT, ces difficultés étaient liées davantage à l'absence de spécification.

Ce manque de formalisation rendait les contrôles très subjectifs. Notre travail a donc été de les accompagner dans la construction d'un Standard Écrit basé sur les principes énoncés dans le Chapitre 2.

Pour FOURNIER, il a été possible de construire un Standard Écrit basé sur le modèle d'une grille hiérarchique corrigée, telle que décrite dans le § 2.1. La Figure 5.15 montre la grille obtenue et désormais utilisée par l'entreprise.



↓

		Paramètre	
Anomalie		Présent	Chevauche un angle
Évolutive	Calamine détachable	Non	
		Oui	
Non Évolutive	Coups de meule Choc	Non	
		Oui	Oui
			Non

Figure 5.13 Nouvelle spécification pour les surfaces non-fonctionnelles – NTN-SNR Roulements



↓

		Paramètre	Présent	Décelée au Stylet	Chevauche un angle	Largeur	Longueur	Si 2, la distance entre elles	Profondeur
Évolutive	Corrosion	Non							
		Oui							
	Tâche dû à l'attaque nitral	Non							
		Oui							
	Crique	Non							
Oui									
Surplus	Non								
	Oui								
Arrachement	Non								
	Oui								
Rayures Croisées	Non								
	Oui								
Non évolutive	Empreintes	Non							
		Oui			Oui				
				Non	> 0,8	> 0,8	< σ		
					< 0,8	< 0,8	> σ		
Rayure	Non								
	Oui				Oui				
				Non	> 0,15	> $\frac{1}{2} \sigma$	< σ		
					$\leq 0,15$	$\leq \frac{1}{2} \sigma$	$\geq \sigma$	> 0,05	
							$\leq 0,05$		

	non conforme
	continuer l'évaluation
	conforme

	Surface à contrôler
--	---------------------

Figure 5.14 Nouvelle spécification pour les surfaces fonctionnelles – NTN-SNR Roulements

Conditions d'observation		Mise en perspective			Intensité finale / décision			
		Local		Global				
Distance	Effet lumière	Orientation	Couleur	Position d'utilisation finale du produit				
D	EL	O	C	PU				
3	Visible de près	0 (zéro) Visible sous certains angles →	-1 (moins un) L'anomalie est dans le sens du décor →	0 (zéro) L'anomalie est de la même couleur que la pièce →	-1 (moins un) Non visible aménagement monté fermé et ouvert →	1	Acceptée	
			0 (zéro) si décor uni →	0 (zéro) Visible seulement aménagement monté ouvert →	0 (zéro) Visible seulement aménagement monté ouvert →	2		
						3		
4	Visible à bout de bras				4			
					5			
5	Visible de loin	+1 (plus un) Visible sous tous les angles →	0 (zéro) L'anomalie n'est pas dans le sens du décor →	+1 (plus un) L'anomalie cause un contraste de couleur →	+1 (plus un) Visible aménagement monté fermé →	6		refusée
						7		
						8		

Figure 5.15 Grille d'évaluation hiérarchique corrigée – FOURNIER

Cette grille d'évaluation présente l'avantage d'être utilisée pour n'importe quel type d'anomalie (marque, pollution, hétérogénéité ou déformation). Elle a été testée avec succès sur plusieurs produits différents, mais elle pourra être adaptée en fonction de la famille du produit (laque, polymère, bois, etc.).

Une formation spécifique à l'utilisation de la grille a été créée. Les premiers retours montrent les apports de la grille, comme, par exemple, une diminution dans la variabilité des résultats de contrôle et une amélioration dans la façon de partager le standard de l'entreprise.

Chez S.T. DUPONT, notre travail a consisté à sélectionner les attributs pertinents d'une anomalie et à définir leurs niveaux respectifs. Le Tableau 5.11 donne la liste obtenue.

Cependant, contrairement à l'entreprise FOURNIER, nous n'avons pas pu créer une grille hiérarchique corrigée. Il n'existait en effet pas de relation linéaire entre les niveaux des attributs et la décision finale de contrôle. Nous avons donc utilisé le réseau de neurones pour modéliser cette relation. Nous nous sommes basés pour cela sur un ensemble de données concernant 122 anomalies (voir Annexe 5). Le Tableau 5.12 montre un extrait de ces données.

Pour chacune des anomalies, une valeur de niveau a été donnée pour chaque attribut de l'anomalie : Effet Lumière (E.L), Forme (F), Taille (T), Contraste de Forme (C.F), Contraste de Couleur (C.C) et Position (P). Trois experts ont communiqué par ailleurs leurs décisions concernant chacune de ces anomalies : Conforme (C), Limite conforme (C ?), Limite non-conforme (NC ?) ou Non-Conforme (NC).

Tableau 5.11 Liste d'attributs et niveaux – S.T. DUPONT

Attribut	Niveau	Valeur
Effet lumière (E.L)	Visible dans une petite portion du parcours	2
	Visible dans la moitié du parcours	3
	Visible dans le parcours entier	4
Forme (F)	Rond	1
	Allongé	2
Taille (T)	<0,2 (rond) <1,5 et fin (Allongé)	0
	>0,2 et < 0,3 (rond) >1,5 et fin (Allongé)	1
	>0,3 et < 0,35 (rond) <1,5 et large (Allongé)	2
	>0,35 (rond) >1,5 et large (Allongé)	3
Contraste de forme (C.F)	Localisation favorable	-1
	Se noie dans le décor et localisation défavorable	0
	Contraire au décor et localisation défavorable	1
Contraste de couleur (C.C)	Aucun	0
	Faible	1
	Important	2
Position (P)	Face avant et écusson	4
	Côté entraîneur et marque (fond)	3
	Dos, petit côté arrière, dessous de chapeau	2
	Fond	1

Tableau 5.12 Données utilisées pour la modélisation – S.T. DUPONT

n	E.L	F	T	C. F	C. C	P	C/NC
1	3	2	3	-1	1	3	C ?
2	4	2	3	-1	2	3	C ?
...							
121	4	1	2	1	2	4	NC
122	3	1	0	1	2	4	NC

Le réseau de neurones que nous avons utilisé pour modéliser la relation entre les valeurs des attributs et la décision finale comportait 4 couches, 6 neurones d'entrée (E.L, F, T, C.F, C.C et P), 4 neurones intermédiaires et 1 neurone de sortie (la décision finale). Nous avons obtenu 94% d'accord entre les résultats donnés par les experts et ceux obtenus par le réseau construit (les valeurs de coefficients et les résultats sont détaillés dans l'Annexe 5). Ce résultat nous a confirmé la capacité d'un réseau de neurones à délivrer des résultats assez proches à ceux qu'auraient délivré les trois experts.

Pour valider ce modèle, un échantillon de 15 anomalies supplémentaires a été utilisé (Annexe 5). Chacune des anomalies présentait une combinaison de valeurs d'attributs (E.L, F, T, C.F, C.C, P) différente de celles des 122 anomalies utilisées pour la création du modèle. À partir de cet échantillon, une comparaison entre les résultats donnés par le réseau de neurones et les réponses données par les experts a été faite. Cette comparaison a révélé seulement 73% d'accord, soit un pourcentage en dessous de celui attendu (>90%) pour valider le réseau de neurones construit.

Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de ce résultat :

- les attributs et les niveaux choisis ne permettent pas d'exprimer toutes les différences entre anomalies,
- le standard de qualité de l'entreprise n'est pas totalement partagé par les experts, chaque expert ayant sa propre définition,
- les décisions des experts varient en fonction du niveau de qualité de la production.

Il est probable que ce résultat puisse également s'expliquer par les changements successifs qui se sont produits au sein du service qualité de l'entreprise et qui se sont traduits par des changements successifs dans la définition du niveau de qualité souhaitée. Pour aboutir à un réseau de neurones validé, il est vraisemblable que ces facteurs devront être analysés.

Pour cela, il faudra sans doute d'abord s'assurer de la fiabilité des experts en mesurant, à l'aide d'un test de classement, leurs performances dans l'évaluation d'une anomalie. Si le coefficient W de Kendall obtenu est inférieur à 0,9, il faudra analyser leurs différences et essayer de les mettre d'accord jusqu'à obtenir un résultat supérieur à 0,9.

Il restera ensuite à :

1. Modéliser à nouveau la relation entre valeurs d'attributs de l'anomalie et décision finale (soit par corrélation linéaire, soit par le réseau de neurones).
2. Tester ce modèle sur d'autres anomalies, et vérifier l'accord entre résultats des experts et résultats du modèle.
3. Après avoir validé un modèle (accord supérieur à 90%), le suivre. Ce modèle deviendra la représentation formelle du standard de qualité de l'entreprise.

Comme nous avons pu voir avec ces deux exemples (FOURNIER et S.T. DUPONT), l'étape d'évaluation, pour le contrôle visuel avec un objectif esthétique, est beaucoup plus complexe, que celui avec un objectif technique (EUDICA et NTN-SNR Roulements). Au contraire de l'objectif technique, les limites de tolérance ne sont pas définies et la décision est dépendante d'une interaction entre les différents attributs sensoriels.

Parfois cette interaction suit une relation linéaire et une grille d'évaluation peut être créée (FOURNIER). Cependant, parfois, le lien, entre les attributs sensoriels et la décision sur l'acceptation de l'anomalie, est beaucoup plus complexe et doit être modélisé à l'aide du réseau de neurones (S.T. DUPONT).

En tous cas, la modélisation (soit par corrélation linéaire, soit par réseau de neurones) est possible seulement si le standard de qualité de l'entreprise est figé et maîtrisé par les experts.

5. CONCLUSION

Nous avons listé dans ce chapitre les différentes étapes à suivre pour une formalisation des étapes d'évaluation et de décision d'un contrôle visuel avec un objectif esthétique.

Nous avons montré que cette formalisation est à réaliser avec le concours d'experts dont on doit s'assurer, avec le classement par rangs et le coefficient W de Kendall, qu'ils sont en accord entre eux.

Un Standard Écrit peut ensuite être construit. Nous avons utilisé ce qui est proposé pour construire un profil sensoriel en agroalimentaire pour proposer l'ensemble des étapes à suivre pour construire ce standard dans le cadre d'un contrôle visuel.

Les attributs, ainsi que leurs niveaux, nécessaires à l'évaluation des anomalies doivent être collectés et nous avons décrit comment les obtenir.

Les experts définissent ensuite, parmi ces attributs et ces niveaux, ceux à retenir et à inclure dans le Standard Écrit.

Concernant la forme du Standard Écrit, nous avons retenu la grille hiérarchique corrigée. Cette grille présente l'avantage d'être simple à comprendre et à utiliser. Nous avons montré comment construire cette grille en détaillant en particulier comment établir la relation entre les niveaux des attributs et la décision finale du contrôle, dans le cas où cette relation est linéaire et dans le cas où cette relation n'est pas linéaire. Nous avons également décrit comment s'assurer de la performance en évaluation des contrôleurs utilisant cette grille.

Enfin, nous avons montré comment nous avons appliqué nos propositions concernant l'étape d'évaluation/décision dans quatre entreprises, deux d'entre elles réalisant des contrôles visuels avec un objectif technique (EUDICA et NTN-SNR Roulements), les deux autres réalisant des contrôles visuels avec un objectif esthétique (FOURNIER et S.T. DUPONT).

CONCLUSION GÉNÉRALE

BILAN ET PERSPECTIVES

1. BILAN GLOBAL DE LA THÈSE

Les travaux présentés dans ce mémoire ont porté sur la maîtrise du contrôle visuel, notamment sur son application pour assurer la qualité d'aspect de surface. L'objectif de cette thèse était de proposer de solutions pour aider les entreprises à réaliser de façon efficace tous les étapes du contrôle visuel : l'exploration, l'évaluation et la décision. L'une des difficultés était de proposer une solution robuste pouvant être utilisée dans des entreprises réalisant différents produits. Afin de mettre en relief nos contributions, les principaux points de ce mémoire sont ici rappelés.

Dans le premier chapitre, nous avons positionné nos travaux selon les différentes approches de la qualité. Ce positionnement est important pour comprendre les objectifs de nos travaux et les difficultés associées. En effet, nos travaux ont un lien direct avec la qualité subjective, c'est-à-dire la qualité du point de vue du client, comment il l'évalue et comment il la perçoit. Ainsi, pour aider à comprendre comment la notion de qualité subjective/perçue se forme, nous avons présenté différentes approches de la perception, principalement parmi celles ayant été proposées jusqu'à présent en psychologie. À partir de ces approches, nous avons pu vérifier que la perception est un processus inconscient et très complexe. Cela explique la difficulté qu'ont les entreprises à réaliser le contrôle visuel de leurs produits, ce contrôle visant à s'assurer de la qualité perçue des produits.

Nos travaux visaient en effet à mieux maîtriser le contrôle visuel d'aspect de surface. À partir de l'étude des mécanismes associés à la perception visuelle et de l'étude ce qu'un contrôleur humain est en situation de voir, nous avons identifié les composants de la perception visuelle et nous avons décrit comment cette perception se construit. Nous avons ainsi présenté comment certaines anomalies pouvaient être plus ou moins perçues que d'autres.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté le contrôle visuel, ses deux objectifs associés (technique et/ou esthétique) et les différences entre ces deux types de contrôle. Ces différences,

nous l'avons vu, ne permettent pas d'utiliser les pratiques d'un contrôle visuel dont l'objectif est technique pour réaliser un contrôle visuel dont l'objectif est (principalement) esthétique. Pour ce dernier type de contrôle en effet, les anomalies à détecter ne peuvent généralement pas être listées de manière exhaustive. Cette détection suppose que des écarts puissent être détectés, ces écarts, nous l'avons montré, pouvant prendre trois formes : écart par rapport à la référence, écart par rapport aux intentions du concepteur et écart local. Chaque type d'écart, à l'origine d'une anomalie, induit une caractérisation spécifique de cette anomalie. Nous avons décrit plus précisément dans ce mémoire comment la construction d'un profil sensoriel aidait à effectuer cette caractérisation dans le cas d'un écart local. Cette technique, issue de l'analyse sensorielle, mesure l'intensité de perception d'une anomalie à partir de l'évaluation de ses attributs sensoriels. Nous avons proposé l'ensemble des attributs pouvant être utilisés et quantifiés pour ce profil. Pour certains de ces attributs, nous avons également montré comment les lois d'organisation de Gestalt avaient une influence sur la perception d'une anomalie. Ces attributs sensoriels ont été regroupés de façon à représenter la démarche utilisée par les contrôleurs lors de l'évaluation : les conditions d'observation de l'anomalie d'abord, puis sa description factuelle, sa description dans son contexte local et, enfin, dans son contexte global.

Ces attributs doivent être communiqués à l'ensemble des contrôleurs via un standard qui doit être formalisé. Nous avons présenté les types de standards pouvant être utilisés et montré que le Standard Écrit était le mieux adapté pour une anomalie à l'origine d'un écart local. La grille d'évaluation hiérarchique corrigée que nous avons proposée est un exemple de Standard Écrit.

En se basant à nouveau sur les différences par rapport à un contrôle visuel avec un objectif technique, le troisième chapitre a proposé une approche de modélisation du contrôle visuel avec un objectif esthétique. Cette approche se base sur une décomposition du contrôle en trois étapes : exploration, évaluation et décision. C'est sur l'étape d'évaluation que les différences sont les plus importantes.

La maîtrise d'un contrôle visuel passe par la maîtrise de chacune de ces trois étapes. Le test R²&E² "Conformité", que nous avons proposé, permet de mesurer la variabilité des mesures d'un contrôle visuel et aide à l'identification des sources possibles de cette variabilité. Les résultats de ce test peuvent aider l'entreprise à définir un plan d'action spécifique, étape par étape du contrôle, pour la réduction de la variabilité observée.

Le quatrième chapitre a étudié de manière plus détaillée l'étape d'exploration d'un contrôle visuel, et ceci avec l'objectif d'établir une liste de recommandations à suivre l'entreprise pour mieux maîtriser cette étape. Les solutions qui ont été proposées ont été listées à partir d'une structuration par « M » (Main d'œuvre, Matière, Milieu, Moyen et Méthode) des facteurs ayant une influence sur cette étape. Parmi ces recommandations, nous retiendrons celles relatives au choix du système d'éclairage, du poste de contrôle à utiliser, de la stratégie d'exploration à privilégier ou encore de la formation et de l'entraînement des contrôleurs à mettre en place.

Le cinquième chapitre était consacré aux étapes d'évaluation et de décision d'un contrôle visuel. La maîtrise de ces étapes requiert que le standard de qualité de l'entreprise soit connu et

partagé par l'ensemble des contrôleurs ainsi que par les experts du contrôle visuel. Pour le vérifier, nous avons proposé d'utiliser le test de classement par rang avec une analyse des données par le coefficient W de Kendall. Nous avons ensuite détaillé comment, sur la base de l'utilisation d'une grille hiérarchique corrigée, la relation pouvait être réalisée entre, d'une part, les valeurs des attributs du profil sensoriel d'une anomalie et, d'autre part, les décisions des experts concernant l'acceptabilité du produit. Cette relation peut être, soit linéaire, soit non linéaire. Dans ce dernier cas, nous avons montré comment les réseaux de neurones pouvaient aider à déterminer cette relation.

La manière dont certaines des propositions ont été appliquées dans les entreprises avec lesquelles nous avons collaboré (FOURNIER, S.T. DUPONT, EUDICA et NTN-SNR Roulements) ont été également présentées dans ce mémoire.

2. LES PERSPECTIVES DE LA RECHERCHE

L'objectif de nos travaux était de proposer une approche robuste et un ensemble d'outils pour aider les industriels à mieux maîtriser le contrôle visuel de leurs produits dans le cas où l'objectif de ce contrôle est principalement esthétique. Cet objectif est en partie atteint.

Il reste encore un certain nombre de questions auxquelles des réponses doivent être apportées. Nous détaillons ici quelques travaux à réaliser sur les propositions que nous avons faites, ainsi que quelques pistes de recherche possibles dans le prolongement de la nôtre.

2.1. SUR LE TRAVAIL RÉALISÉ

* Définition des attributs sensoriels

Nous avons proposé une liste d'attributs permettant de caractériser, de manière générique, une anomalie. Cette liste inclut notamment les attributs Taille et Forme relatifs à la description factuelle de l'anomalie.

L'attribut « Taille » pose plusieurs difficultés, en particulier celle de définir ses niveaux possibles. Est-ce que cette définition doit être faite sur la base d'une mesure absolue d'une grandeur physique ? Ou d'une mesure plus relative exprimant le rapport entre la taille de l'anomalie et la surface où elle se trouve ? Si l'on cherche à quantifier une perception, c'est la seconde proposition qui semble la plus appropriée. Si cette mesure est simple pour certaines anomalies, une rayure par exemple, elle est en revanche plus difficile pour d'autres, une piqûre ou un coup par exemple. Dans tous les cas, la question est de savoir comment définir l'attribut « Taille » de façon simple et représentative de la perception.

L'entreprise FOURNIER, par exemple, a préféré retirer l'attribut « Taille » de sa grille d'évaluation et le remplacer par l'attribut « Distance ». Au final, l'attribut « Taille » est-il si important dans la perception ? Plutôt que la taille d'une anomalie, n'est-ce pas plutôt les

conditions d'observation de cette anomalie, son contexte local et son contexte global les paramètres les plus déterminants d'une perception ?

L'attribut « Forme » pose moins de difficultés. Les niveaux que nous lui associons sont : *allongée, ronde*, etc. Mais ces niveaux sont-ils suffisants ? La *régularité* de la forme ne constitue-t-il pas un autre niveau également pertinent pour cet attribut ? Une question que nous pourrions nous poser serait celle de savoir si une anomalie qui a une bonne forme est mieux acceptée qu'une anomalie difforme.

Les réponses à ces questions pourront utilement aider les futures recherches visant à automatiser le contrôle visuel.

* **Choix des attributs sensoriels**

Nous avons considéré que les types « Marque », « Pollution », « Hétérogénéité », « Déformation » représentaient à eux quatre l'ensemble des anomalies susceptibles d'être évaluées lors d'un contrôle visuel. Nous avons proposé une grille d'évaluation pouvant être utilisée pour chacun de ces types. Cette grille est-elle utilisable dans toutes les situations ? Il resterait à le valider. Chez S.T. DUPONT, nous n'avons pas réussi à modéliser parfaitement, via un réseau de neurones, le lien entre les valeurs des attributs de la grille d'évaluation et le résultat donné par les experts sur l'acceptabilité de l'anomalie. Le problème concernait-il les valeurs des attributs, les résultats fournis par les experts ? Ou le problème ne montre-t-il pas que les attributs que nous avons proposés ne suffisent pas à caractériser une anomalie et que d'autres attributs doivent être choisis ? Il conviendrait de travailler encore sur le choix des attributs sensoriels de caractérisation d'une anomalie.

* **Adaptation de notre approche dans le cas de la présence de plusieurs anomalies**

Guerra (2008) avait proposé dans sa thèse l'utilisation de la fonction de Perte pour décider de l'acceptation d'un produit lorsque celui-ci présentait plusieurs anomalies. Nous n'avons pas pu tester sa proposition durant nos travaux. D'après nos observations réalisées en entreprise, nous pensons qu'une nouvelle étape, intermédiaire entre celles d'exploration et celle d'évaluation/décision, pourrait être formalisée. Il s'agirait en particulier de voir comment sélectionner l'anomalie (ou les anomalies) devant être évaluée(s) parmi celles détectées.

* **Modélisation de l'expertise par réseau de neurones**

Nous avons proposé l'utilisation du réseau de neurones pour faire la corrélation entre, d'une part les valeurs des attributs de la grille d'évaluation des anomalies et, d'autre part, la décision sur l'acceptation de l'anomalie.

Cette proposition n'a pas été complètement validée dans l'entreprise S.T. DUPONT. Lors de la phase de paramétrage du réseau en effet, nous pensons que nous ne disposions pas d'un ensemble de données suffisant pour parvenir à des résultats satisfaisants. Il serait donc

sans doute intéressant de tester à nouveau ce réseau de neurones sur un volume plus significatif de données. Une piste de recherche intéressante serait également d'étudier comment utiliser un réseau de neurones, initialisé avec un ensemble d'exemples nécessairement incomplet, mais qui pourrait apprendre de manière incrémentale au fur et à mesure de son utilisation avec l'acquisition de nouveaux exemples.

Le principe de modélisation par réseau de neurones semble en tout cas prometteur pour parvenir à modéliser la démarche suivie par un expert pour réaliser un contrôle. Bien évidemment, ce principe peut être étendu à tout type d'expertise (par exemple, le réglage d'une machine).

2.2. DANS LE PROLONGEMENT DU TRAVAIL RÉALISÉ

* Une approche de contrôle intégrant le cas d'un écart par rapport à une référence et le cas d'un écart par rapport aux intentions du concepteur

Nous avons identifié les types d'écarts à l'origine de la présence d'une anomalie présente sur une surface. Notre travail a principalement porté sur la détection et l'évaluation d'une anomalie relevant d'un écart local. Il resterait à poursuivre ce travail pour des anomalies relevant d'un écart par rapport à la référence ou relevant d'un écart par rapport aux intentions du concepteur. Nous avons évoqué la possibilité d'utiliser le test sensoriel d'évaluation pour mesurer l'intensité d'une anomalie provenant de ces deux types d'écart. Il s'agirait de valider cette proposition et, au besoin, proposer d'autres solutions possibles pour aboutir à une approche de contrôle visuel couvrant la totalité des anomalies possibles d'un contrôle d'aspect.

* Une approche de contrôle utilisant d'autres données sensorielles

Comme nous l'avons montré, la perception est aujourd'hui une notion déterminante dans la recherche de la qualité. La qualité perçue se base aujourd'hui principalement sur une perception visuelle. Mais elle peut également se baser sur d'autres sens, le toucher par exemple. Notre approche est-elle adaptable à l'utilisation d'autres données sensorielles ? Des grilles d'évaluation du même type peuvent-elles être construites ? L'idée d'une perception sensorielle complète, non limitée à une perception visuelle, reste encore à développer. À travers cette réflexion, c'est aussi celle sur la notion de qualité perçue dans le contrôle qui resterait encore à explorer.

* Processus de décision des experts

Les travaux dans l'entreprise S.T. DUPONT ont montré les limites de l'utilisation d'une grille pour formaliser le processus de décision des experts, les réseaux de neurones pouvant améliorer très sensiblement les résultats. L'expérience nous a donné à penser que le processus de décision de l'expert comporte de fortes non linéarités, et probablement, des interactions fortes. Un travail intéressant pourrait être mené sur la manière dont pourrait

être modélisée cette expertise, en combinant, par exemple, des méthodes exprimant une linéarité entre données et résultats et des méthodes capables d'exprimer une non linéarité.

*** Une automatisation du contrôle visuel**

Cette thèse s'est effectuée en parallèle avec celle de Gaëtan Le Goïc [Le Goïc 12]. L'objectif partagé par ces deux thèses était d'apporter des solutions pouvant contribuer, à terme, à une automatisation du contrôle visuel.

Certaines de nos propositions ont été appliquées dans les équipements réalisés par Le Goïc pour détecter et évaluer certaines anomalies de surface. D'autres propositions pourraient également être appliquées comme, par exemple, celle concernant notre approche de modélisation des experts dans un contrôle visuel.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Abbott 55] L. Abbott. *Quality and competition: an essay in economic theory*. Greenwood Press, 1955.
- [AFNOR 90] AFNOR. *NF X35-103 - Ergonomie - principes d'ergonomie visuelle applicables à l'éclairage des lieux de travail*, octobre 1990.
- [AFNOR 00] AFNOR. *NF EN 13100-1 - Contrôle non destructif des assemblages soudés sur produits semi-finis en thermoplastiques - partie 1 : contrôle visuel*, 2000.
- [AFNOR 02a] AFNOR. *NF EN 60512-1-1 - Connecteurs pour équipements électroniques - essais et mesures - partie 1-1 : examen général - essai 1a : examen visuel*, Juillet 2002.
- [AFNOR 02b] AFNOR. *NF EN 60749-3 - Dispositifs à semiconducteurs - méthodes d'essais mécaniques et climatiques - partie 3 : examen visuel externe*, Décembre 2002.
- [AFNOR 03] AFNOR. *BP X 10-040 - Référentiel de bonnes pratiques - caractérisation sensorielle des matériaux - recommandations méthodologique pour l'analyse sensorielle de la matière première au produit fini*, septembre 2003.
- [AFNOR 06a] AFNOR. *BP X 10-042 - référentiel de bonnes pratiques - caractérisation sensorielle des matériaux - recommandations pratiques pour l'analyse visuelle de la matière première au produit fini*, avril 2006.
- [AFNOR 06b] AFNOR. *NF EN 61300-3-1 - dispositifs d'interconnection et composants à fibres optiques - méthodes fondamentales d'essais et de mesures - partie 3-1 : examens et mesures - examen visuel*, avril 2006.
- [AFNOR 11] AFNOR. *NF EN 12464-1 lumière et éclairage - Éclairage des lieux de travail - partie 1 : lieux de travail intérieurs*, juillet 2011.
- [AIAG 10] AIAG. *Measurement systems analysis - Reference manual*, Automotive Industry Action Group, 4th edition, 2010.
- [Aires de Sousa 96] J. Aires-De-Sousa. *Verifying wine origin: A neural network approach*. *American journal of enology and viticulture*, 47(4):410-414, 1996.

- [Arani 84] T. Arani, M.H. Karwan, and C.G. Drury. A variable-memory model of visual search. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 26(6):631-639, 1984.
- [ATA 99] ATA. *ATA specification 100: Manufacturers' technical data*. Air Transport Association of America (www.airlines.org), 1999.
- [Bagot 99] J-D. Bagot. *Information, sensation et perception*. Armand Colin, 1^o edition, 1999.
- [Ball 88] K.K. Ball, B.L. Beard, D.L. Roenker, R.L. Miller, and D.S. Griggs. Age and visual search: Expanding the useful field of view. *Journal of the Optical Society of America A*, 5(12):2210-2219, 1988.
- [Ballaz 01] C. Ballaz, A. Chauvin, C. Marendaz, and C. Peyrin. *Anisotropie et recherche visuelle: l'orientation canonique comme déterminant de la saillance perceptive*. Sciences de la Vision et Applications, 2001.
- [Baudet 11] N. Baudet, M. Pillet, and JL Maire. Visual inspection of products: a comparison of the methods used to evaluate surface anomalies. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 2(01):31-38, 2011.
- [Baudet 12a] N. Baudet, JL Maire, and M. Pillet. The visual inspection of product surfaces. *Food Quality and Preference*, 2012.
- [Baudet 12] N. Baudet, M. Pillet, and J.L. Maire. Neural networks for improvement of the visual quality process. *KEER 2012 - International Conference on Kansei Engineering and Emotional Research*, 22 - 25 Mai 2012.
- [Baykut 00] A. Baykut, A. Atalay, A. Erçil, and M. Güler. Real-time defect inspection of textured surfaces. *Real-Time Imaging*, 6(1):17-27, 2000.
- [Boccorh 02] R.K. Boccorh and A. Paterson. An artificial neural network model for predicting flavour intensity in blackcurrant concentrates. *Food quality and preference*, 13(2):117-128, 2002.
- [Bonnet 03] C. Bonnet, R. Ghiglione, and J-F. Richard. *Traité de psychologie cognitive - Perception, action, langage*. Dunod, 1^o edition, 2003.
- [Borne 07] P. Borne, M. Benrejeb, and J. Haggège. *Les réseaux de neurones: présentation et applications*, volume 15. Editions OPHRYS, 2007.
- [Boucher 11] A. Boucher. *Ergonomie web*. Editions Eyrolles, 2011.
- [Breitmeyer 94] B.G. Breitmeyer and J.I. Breier. Effects of background color on reaction time to stimuli varying in size and contrast: Inferences about human m channels. *Vision Research*, 34(8):1039-1045, 1994.
- [Broh 82] R.A. Broh. *Managing Quality for Higher Profits: A Guide for Business Executives and Quality Managers*. McGraw-Hill, 1982.

- [Brown 09] N. Brown and L. Cooke. Giving effective feedback to psychiatric trainees. *Advances in Psychiatric Treatment*, 15(2):123-128, 2009.
- [Brozek 47] J. Brožek, E. Simonson, and A. Keys. A work test for quantitative study of visual performance and fatigue. *Journal of Applied Psychology*, 31(5):519-532, 1947.
- [Castel 03] A.D. Castel, J. Pratt, and F.I.M. Craik. The role of spatial working memory in inhibition of return: Evidence from divided attention tasks. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 65(6):970-981, 2003.
- [Cerella 85] J. Cerella. Age-related decline in extrafoveal letter perception. *Journal of Gerontology*, 40(6):727-736, 1985.
- [Chabukswar 03] S. Chabukswar, A.K. Gramopadhye, B.J. Melloy, and L.W. Grimes. Use of aiding and feedback in improving visual search performance for an inspection task. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 13(2):115-136, 2003.
- [CIE 86] CIE. *CIE n°29.2 Guide on interior lighting*, 1986.
- [Colquhoun 59] W.P. Colquhoun. The effect of a short rest-pause on inspection efficiency. *Ergonomics*, 2(4): 367-372,1959.
- [Colquhoun 64] W.P. Colquhoun. *Recent research in the psychology of inspection*. Technical report, DTIC Document, 1964.
- [Cordier 10] F. Cordier and D. Gaonac'h. *Apprentissage et mémoire, Volume 1*. Armand Colin, 2^e edition, 2010.
- [Costell 02] E. Costell. A comparison of sensory methods in quality control. *Food Quality and Preference*, 13(6):341 - 353, 2002.
- [Courtney 85] A.J. Courtney. Development of a search-task measure of visual lobe area for use in industry. *International Journal of Production Research*, 23(6):1075-1087, 1985.
- [Courtney 86] A.J. Courtney. A search performance test for visual lobe size. *IIE transactions*, 18(1):56-62, 1986.
- [Creusen 05] M.E.H. Creusen and J.P.L. Schoormans. The different roles of product appearance in consumer choice*. *Journal of product innovation management*, 22(1):63-81, 2005.
- [Crosby 79] P.B. Crosby. *Quality is free: The art of making quality certain, volume 94*. McGraw-Hill New York, 1979.
- [Debrosse 10] T. Debrosse, M. Pillet, J.L. Maire, and N. Baudet. Sensory perception of surfaces quality-industrial practices and prospects. *International Conference on Kansei Engineering and emotional research*, march 2-4 2010.
- [Delorme 03] A. Delorme and M. Flückiger. *Perception et réalité: une introduction à la psychologie des perceptions*. De Boeck, 2003.

- [Depledt 09] F. Depledt. *Évaluation sensorielle: manuel méthodologique*. Collection Sciences & techniques agroalimentaires. Lavoisier, 3^e ed. édition, 2009.
- [Dorfman 54] R. Dorfman and P.O. Steiner. Optimal advertising and optimal quality. *The American Economic Review*, 44(5):826-836, 1954.
- [Drury 75] C.G. Drury. The inspection of sheet materials-model and data. *Human Factors*, 17(3):457-464, 1975.
- [Drury 01] C.G. Drury and J. Watson. Good practices in visual inspection. *Human Factors in Aviation Maintenance-Phase Nine, Progress Report*, 2001.
- [Duncan 89] J. Duncan and G.W. Humphreys. Visual search and stimulus similarity. *Psychological Review*, 96(3):433, 1989.
- [Duret 03] D. Duret and M. Pillet. *Qualité en production*. Éditions d'Organisation, 2^e édition, 2003.
- [Edwards 68] C.D. Edwards. The meaning of quality. *Quality Progress*, 1(10):36-39, 1968.
- [Etaio 10] I. Etaio, M. Albisu, M. Ojeda, P.F. Gil, J. Salmerón, and F.J. Pérez Elortondo. Sensory quality control for food certification: A case study on wine: method development. *Food Control*, 21(4):533 - 541, 2010.
- [Etaio 11] I. Etaio, P.F. Gil, M. Ojeda, M. Albisu, J. Salmerón, and F.J. Pérez Elortondo. Improvement of sensory quality control in pdo products: An example with txakoli white wine from bizkaia. *Food Quality and Preference*, 2011.
- [Eustache 98] F. Eustache, B. Desgranges, and C. Lalevée. L'évaluation clinique de la mémoire. *Revue Neurologique*, 1998.
- [Evrard 93] Y. Evrard. La satisfaction des consommateurs: état des recherches. *Revue Française du marketing*, (144):53-66, 1993.
- [FAA 97] Federal Aviation Administration. *Visual inspection for aircraft. Advisory Circular*. ACNO, 1997. 43-204.
- [Feigenbaum 83] A. V. Feigenbaum. *Total quality control*. New York : McGraw-Hill, 3^e édition, 1983.
- [Findlay 97] J.M. Findlay. Saccade target selection during visual search. *Vision research*, 37(5):617-631, 1997.
- [Floru 96] R. Floru. *Eclairage et vision*. Institut National de Recherche et de Sécurité, décembre 1996.
- [Forest 92] G. Forest. *Essais non destructifs - Choix d'une méthode de contrôle*. AFNOR, 1^e édition, 1992.

- [Forslund 09] K. Forslund and R. Söderberg. The effects of geometrical variation on perceived quality—a close look at the concept of visual robustness. In *Proceedings of the 11th International Conference on Computer Aided Tolerancing*, March 26-27, Annecy, France, 2009.
- [Garaas 08] T.W. Garaas and M. Pomplun. Inspection time and visual-perceptual processing. *Vision research*, 48(4):523–537, 2008.
- [Garret 01] S.K. Garrett, B.J. Melloy, and A.K. Gramopadhye. The effects of per-lot and per-item pacing on inspection performance. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 27(5):291–302, 2001.
- [Garvin 84] D.A. Garvin. What does “product quality” really mean? *MIT Sloan Management Review*, 26(1):25–43, 1984.
- [Garvin 88] D.A. Garvin. *Managing quality: The strategic and competitive edge*. New York: Free Press, 1988.
- [Gerling 03] A. Gerling. La rotation, est-ce une solution? *Compte rendu du forum de Montréal*, 2003.
- [Gilden 10] D.L. Gilden, T.L. Thornton, and L.R. Marusich. The serial process in visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 36(3):533, 2010.
- [Gilmore 74] H.L. Gilmore. Product conformance cost. *Quality progress*, 7(5):16–19, 1974.
- [Giordano 06] J.L. Giordano. *L’Approche qualité perçue*. Éditions d’Organisation, 2006.
- [Goddefroid 01] J. Godefroid. *Psychologie: science humaine et science cognitive*. De Boeck, 2001.
- [Gotlieb 94] J.B. Gotlieb, D. Grewal, and S.W. Brown. Consumer satisfaction and perceived quality: complementary or divergent constructs? *Journal of Applied Psychology*, 79(6):875, 1994.
- [Gramopadhye 97] A.K. Gramopadhye, C.G. Drury, and J. Sharit. Feedback strategies for visual search in airframe structural inspection. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 19(5):333–344, 1997.
- [Gramopadhye 97] A.K. Gramopadhye, B.J. Melloy, M. Gopinath, and M. Budgavi. An evaluation of economic and performance feedback in an inspection task with explicit economic consequences. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 20(4):327–337, 1997.
- [Guerra 08] A.S. Guerra. *Métriologie sensorielle dans le cadre du contrôle qualité visuel*. PhD thesis, Université de Savoie, 2008.
- [Harris 66] D. Harris. Effect of equipment complexity on inspection performance. *Journal of Applied Psychology*, 50(3):236, 1966.

- [Harris 72] C.S. Harris. Effects of intermittent and continuous noise on serial search performance. *Perceptual and motor skills*, 35(2):627–634, 1972.
- [Hays 01] J.M. Hays and A.V. Hill. A preliminary investigation of the relationships between employee motivation/vision, service learning, and perceived service quality. *Journal of Operations Management*, 19(3):335–349, 2001.
- [Hunt 92] V.D. Hunt. *Quality in America: How to implement a competitive quality program*. Business One Irwin, 1992.
- [IEEE 83] IEEE. *IEEE standard glossary of software engineering terminology*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1983.
- [Ikeda 04] G. Ikeda, H. Nagai, and Y. Sagara. Development of food kansei model and its application for designing tastes and flavors of green tea beverage. *Food science and technology research*, 10(4):396–404, 2004.
- [INRS 99] INRS. *Fiche pratique de sécurité - ed 85 - éclairage artificiel au poste de travail*, 1999.
- [INRS 09] INRS. *Aide-mémoire juridique tj 13 - éclairage des locaux de travail*, octobre 2009.
- [ISO 82] ISO. NF EN ISO 9000, 1982.
- [ISO 87] ISO. NF EN ISO 9000, 1987.
- [ISO 94a] ISO. ISO 8586-2 *Analyse sensorielle - guide général pour la sélection, l'entraînement et le contrôle des sujets - partie 2: Experts*, 1994.
- [ISO 94b] ISO. NF EN ISO 9000, 1994.
- [ISO 95] ISO. NF ISO 11035 *Analyse sensorielle - recherche et sélection de descripteurs pour l'élaboration d'un profil sensoriel, par approche multidimensionnelle*, 1995.
- [ISO 00a] ISO. NF EN ISO 9001 *Systèmes de management de la qualité - exigences*, 2000.
- [ISO 00b] ISO. NF EN ISO 9000, 2000.
- [ISO 00c] ISO. NF EN ISO 9004 *Gestion des performances durables d'un organisme - approche de management par la qualité*, 2000.
- [ISO 03a] ISO. ISO13299 *Analyse sensorielle - méthodologie - directives générales pour l'établissement d'un profil sensoriel*, mars 2003.
- [ISO 03b] ISO. NF EN ISO 3668 - *Peintures et vernis - comparaison visuelle de la couleur des peintures*, mai 2003.
- [ISO 05] ISO. NF ISO 6658 *Analyse sensorielle - méthodologie - lignes directrices générales*, janvier 2005.
- [ISO 06] ISO. ISO 8587 *Analyse sensorielle - méthodologie - classement par rangs*, 2006.
- [ISO 07] ISO. ISO 8589 *Sensory analysis - general guidance for the design of test rooms*, 2007.

- [ISO 11a] ISO. NF EN ISO 17637 *Contrôle non destructif des assemblages soudés - contrôle visuel des assemblages soudés par fusion*, 2011.
- [ISO 11b] ISO. NF EN ISO 19011 *Lignes directrices pour l'audit des systèmes de management*, 2011.
- [Jebaraj 99] D. Jebaraj, R.A. Tyrrell, and A.K. Gramopadhye. Industrial inspection performance depends on both viewing distance and oculomotor characteristics. *Applied Ergonomics*, 30(3):223-228, 1999.
- [Juran 35] J.M. Juran. Inspectors' errors in quality control. *Mechanical Engineering*, 57(1):643-645, 1935.
- [Juran 74] J.M. Juran. *Quality Control Handbook*. New York : McGraw-Hill, 3rd ed. edition, 1974.
- [Kanji 90] G.K. Kanji. Total quality management: the second industrial revolution. *Total Quality Management*, 1(1):3-12, 1990.
- [Kengpol 06] A. Kengpol and W. Wangananon. The expert system for assessing customer satisfaction on fragrance notes: Using artificial neural networks. *Computers & Industrial Engineering*, 51(4):567-584, 2006.
- [Kephart 50] N.C. Kephart and J.M. Mason. Acuity differences between the two eyes and job performance. *Journal of Applied Psychology*, 34(6):423, 1950.
- [Koenig 02] S. Koenig, A.K. Gramopadhye, and B.J. Melloy. Use of job aid to promote systematic search under different levels of task complexity. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 12(4):349-363, 2002.
- [Kolb 02] B. Kolb and I.Q. Whishaw. *Cerveau et comportement*. De Boeck Supérieur, 2002.
- [Krishnamurthy 07] R. Krishnamurthy, A.K. Srivastava, J.E. Paton, G.A. Bell, and D.C. Levy. Prediction of consumer liking from trained sensory panel information: Evaluation of neural networks. *Food Quality and Preference*, 18(2):275-285, 2007.
- [Kristjánsson 00] A. Kristjánsson. In search of remembrance: Evidence for memory in visual search. *Psychological Science*, 11(4):328-332, 2000.
- [Kuehn 62] A.A. Kuehn and R.L. Day. *Strategy of product quality*. Harvard Business Review, 1962.
- [Kyllonen 00] J. Kyllonen and M. Pietikainen. Visual inspection of parquet slabs by combining color and texture. In *I APR Workshop on Machine Vision Application*, 28 - 30 november 2000.
- [Lambert 94] A. Lambert, J. Rivenez, G. Waché, and M. Cherfaoui. *Les contrôles non destructifs - Généralités*. Cetim, 3^o édition, 1994.
- [Lawler III 69] E.E. Lawler III. Job design and employee motivation. *Personnel Psychology*, 22(4):426-435, 1969.

- [Lawless 10] H.T. Lawless and H. Heymann. *Sensory Evaluation of Food: Principles and Practices*. Springer, 2^o edition, 2010.
- [Lee 09] F.C.H. Lee and A.H.S. Chan. Effects of magnification methods and magnifier shapes on visual inspection. *Applied Ergonomics*, 40(3):410–418, 2009.
- [Leffler 82] K.B. Leffler. Ambiguous changes in product quality. *The American Economic Review*, 72(5):956–967, 1982.
- [Le Goïc 12] G. Le Goïc. *Qualité géométrique et Aspect de surfaces - Approches locales et globales*. PhD thesis, Université de Grenoble, octobre 2012.
- [Lévy-Schoen 67] A. Lévy-Schoen. Les mouvements oculaires d'exploration. *L'année psychologique*, 67(2):569–599, 1967.
- [Lieury 11] A. Lieury. *Psychologie cognitive*. Dunod, 2^o edition, 2011.
- [Lin 09] Y.T. Lin, P.H. Lin, S.L. Hwang, S.C. Jeng, and C.C. Liao. Investigation of legibility and visual fatigue for simulated flexible electronic paper under various surface treatments and ambient illumination conditions. *Applied Ergonomics*, 40(5):922–928, 2009.
- [Ling 02] J. Ling and P. Van Schaik. The effect of text and background colour on visual search of web pages. *Displays*, 23(5):223–230, 2002.
- [Luyat 09] M. Luyat. *La perception*. Dunod, 1^o edition, 2009.
- [Maehara 04] G. Maehara, M. Okubo, and C. Michimata. Effects of background color on detecting spot stimuli in the upper and lower visual fields. *Brain and cognition*, 55(3):558–563, 2004.
- [Mäenpää 03] T. Mäenpää, J. Viertola, and M. Pietikäinen. Optimising colour and texture features for real-time visual inspection. *Pattern Analysis & Applications*, 6(3):169–175, 2003.
- [Maire 12] J.L. Maire, M. Pillet, and N. Baudet. Gage R2&E2: An effective tool to improve the visual control of products. *International Journal of Quality & Reliability Management*, accepté - publication en cours, 2012.
- [Maxwell 03] J.P. Maxwell, R.S.W. Masters, and F.F. Eves. The role of working memory in motor learning and performance. *Consciousness and Cognition*, 12(3):376–402, 2003.
- [McCormick 50] E.J. McCormick. An analysis of visual requirements in industry. *Journal of Applied Psychology*, 34(1):54, 1950.
- [Megaw 79] E.D. Megaw. Factors affecting visual inspection accuracy. *Applied Ergonomics*, 10(1):27–32, 1979.
- [Meléndez Martinez 05] A.J. Meléndez-Martinez, I.M. Vicario, and F.J. Heredia. Correlation between visual and instrumental colour measurements of orange juice dilutions: effect of the background. *Food quality and preference*, 16(5):471–478, 2005.

- [Melloy 06] B.J. Melloy, S. Das, A.K. Gramopadhye, and A.T. Duchowski. A model of extended, semisystematic visual search. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 48(3):540-554, 2006.
- [Micalizzi 89] J. Micalizzi and J.H. Goldberg. Knowledge of results in visual inspection decisions: Sensitivity or criterion effect? *International Journal of Industrial Ergonomics*, 4(3):225-235, 1989.
- [Mitra 06] D. Mitra and P.N. Golder. How does objective quality affect perceived quality? Short-term effects, long-term effects, and asymmetries. *Marketing Science*, 25(3) 230-247, 2006.
- [Morawski 80] T. Morawski, C.G. Drury, and MH Karwan. Predicting search performance for multiple targets. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 22(6):707-718, 1980.
- [Näsänen 01] R. Näsänen, H. Ojanpää, and I. Kojo. Effect of stimulus contrast on performance and eye movements in visual search. *Vision Research*, 41(14):1817-1824, 2001.
- [Ngobo 97] P.V. Ngobo. Qualité perçue et satisfaction des consommateurs: un état des recherches. *Revue française du marketing*, (163):67-80, 1997.
- [Nickles III 03] G.M. Nickles III, B.J. Melloy, and A.K. Gramopadhye. A comparison of three levels of training designed to promote systematic search behavior in visual inspection. *International journal of industrial ergonomics*, 32(5):331-339, 2003.
- [Oakland 89] J.S. Oakland. *Total Quality Management: a practical approach*. Department of Trade and Industry, 1989.
- [O'Regan 78] K. O'Regan and A. Lévy-Schoen. Les mouvements des yeux au cours de la lecture. *L'année psychologique*, 78(2):459-491, 1978.
- [Oude Ophuis 95] P.A.M. Oude Ophuis and H. Van Trijp. Perceived quality: a market driven and consumer oriented approach. *Food Quality and Preference*, 6(3):177-183, 1995.
- [Pérez Elortondo 07] F.J. Pérez Elortondo, M. Ojeda, M. Albisu, J. Salmerón, I. Etayo, and M. Molina. Food quality certification: An approach for the development of accredited sensory evaluation methods. *Food Quality and Preference*, 18(2):425 - 439, 2007.
- [Pirsig 74] R.M. Pirsig. *Zen and the art of motorcycle maintenance*. New York: William Morrow and Company, 1974.
- [Posner 84] M.I. Posner and Y. Cohen. Components of visual orienting. *Attention and performance X: Control of language processes*, 32: 531-556, 1984.
- [Puntous 12] T. Puntous, D. Delafosse, M. Jourlin, and J. Rech. Perception of scratches on metallic polished. In *ICSM3 - International Conference on Surface Metrology*, 21-23 march 2012.

- [Quattelbaum 12] R. Quattelbaum, B. et Schimitt. Tolerancing subjective and uncertain customer requirements regarding perceived product quality. In *12th CIRP – Conference on Computer Aided Tolerancing*, 2012.
- [Rao 06] P. Rao, S.R. Bowling, M.T. Khasawneh, A.K. Gramopadhye, and B.J. Melloy. Impact of training standard complexity on inspection performance. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 16(2):109–132, 2006.
- [Rebsamen 10] M. Rebsamen, J.M. Boucheix, and M. Fayol. Quality control in the optical industry: From a work analysis of lens inspection to a training programme, an experimental case study. *Applied Ergonomics*, 41(1):150–160, 2010.
- [Reilly 62] R.E. Reilly and W.H. Teichner. Effects of shape and degree of structure of the visual field on target detection and location. *Journal of the Optical Society of America A*, 52(2):214–215, 1962.
- [Rolland 03] S. Rolland. *Impact de l'utilisation d'internet sur la qualité perçue et la satisfaction du consommateur*. PhD thesis, université Paris IX - Dauphiné - Centre de Recherche DMSP (Dauphine-Marketing-Stratégie-Prospective), 2003.
- [Rookes 00] R. Rookes and J. Willson. *Perception - Theory, development and organisation*. Routledge, 2000.
- [Rousseau 77] D.M. Rousseau. Technological differences in job characteristics, employee satisfaction, and motivation: A synthesis of job design research and sociotechnical systems theory. *Organizational Behavior and Human Performance*, 19(1):18–42, 1977.
- [Sagi 11] D. Sagi. Perceptual learning in vision research. *Vision research*, 51(13):1552–1566, 2011.
- [Sannen 09] D. Sannen and H. Van Brussel. *Active grading ensembles for learning visual quality control from multiple humans*. Multiple Classifier Systems, pages 122–131, 2009.
- [Sannen 11] D. Sannen and H. Van Brussel. *A multilevel information fusion approach for visual quality inspection*. Information Fusion, 2011.
- [Saporta 06] G. Saporta. *Probabilités, analyse des données et statistique*. Editions Technip, 2006.
- [Schütte 99] M. Schütte, U. Dettmer, H. Klatte, and W. Laurig. Comparison of different layouts of inspection instructions for the production department of a company in the electronic industry. *International journal of industrial ergonomics*, 23(5):439–450, 1999.
- [Scialfa 87] C.T. Scialfa, D.W. Kline, and B.J. Lyman. Age differences in target identification as a function of retinal location and noise level: Examination of the useful field of view. *Psychology and Aging*, 2(1):14, 1987.
- [Semin 04] D. Semin. Assemblages soudés et contrôlés - non destructifs (CND). *Revue Construction Métallique*, 2, 2004.

- [Shore 01] D.I. Shore and R.M. Klein. On the manifestations of memory in visual search. *Spatial vision*, 14(1):59-75, 2001.
- [Singh 09] R.R.B. Singh, A.P. Ruhil, D.K. Jain, A.A. Patel, and G.R. Patil. Prediction of sensory quality of uht milk-a comparison of kinetic and neural network approaches. *Journal of Food Engineering*, 92(2):146-151, 2009.
- [Smith 86] A. Smith and C. Miles. Acute effects of meals, noise and nightwork. *British Journal of Psychology*, 77(3):377-387, 1986.
- [Steenkamp 89] J.B.E.M. Steenkamp. *Product quality: An investigation into the concept and how it is perceived by consumers*. Van Gorcum AssenMaastrich, 1989.
- [Sylla 95] C. Sylla and C.G. Drury. Signal detection for human error correction in quality control. *Computers in industry*, 26(2):147-159, 1995.
- [Taylor 04] W. Taylor, B. Melloy, P. Dharwada, A. Gramopadhye, and J. Toler. The effects of static multiple sources of noise on the visual search component of human inspection. *International journal of industrial ergonomics*, 34(3):195-207, 2004.
- [Terleckyj 76] N.E. Terleckyj et al. *Household Production and Consumption : The concept and measurement of product quality - Maynes*, E.S. National Bureau of Economic Research, 1976.
- [Treisman 88] A. Treisman and S. Gormican. Feature analysis in early vision: evidence from search asymmetries. *Psychological Review*, 95(1):15, 1988.
- [Treisman 85] A. Treisman. Preattentive processing in vision. *Computer vision, graphics, and image processing*, 31(2):156-177, 1985.
- [Tuchman 80] B.W. Tuchman. *The decline of quality, volume 2*. New York Times Magazine, november 1980.
- [Urdapilleta 01] I. Urdapilleta, C.T. Nu, C.S. Denis, and F.H. Kermadec. *Traité d'évaluation sensorielle – Aspects cognitifs et métrologiques des perceptions*. 1^o edition, 2001.
- [Vago 11] E. Vago and S. Kemeny. Critique of the aiag cross-tabulation procedure for attribute gauge R&R study. *International Journal of Quality Engineering and Technology*, 2(1):75-93, 2011.
- [Vora 02] J. Vora, S. Nair, A.K. Gramopadhye, A.T. Duchowski, B.J. Melloy, and B. Kanki. Using virtual reality technology for aircraft visual inspection training: presence and comparison studies. *Applied Ergonomics*, 33(6):559-570, 2002.
- [Wang 94] Q. Wang, P. Cavanagh, and M. Green. Familiarity and pop-out in visual search. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 56(5):495-500, 1994.
- [Wang 97] M.J.J. Wang, S.C. Lin, and C.G. Drury. Training for strategy in visual search. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 20(2):101-108, 1997.

- [Weil-Barais 05] A. A. Weil-Barais, D. Dubois, S. Nicolas, J-L. Pardinielli, and A. Streri. *L'homme cognitif*. Puf, 1^o ed. quadriage edition, 2005.
- [Williams 66] L.G. Williams. The effect of target specification on objects fixated during visual search. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 1(5):315–318, 1966.
- [Xue-wu 11] Z. Xue-wu, D. Yan-qiong, L. Yan-yun, S. Ai-ye, and L. Rui-yu. A vision inspection system for the surface defects of strongly reflected metal based on multi-class SVM. *Expert Systems with Applications*, 38(5):5930–5939, 2011.
- [Younes 10] R. Younes. *Chapitre 3 - réseaux de neurones*, (<http://www.ryounes.net/cours>), 2010.
- [Zeithaml 88] V.A. Zeithaml. Consumer perceptions of price, quality, and value: a means-end model and synthesis of evidence. *The Journal of Marketing*, pages 2–22, 1988.

ANNEXE 1

PROJET INTERREG IV FRANCE – SUISSE

Les travaux de cette thèse s'inscrivent la réalisation d'un projet INTERREG IV (2010-2012).

1. LES PARTICIPANTS

L'Université de Savoie, avec le Laboratoire SYMME, en partenariat avec l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, avec le Laboratoire LPM, sont à l'origine du projet Interreg IV A France - Suisse sur l'aspect de surface. Afin d'enrichir le projet et de partager d'expériences réels dans le domaine de l'aspect de surface, plusieurs partenaires industriels et institutionnels ont participé à ce projet.

- Du côté français
 - CETEHOR : Centre Technique de l'Horlogerie et de la Bijouterie
 - CTEDEC : Centre Technique de l'Industrie du Décolletage
 - EUDICA : entreprise spécialisée dans l'injection plastique
 - NTN-SNR Roulements : entreprise spécialisée dans la fabrication de roulements
 - FOURNIER : entreprise spécialisée dans la fabrication de meubles de cuisine et salles de bains
 - S.T. DUPONT : entreprise spécialisée dans les produits de luxe (stylos, briquets, maroquinerie, etc.)
- Du côté suisse
 - AUDEMARS PIGUET: entreprise horlogère
 - MICRO PRECISION SYSTEMS : entreprise spécialisée dans la fabrication de systèmes mécaniques de haute précision
 - ASYRIL : entreprise spécialisée dans la fabrication de systèmes mécatroniques
 - QUALIMATEST : entreprise spécialisée dans la réalisation de systèmes de vision

2. DESCRIPTIF RÉSUMÉ DU PROJET

L'objectif du projet est de mieux maîtriser la perception sensorielle de l'être humain concernant les produits à forte valeur ajoutée (horlogerie, automobile, médical, domotique...). Afin de pouvoir mieux mesurer la qualité de ces produits, telle que perçue par l'être humain, il s'agira de développer des méthodes et des instruments capables de formaliser cette perception, en prenant en compte les aspects subjectifs du jugement humain.

Pour cela, les compétences combinées des deux laboratoires universitaires porteurs du projet permettent de répondre efficacement à la problématique exposée à savoir :

- Modéliser le processus de jugement humain dans l'analyse de la qualité d'une surface
- Traduire cette perception au travers d'une formalisation mathématique par l'approche modale
- Développer de nouveaux capteurs capables d'assister utilement l'expertise humaine

2.1. LES ACTIONS²⁰

Pour atteindre ces objectifs, les actions programmées pour ce projet sont :

- Formaliser la démarche de perception sensorielle liée à la qualité subjective des objets
- Tester la robustesse de la démarche à différentes situations en utilisant le cas d'application des entreprises partenaires du projet.
- Formaliser une démarche de maîtrise et de suivi de la qualité utilisant le formalisme établi, construire une structure métrologique capable d'assurer la répétabilité et la reproductibilité des résultats.
- Développer des méthodologies d'identification des surfaces fondées sur l'approche modale capable de traduire la perception sensorielle.
- Développer des prototypes de capteurs sensoriels capables – sous certaines conditions – de reproduire le jugement humain.

2.2. RÉSULTATS ATTENDUS²¹

Pour répondre aux objectifs définis, en prenant en compte les compétences des deux laboratoires, le projet vise à délivrer :

- Une proposition de démarche qui permet la formalisation de la perception sensorielle liée aux surfaces, et mise au point d'une démarche permettant la réduction de la variabilité des mesures réalisées par un contrôleur humain.

²⁰ Nos travaux concernaient les trois premières actions

²¹ Nos travaux concernaient les deux premiers résultats attendus

- Proposer une organisation de la structure métrologique et qualité des entreprises capable de maîtriser la qualité perçue des objets fabriqués.
- D'algorithmes fondés sur l'expérience partagée du tolérancement modal et de la description des terminaisons spécifiques, capables de fournir de nouveaux outils métrologiques pour caractériser la qualité des surfaces.
- De prototypes de nouvelle génération pour des capteurs capables de se substituer à l'être humain, et mesurer une surface avec une faible variabilité.

2.3. LES MOYENS

Quatre enseignants chercheurs et trois doctorants ont travaillé sur ce projet sur une durée de 4 ans, 2 thèses ont été soutenues :

- Giuseppe ZAMUNER - "Application of Artificial Vision to the Quality Inspection of Surfaces in the Case of Luxury Products". ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE - 2011
- Gaëtan LE GOÏC - Qualité géométrique & aspect des surfaces - Approches locales et Globales - 2012

Le présent mémoire de thèse est le troisième réalisé dans le cadre de ce projet.

ANNEXE 2

LES PARTENAIRES INDUSTRIELS

Nos travaux de thèse ont été réalisés en partenariat avec plusieurs partenaires industriels qui souhaitent améliorer le contrôle visuel de leurs produits. Nous résumons ici la situation du contrôle visuel dans chaque entreprise au démarrage de nos travaux et les objectifs recherchés par notre collaboration.

1. EUDICA

L'entreprise EUDICA fait partie du groupe FAIVELEY depuis 2005. C'est une industrie de plasturgie, spécialisée dans les domaines du médical et de la pharmaceutique (55%), de l'industrie (32%) et de la parfumerie cosmétique (13%).

Le contrôle visuel est réalisé sur plusieurs produits dans le but de détecter des anomalies du type de celles présentées dans la Figure A2.1 (objectif technique) et de celles présentées dans la Figure A2.2 (objectif esthétique).

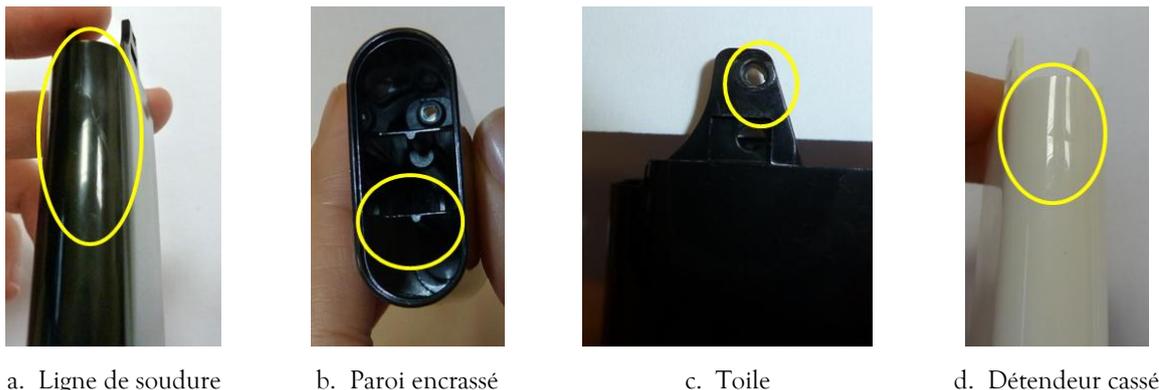


Figure A2.1 Les anomalies à détecter par le contrôle visuel (objectif technique) – EUDICA

Le contrôle visuel, chez EUDICA, s'opère de deux manières :

- L'autocontrôle : l'opérateur de production vérifie différents items pouvant indiquer le dérèglement de la machine. Il est réalisé à partir du prélèvement de petits échantillons, généralement suite à un changement d'équipe.

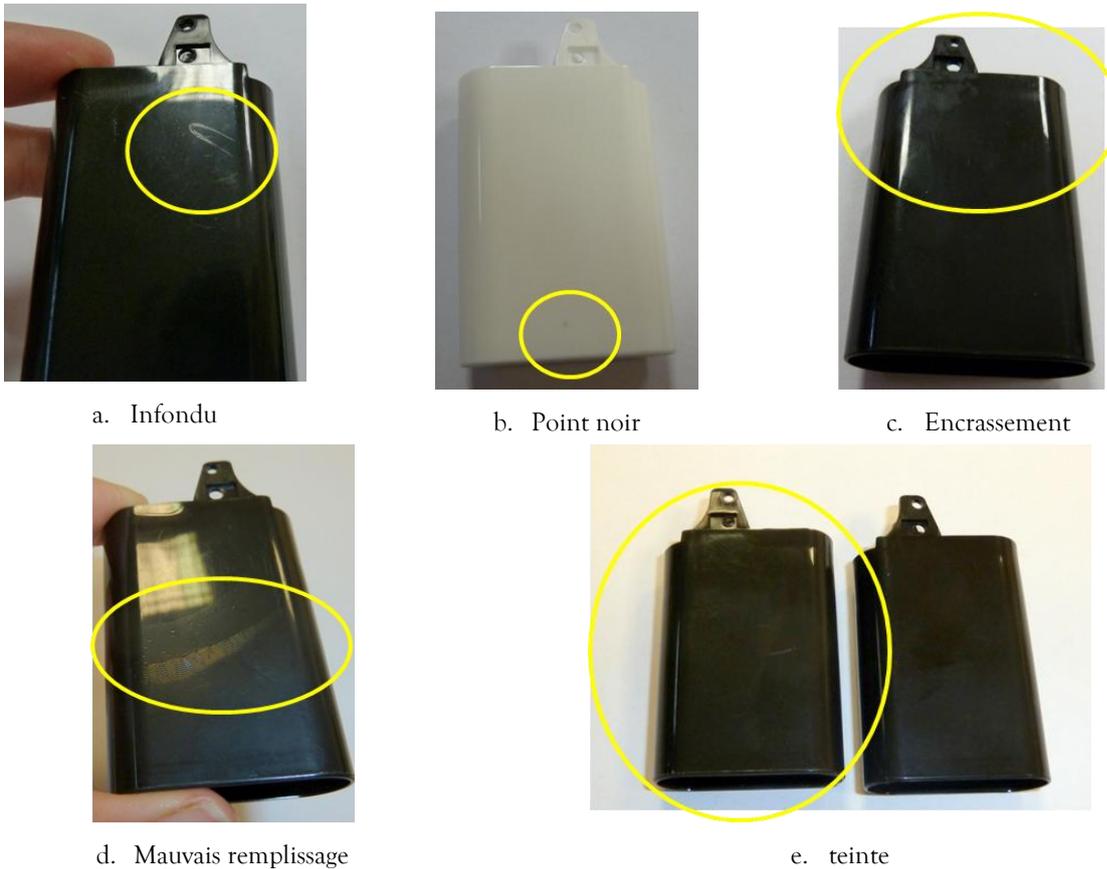


Figure A2.2 Les anomalies à détecter par le contrôle visuel (objectif esthétique) – EUDICA

- Le contrôle d'un lot de production : un technicien qualité vérifie, dans une salle de contrôle, différents zones des produits à la recherche d'une anomalie. En cas de détection d'anomalie, il évalue si elle est acceptable ou non.

Les anomalies à détecter sont spécifiques à chaque produit. Les responsables qualité et le client définissent ensemble les limites de tolérance pour chacune de ces anomalies. Ces limites sont ensuite communiquées aux contrôleurs à partir d'un mode opératoire du contrôle visuel dont la Figure A2.3 donne un exemple.

Le mode opératoire est l'unique document dont dispose le contrôleur pour effectuer son contrôle visuel (auto contrôle ou contrôle d'un lot de production).

Au démarrage du projet, de nombreux retours clients mettent en évidence le manque de fiabilité des résultats des contrôles visuels. Nos travaux avec EUDICA visaient à réduire la variabilité des résultats des contrôles visuels des lots de production.

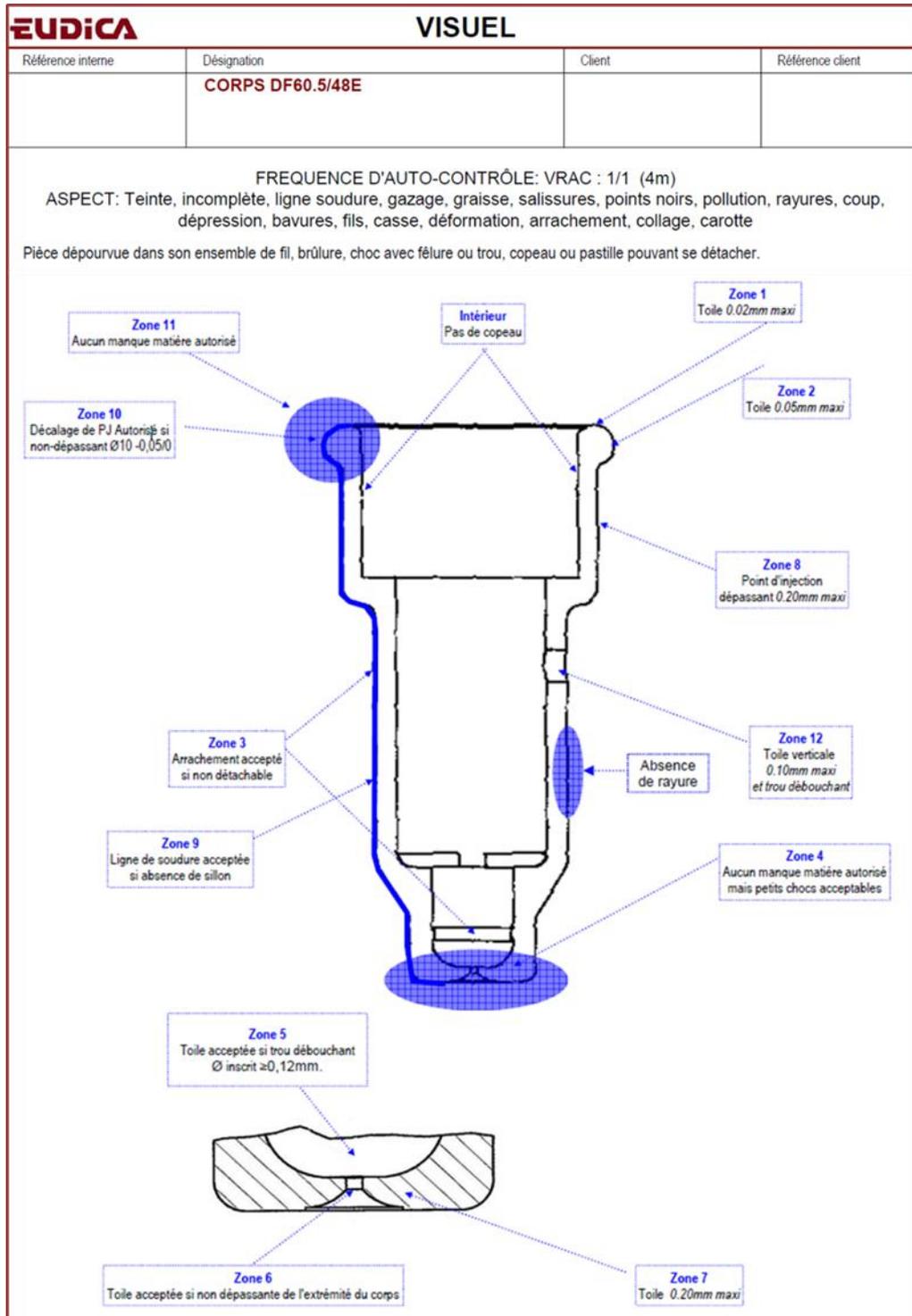


Figure A2.3 Exemple d'un modèle de mode opératoire - EUDICA

2. NTN-SNR ROULEMENTS

L'entreprise SNR fait aujourd'hui partie du groupe NTN. Elle se positionne comme le 3^{ème} producteur mondial de roulements, à destination des marchés de l'industrie, de l'automobile et de l'aérospatiale. Notre collaboration s'est effectuée avec le site d'Argonay, spécialisé dans l'industrie aérospatiale.

Le contrôle visuel consiste à vérifier la géométrie, la surface, le magnétisme persistant et la composition de chaque élément du roulement. Cela inclut la détection d'anomalies de surface du type de celles présentées dans la Figure A2.4.



a. Coup



b. Arrachement



c. Surplus

Figure A2.4 Exemple d'anomalies de surface – SNR-NTN Roulements

Chez NTN-SNR Roulements, le contrôle visuel est réalisé exclusivement pour s'assurer qu'aucune anomalie de surface ne va altérer la performance du produit. Pour réaliser ce contrôle, les contrôleurs (techniciens qualité) et opérateurs ont à leur disposition une spécification, conçue par le client et les responsables qualité, et dont la Figure A2.5 donne un exemple.

<p>2.1.2 Corps roulants</p>	<p>2.1.2 Rolling elements</p>	<p>2.1.2.1 Acceptance limits of the visual indications of ball, diameter and ends of cylindrical or crowned roller</p>																																																																		
<p>Les indications visuelles ci-dessous sont inacceptables sur toutes les surfaces :</p> <ul style="list-style-type: none"> - bavure, - crique, - corrosion, - piqûre de corrosion 	<p>The following visual indications are unacceptable on all surfaces :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Burr, raised metal, - crack, - corrosion - corrosion pit. 	<p>Acceptance conditions of the indications :</p>																																																																		
<p>2.1.2.1 Limites d'acceptation des indications visuelles de la bille, du diamètre et des faces de rouleaux cylindriques ou tonneaux</p>																																																																				
<p>Conditions d'acceptation des indications</p>																																																																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th>INDICATION VISUELLE</th> <th>ACCEPTÉE</th> <th>REFUSÉE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Arrachement</td> <td>Si non décelée au stylet</td> <td>Si décelée au stylet</td> </tr> <tr> <td>Empreinte</td> <td>Si non décelée au stylet</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Entaille</td> <td>Si décelée au stylet et si sa plus grande dimension est < 0,6</td> <td>Si décelée au stylet et si sa plus grande dimension est > 0,6</td> </tr> <tr> <td>Marque</td> <td>Et si la distance entre 2 empreintes est > au diamètre du corps roulant</td> <td>Et si la distance entre 2 empreintes est ≤ au diamètre du corps roulant</td> </tr> <tr> <td>Trace de choc</td> <td>Et si elle ne chevauche pas un angle</td> <td>Ou si elle chevauche un angle</td> </tr> <tr> <td>Griffures</td> <td>Si non décelées au stylet</td> <td>Si décelées au stylet</td> </tr> <tr> <td>Piqûre autre que corrosion</td> <td>Si son diamètre est ≤ 0,4</td> <td>Si son diamètre est > 0,4</td> </tr> <tr> <td>Rayure</td> <td>Si non décelée au stylet</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>Si décelée au stylet et si sa largeur est ≤ 0,15 et si sa profondeur est ≤ 0,05 et si sa longueur est ≤ à la moitié du diamètre du corps roulant</td> <td>Si décelée au stylet et si sa largeur est > 0,15 ou si sa profondeur est > 0,05 ou si sa longueur est > à la moitié du diamètre du corps roulant</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Et si la distance entre 2 rayures est ≥ au diamètre du corps roulant</td> <td>Ou si la distance entre 2 rayures est < au diamètre du corps roulant</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Et si elle ne chevauche pas un angle</td> <td>Ou si elle chevauche un angle</td> </tr> <tr> <td>Rayures croisées</td> <td>Si non décelées au stylet</td> <td>Si décelées au stylet</td> </tr> <tr> <td>Tache (1)</td> <td>Si ce n'est pas de la corrosion</td> <td>Si c'est de la corrosion</td> </tr> </tbody> </table>	INDICATION VISUELLE	ACCEPTÉE	REFUSÉE	Arrachement	Si non décelée au stylet	Si décelée au stylet	Empreinte	Si non décelée au stylet		Entaille	Si décelée au stylet et si sa plus grande dimension est < 0,6	Si décelée au stylet et si sa plus grande dimension est > 0,6	Marque	Et si la distance entre 2 empreintes est > au diamètre du corps roulant	Et si la distance entre 2 empreintes est ≤ au diamètre du corps roulant	Trace de choc	Et si elle ne chevauche pas un angle	Ou si elle chevauche un angle	Griffures	Si non décelées au stylet	Si décelées au stylet	Piqûre autre que corrosion	Si son diamètre est ≤ 0,4	Si son diamètre est > 0,4	Rayure	Si non décelée au stylet			Si décelée au stylet et si sa largeur est ≤ 0,15 et si sa profondeur est ≤ 0,05 et si sa longueur est ≤ à la moitié du diamètre du corps roulant	Si décelée au stylet et si sa largeur est > 0,15 ou si sa profondeur est > 0,05 ou si sa longueur est > à la moitié du diamètre du corps roulant		Et si la distance entre 2 rayures est ≥ au diamètre du corps roulant	Ou si la distance entre 2 rayures est < au diamètre du corps roulant		Et si elle ne chevauche pas un angle	Ou si elle chevauche un angle	Rayures croisées	Si non décelées au stylet	Si décelées au stylet	Tache (1)	Si ce n'est pas de la corrosion	Si c'est de la corrosion		<table border="1"> <thead> <tr> <th>VISUAL INDICATION</th> <th>ACCEPTED</th> <th>REJECTED</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Machining tear</td> <td>If not felt with the scribe</td> <td>If felt with the scribe</td> </tr> <tr> <td>Dent Nick Indentation</td> <td>If not felt with the scribe If felt with the scribe And if its greatest dim. does not exceed 0.6 And if the distance between 2 indications exceeds the rolling element diameter And if the indication does not extend across a corner</td> <td>If felt with the scribe And if its greatest dim. exceeds 0.6 Or if the distance between 2 indications does not exceed the rolling element diameter Or if the indication extends across the corner</td> </tr> <tr> <td>Scuffs</td> <td>If not felt with the scribe</td> <td>If felt with the scribe</td> </tr> <tr> <td>Pits (except corrosion pits)</td> <td>If the diam. does not exceed 0.4</td> <td>If the diam. exceeds 0.4</td> </tr> <tr> <td>Scratches</td> <td>If not felt with the scribe If felt with the scribe And if its width does not exceed 0.15 And if its depth does not exceed 0.05 And if its length does not exceed one half of the rolling element diameter And if the distance between 2 scratches exceeds the rolling element diam. And if the scratches do not extend across a corner</td> <td>If felt with the scribe And if its width exceeds 0.15 Or if its depth exceeds 0.05 Or if its length exceeds one half of the rolling element diameter Or if the distance between 2 scratches does not exceed the rolling element diameter Or if the scratches extend across a corner</td> </tr> <tr> <td>Crossed scratches</td> <td>If not felt with the scribe</td> <td>If felt with the scribe</td> </tr> <tr> <td>Stains (1)</td> <td>If no corrosion</td> <td>If corrosion</td> </tr> </tbody> </table>	VISUAL INDICATION	ACCEPTED	REJECTED	Machining tear	If not felt with the scribe	If felt with the scribe	Dent Nick Indentation	If not felt with the scribe If felt with the scribe And if its greatest dim. does not exceed 0.6 And if the distance between 2 indications exceeds the rolling element diameter And if the indication does not extend across a corner	If felt with the scribe And if its greatest dim. exceeds 0.6 Or if the distance between 2 indications does not exceed the rolling element diameter Or if the indication extends across the corner	Scuffs	If not felt with the scribe	If felt with the scribe	Pits (except corrosion pits)	If the diam. does not exceed 0.4	If the diam. exceeds 0.4	Scratches	If not felt with the scribe If felt with the scribe And if its width does not exceed 0.15 And if its depth does not exceed 0.05 And if its length does not exceed one half of the rolling element diameter And if the distance between 2 scratches exceeds the rolling element diam. And if the scratches do not extend across a corner	If felt with the scribe And if its width exceeds 0.15 Or if its depth exceeds 0.05 Or if its length exceeds one half of the rolling element diameter Or if the distance between 2 scratches does not exceed the rolling element diameter Or if the scratches extend across a corner	Crossed scratches	If not felt with the scribe	If felt with the scribe	Stains (1)	If no corrosion	If corrosion
INDICATION VISUELLE	ACCEPTÉE	REFUSÉE																																																																		
Arrachement	Si non décelée au stylet	Si décelée au stylet																																																																		
Empreinte	Si non décelée au stylet																																																																			
Entaille	Si décelée au stylet et si sa plus grande dimension est < 0,6	Si décelée au stylet et si sa plus grande dimension est > 0,6																																																																		
Marque	Et si la distance entre 2 empreintes est > au diamètre du corps roulant	Et si la distance entre 2 empreintes est ≤ au diamètre du corps roulant																																																																		
Trace de choc	Et si elle ne chevauche pas un angle	Ou si elle chevauche un angle																																																																		
Griffures	Si non décelées au stylet	Si décelées au stylet																																																																		
Piqûre autre que corrosion	Si son diamètre est ≤ 0,4	Si son diamètre est > 0,4																																																																		
Rayure	Si non décelée au stylet																																																																			
	Si décelée au stylet et si sa largeur est ≤ 0,15 et si sa profondeur est ≤ 0,05 et si sa longueur est ≤ à la moitié du diamètre du corps roulant	Si décelée au stylet et si sa largeur est > 0,15 ou si sa profondeur est > 0,05 ou si sa longueur est > à la moitié du diamètre du corps roulant																																																																		
	Et si la distance entre 2 rayures est ≥ au diamètre du corps roulant	Ou si la distance entre 2 rayures est < au diamètre du corps roulant																																																																		
	Et si elle ne chevauche pas un angle	Ou si elle chevauche un angle																																																																		
Rayures croisées	Si non décelées au stylet	Si décelées au stylet																																																																		
Tache (1)	Si ce n'est pas de la corrosion	Si c'est de la corrosion																																																																		
VISUAL INDICATION	ACCEPTED	REJECTED																																																																		
Machining tear	If not felt with the scribe	If felt with the scribe																																																																		
Dent Nick Indentation	If not felt with the scribe If felt with the scribe And if its greatest dim. does not exceed 0.6 And if the distance between 2 indications exceeds the rolling element diameter And if the indication does not extend across a corner	If felt with the scribe And if its greatest dim. exceeds 0.6 Or if the distance between 2 indications does not exceed the rolling element diameter Or if the indication extends across the corner																																																																		
Scuffs	If not felt with the scribe	If felt with the scribe																																																																		
Pits (except corrosion pits)	If the diam. does not exceed 0.4	If the diam. exceeds 0.4																																																																		
Scratches	If not felt with the scribe If felt with the scribe And if its width does not exceed 0.15 And if its depth does not exceed 0.05 And if its length does not exceed one half of the rolling element diameter And if the distance between 2 scratches exceeds the rolling element diam. And if the scratches do not extend across a corner	If felt with the scribe And if its width exceeds 0.15 Or if its depth exceeds 0.05 Or if its length exceeds one half of the rolling element diameter Or if the distance between 2 scratches does not exceed the rolling element diameter Or if the scratches extend across a corner																																																																		
Crossed scratches	If not felt with the scribe	If felt with the scribe																																																																		
Stains (1)	If no corrosion	If corrosion																																																																		
<p>(1) La coloration due à l'attaque Nital n'est pas admise.</p>		<p>(1) The Nital etch coloration is not allowed.</p>																																																																		
		<p>2.1.2.2 Limites d'acceptation des indications visuelles des surfaces non rectifiées</p>																																																																		
		<p>Indications acceptées :</p> <ul style="list-style-type: none"> - arrachement, - empreinte, entaille, marque, - griffures, - piqûre sauf corrosion, - rayure, rayures croisées, - tache sauf corrosion <p>Indications refusées :</p> <ul style="list-style-type: none"> - calamine détachable. 																																																																		
		<p>2.1.2.2 Acceptance limits of the visual indications of the underground surfaces</p> <p>Indications accepted :</p> <ul style="list-style-type: none"> - machining tear, - dent, nick, indentation, - scuff, - pits except corrosion pits, - scratches, crossed scratches, - stain except corrosion stain <p>Indication rejected :</p> <ul style="list-style-type: none"> - raised heat treatment scale. 																																																																		

Figure A2.5 Exemple d'une spécification – NTN-SNR Roulements

Une simple observation de cette spécification aide à comprendre la difficulté que les contrôleurs peuvent avoir à réaliser leurs contrôles visuels. Le document est dense, détaille un nombre important de critères d'acceptation et de refus du produit et les informations ne sont pas toutes décrites de manière uniforme. Aucun autre document ou moyen (mode opératoire d'exploration, panoplie, etc.) n'est mis à disposition des contrôleurs.

De nombreuses réclamations clients sont constatées, mettant directement en cause les résultats des contrôles visuels. Comme pour EUDICA, notre collaboration avec NTN-SNR Roulements visait à identifier les sources de variabilité des résultats du contrôle visuel et à visait à proposer des actions pour réduire cette variabilité.

3. FOURNIER

La société FOURNIER fabrique des meubles pour la cuisine (80%), pour la salle de bain (17,5%) et des éléments de rangement (2,5%). L'entreprise distribue ses produits sous quatre marques : Mobalpa, Socooc, Delpha et Pérène. Le même niveau de qualité est défini pour les produits des quatre marques.

Le contrôle visuel consiste à détecter et évaluer des anomalies du type de celles présentées dans la Figure A2.6.

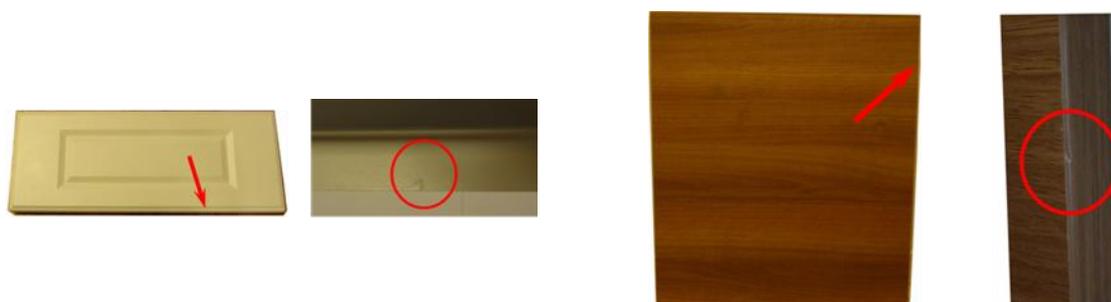


Figure A2.6 Exemples d'anomalies - FOURNIER

Chez FOURNIER, l'objectif du contrôle visuel est d'assurer que les produits présentent un aspect irréprochable. Le contrôle s'effectue tout au long de la production, dès la réception de la matière première, en passant par les opérations de décoration, jusqu'au montage des meubles. Ce sont les opérateurs de production, et non des contrôleurs spécialisés, qui ont en charge ce contrôle.

Chaque opérateur dispose, pour son contrôle, d'un document du type de celui présenté dans la Figure A2.7 et qui donne des informations générales sur les tâches qu'il doit réaliser.

SCIE GIBEN SMART DECOUPE FEUILLES STRAT

OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION : Cette fiche a pour objet de définir les règles pour certaines opérations propres au poste. Cela concerne des instructions de contrôle ou de mode opératoire par exemple. L'ensemble des tâches devant être assurées au poste ne sont pas obligatoirement décrites sur ce document.

REGLES DE SECURITE AU POSTE :



OBLIGATOIRES



CONSEILLES



**KEVLAR
 OBLIGATOIRE
 (Changement de lames)**

MODE OPERATOIRE :

- * Jalonner les produits en début de série.
- * Pour les habillages, rajouter 1cm en longueur et en largeur.
- * Pour les chants PVC, couper des longueurs de 3m.
- * Noter les quantités produites et les rebuts sur les OF.
- * Conditionnement :
 - Stratifiés emballés : sur chariot ; coller la fiche suiveuse sur la feuille de strat.
 - Cotés décors : dans caisson spécifique ; coller la fiche perso au milieu de la feuille.

GAMME DE CONTROLE :

- * Vérifier absence de défaut visible à 1 mètre.
- * Ecarter toute pièce avec éclat, rayure, tache, point noir, marbrure...
- * Nettoyer les pièces tachées à l'aide d'un chiffon imbibé de diluant.
- * Contrôler la longueur et largeur des pièces en début et fin d'équipe, selon cotes finies indiquées sur les documents de travail, à l'aide du mètre à ruban, tolérance +/-1mm.
- * Contrôler l'équerrage des pièces en début et fin d'équipe, au pied à coulisse, maxi 2mm entre diagonales.

TRAITEMENT DES NON-CONFORMITES :

- * Jeter les produits non-conformes dans les bennes correspondantes.

MAINTENANCE :

- * Nettoyer le poste 1 fois par semaine.

ENVIRONNEMENT :

- * Jeter les déchets dans les bennes correspondantes selon les consignes sur piquets de parc à déchets.
- * Chiffons imbibés de solvant : utiliser les poubelles anti-feu / filière "DIS".

Figure A2.7 Fiche d'instructions – FOURNIER

La réalisation de contrôle visuel par des opérateurs de production, non dédiés au contrôle, ainsi que l'absence d'informations précises contenues dans les fiches d'instruction peuvent expliquer le nombre important d'anomalies non détectées par les opérateurs. La Figure A2.8 montre par exemple deux exemples d'anomalies, pourtant sévères, non détectées.

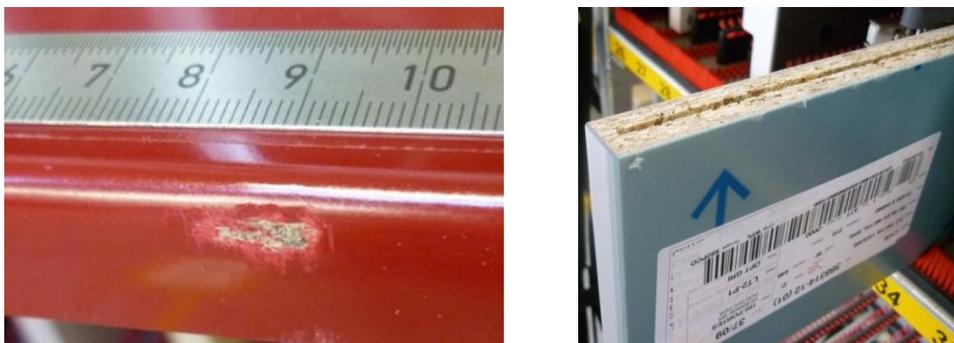


Figure A2.8 Exemple de pièces arrêtées lors de l'audit

A ces difficultés s'ajoutent des problèmes d'évaluation, l'entreprise ne souhaitant pas que les opérateurs écartent des produits dont les anomalies n'auraient pas d'impact sur la perception qu'en auront le client (anomalies sur des parties cachées du produit après assemblage ou anomalies peu visibles).

Notre collaboration avec FOURNIER avait, dans un premier temps, pour objectif une amélioration de la performance des opérateurs dans la détection des anomalies, et dans un second temps, la construction d'un standard écrit pour l'évaluation des anomalies détectées.

4. S.T. DUPONT

S.T. DUPONT fabrique des produits de luxe (briquets, stylos mais également maroquinerie et bagagerie).

Le contrôle visuel consiste à détecter et évaluer des anomalies du type de celles présentées dans la Figure A2.9.

Le contrôle visuel s'effectue après la quasi-totalité des opérations de fabrication (usinage, polissage, plaquage, montage, etc.) et vise à s'assurer qu'aucune anomalie pouvant altérer la perception du client n'est présente sur un produit. Ce contrôle est effectué soit par les opérateurs en auto contrôle, soit ponctuellement par un technicien qualité.

Aucun document n'est à disposition des contrôleurs ou des opérateurs pour les aider. Certes une panoplie de produits est disponible, mais elle n'est pas exhaustive compte tenu de la grande diversité des décors des produits. Les informations sont transmises oralement et/ou c'est le contrôleur le plus expérimenté qui forme les nouveaux arrivants.

Des problèmes sont relevés dans la détection des anomalies, mais aussi, et surtout, dans la décision qui suit l'évaluation des anomalies. Il est courant que les experts ne soient pas d'accord eux-mêmes sur ce qui doit être accepté et ce qui doit être refusé.

Notre collaboration avec S.T. DUPONT avait pour objectif d'améliorer l'évaluation des anomalies et la décision qui en résultait avec l'objectif de réduire la variabilité des résultats observée.



Figure A2.9 Exemples d'anomalies - S.T. DUPONT

Tableau A2.1 Tableau récapitulatif

	Eudica	NTN-SNR	Fournier	S.T. Dupont
Objectif du contrôle	Assurer la performance du produit	Assurer la performance du produit	Assurer la qualité esthétique de la surface	Assurer la qualité esthétique de la surface
Qui contrôle ?	Opérateurs Contrôleurs qualité	Contrôleurs qualité	Opérateurs	Opérateurs Contrôleurs qualité
Limites de tolérance définies ?	Oui	Oui	Non	Non
Documents disponibles	Spécification	Spécification	Quelques instructions	Panoplie
Objectif des travaux	Identifier les sources de variabilité Proposer de solutions adaptées	Identifier les sources de variabilité Proposer de solutions adaptées	Formaliser le contrôle visuel Formaliser le standard de qualité	Formaliser le contrôle visuel Formaliser le standard de qualité

ANNEXE 3

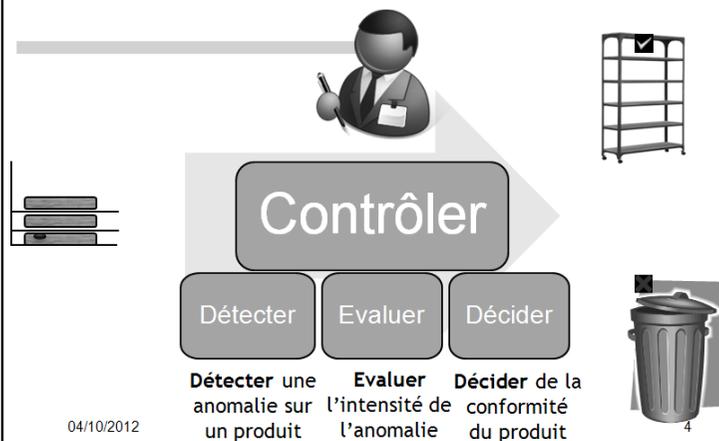
MODULE DE FORMATION AU CONTRÔLE VISUEL – EXPLORATION FOURNIER

Formation au contrôle visuel

La détection



1- Les étapes du contrôle visuel



Objectifs de la formation

- Améliorer les résultats du contrôle visuel de nos produits

04/10/2012

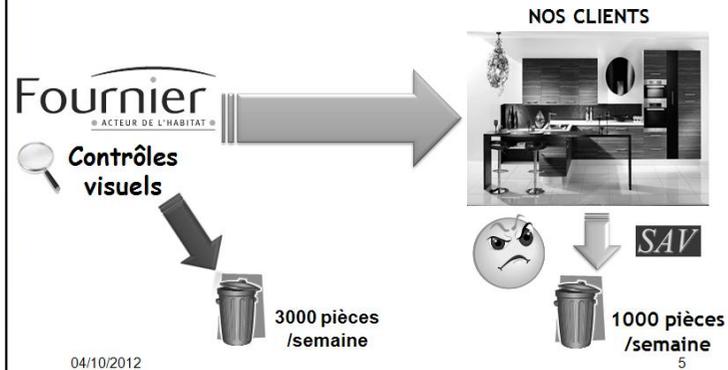
2

2-1- Constat

- La détection n'est pas fiable à 100%

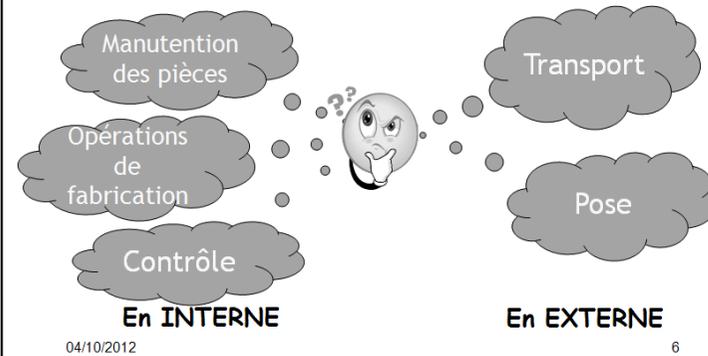


2-1- Constat



2-1- Constat

• Quelques causes potentielles



2-2- Conséquences

- A votre avis, sur 100 pièces produites combien sont écartées ?
- Réponse :
Moyennes de l'année 2010

Atelier	Rebut/Retouches	SAV
AT13 Portes Polymères	3	2
AT14 Portes Bois	1,5	4
AT14 Portes Laquées	11	3
AT41 Plans de Travail	3	1,5

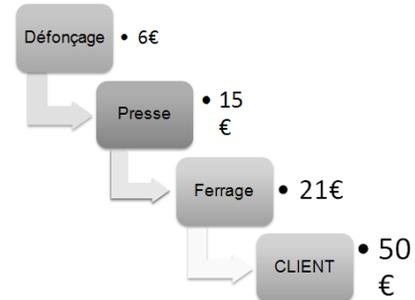
04/10/2012

7

2-2- Conséquences

• Combien ça coûte ?

– Exemple : Portes polymères



Coût pour Fournier par an (tous produits)

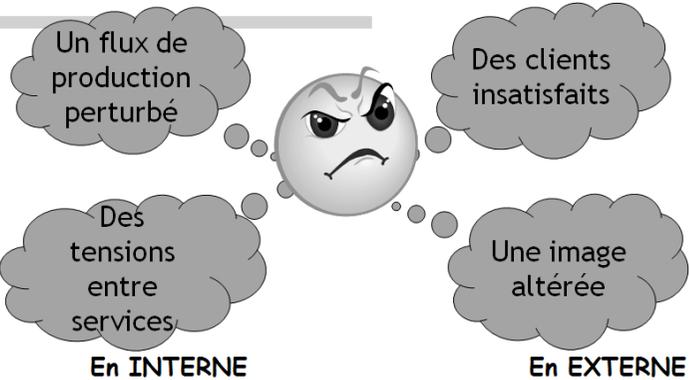


SAV :
3,5 Millions €
+
Rebuts :
750 000 €

04/10/2012

8

2-2- Conséquences



04/10/2012

9

2-2- Conséquences

- A votre avis, sur 100 pièces à **nouveau** contrôlées lors d'audits produits, combien sont écartées ?
- Réponses :

Moyenne de l'année 2010

Atelier	Rebut	Audit
AT13 Portes Polymères	3	2
AT14 Portes Bois	1,5	1,5
AT14 Portes Laquées	11	7
AT41 Plans de Travail	3	3,5

04/10/2012

10

2-2- Conséquences

- La détection : une étape essentielle pour le contrôle visuel

Atelier	Rebut	Audit	SAV
AT13 Portes Polymères	3	2	2
AT14 Portes Bois	1,5	1,5	4
AT14 Portes Laquées	11	7	3
AT41 Plans de Travail	3	3,5	1,5

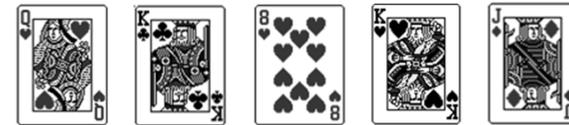
Détecter mieux ⇒ Oui
Faire de la sur-qualité ⇒ Non



04/10/2012

3- Les facteurs influents (exemple 1)

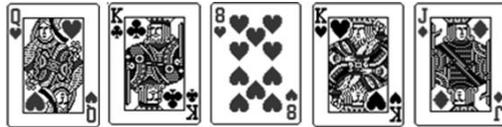
- Contrôlez visuellement les cartes qui vous seront présentées.
- Y a-t-il des anomalies ?
 - Attention, vous avez 2 secondes par carte !



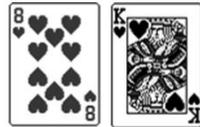
04/10/2012

12

3- Les facteurs influents



- Il y avait DEUX anomalies !



04/10/2012

13

3- Les facteurs influents (exemple 2)

Attention vous avez 5 secondes pour lire la phrase suivante!

**LES ARBRES
DANS LA
LA FORÊT**

04/10/2012

14

3- Les facteurs influents (exemple 3)

Que voyez-vous sur cette illustration ?
(ne rien dire jusqu'au tour de table)

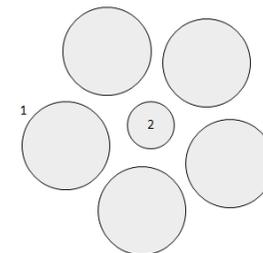
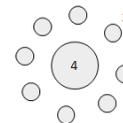


04/10/2012

15

3- Les facteurs influents (exemple 4)

Classer les diamètres des ronds du plus petit au plus grand.

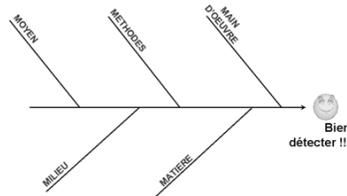


04/10/2012

16

3- Les facteurs influents

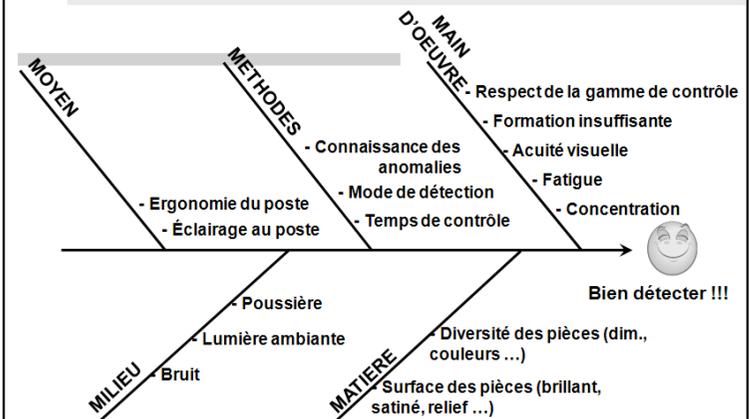
- Quels sont les facteurs influents sur l'efficacité de la détection ?



04/10/2012

17

3- Les facteurs influents



04/10/2012

18

4- Les solutions mises en place

- Éclairage

Les avantages des nouveaux éclairages :

1. Font ressortir les défauts
2. N'éblouissent pas
3. Ne fatiguent pas les yeux
4. Respectent les couleurs



04/10/2012

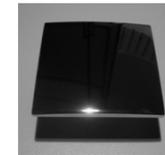
19

4- Les solutions mises en place

Les effets lumière : cela consiste à faire « miroiter » la lumière sur les pièces car certains défauts n'apparaissent que sous un angle particulier, par rapport à la lumière. Par exemple tout le monde connaît les effets de la lumière rasante. Evident mais encore mieux si on comprend comment ça marche.



Effet brillance



Effet lumière noire



Effet miroir

Dans la mesure du possible, jouez avec les effets lumière !

04/10/2012

20

4- Les solutions mises en place

● Gamme de contrôles

1. On sait ce qu'on doit contrôler
2. Les temps de contrôle sont validés et font partie des temps de production
3. On sait comment on doit contrôler
4. Elles comportent des visuels standardisés
5. Elles sont claires

04/10/2012

21

4- Les solutions mises en place

● Gamme de contrôles

The diagram shows a control process with three callouts:

- Anomalie ciblée**: Points to a specific control point in the process.
- Temps indicatif**: Points to a control point with a '2s' indicator.
- Parcours des yeux**: Points to a control point with a '100%' indicator.

The diagram also shows a control point with a '1' indicator and the text 'Libérez d'écarts sur la contenance'.

04/10/2012

22

4- Les solutions mises en place

Illustration de l'intérêt d'avoir des critères de contrôle

Combien de passes va se faire l'équipe des blancs ?



Y a-t'il un intrus dans le jeu ?

04/10/2012

23

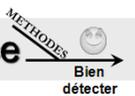
4- Les solutions mises en place

● Une gamme de contrôle pour mieux détecter, EXCELLENT !!!

- A condition toutefois :
 - De SAVOIR l'appliquer
 - De VOULOIR l'appliquer

04/10/2012

24

4- Les solutions mises en place 

- 4 vidéos pour illustrer le respect de la gamme de contrôle

1

2

3

4

04/10/2012 25

4- Les solutions mises en place 

- Comment mieux respecter les gammes de contrôles ?

Fatigue physique

Formation

Expérience

L'entreprise peut agir



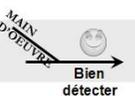
Acuité visuelle

Motivation

Concentration

Vous pouvez agir

04/10/2012 26

Motivation 

Effort



Exemple : perçage

Effort

OUI

NON

Est-ce que mon travail se voit ?



Contrôle Visuel

OUI

NON

04/10/2012 27

Motivation

Mon travail est important !



Contrôle Visuel

Faux

Je n'ajoute rien au produit !

Pour l'organisation de l'entreprise et de la production !

Pour le respect de mes collègues

04/10/2012 28

4- Les solutions mises en place

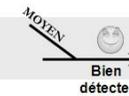
- Formations qualité

- Formation qualité produit
- Formation aux gammes de contrôle
- Formation aux contrôles visuels

04/10/2012

29

Moyens



04/10/2012
Système d'éclairage adapté

Gamme de contrôle accessible

Poste adapté

04/10/2012

30

Exercice pratique

Contrôler les pièces mises à disposition !

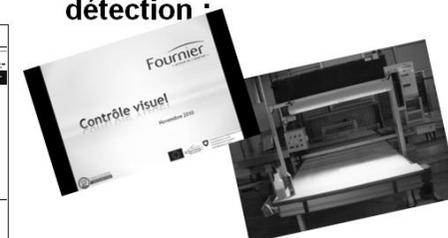
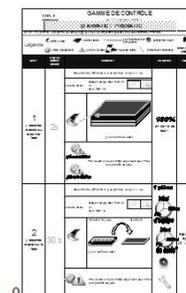


04/10/2012

31

Conclusion

Le contrôle visuel, en particulier la détection, requiert une véritable expertise... c'est un métier ! Nous avons mis en place des outils pour améliorer la détection :



04/10/2012

32

ANNEXE 4

RÉSEAUX DE NEURONES

Cette annexe a pour objectif de montrer les modèles de réseaux de neurones (de façon plus détaillée le modèle supervisé) et l'algorithme de rétro-propagation utilisé.

1. LES MODÈLES D'APPRENTISSAGE

Un réseau de neurones se présente, comme l'illustre la Figure A4.1, comme un ensemble de couches de neurones avec :

- une couche d'entrée,
- une à plusieurs couches intermédiaires, encore appelées couches cachées,
- une couche de sortie.

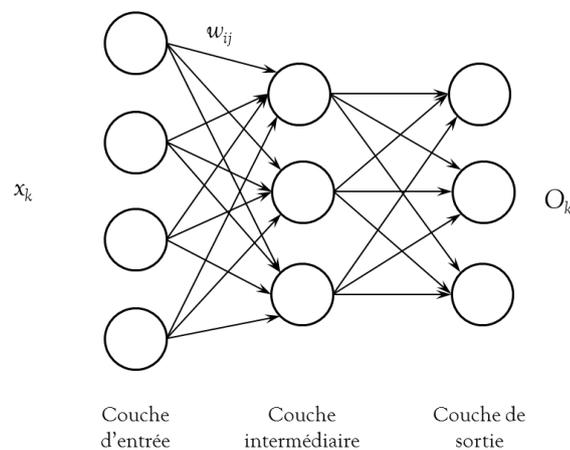


Figure A4.1 Exemple d'un réseau de neurones

Des connexions s'établissent entre chaque neurones d'une couche aux autres neurones de la couche suivante (il n'existe pas de connexions entre neurones situées sur une même couche).

La construction d'un réseau de neurones peut s'effectuer selon trois modes :

- un mode non supervisé : à partir d'un ensemble d'exemples d'entrées x , un algorithme trouve l'ensemble des poids w_{ij} tels que les entrées x soient correctement groupés selon la fonction f .

- un mode semi supervisé : à partir d'un ensemble d'exemples d'entrées x , un algorithme trouve l'ensemble des poids w_{ij} à partir des indications (vrai ou faux) qui lui sont fournies sur les résultats y obtenus.
- un mode supervisé : à partir d'un ensemble d'exemples d'entrées x et de résultats y , un algorithme trouve l'ensemble des poids w_{ij} des connexions tels que $y = f(x)$ avec une bonne généralisation.

Nous avons utilisé le mode supervisé pour trouver le modèle de la démarche de raisonnement des experts, car nous avons les entrées (valeurs d'évaluation) et les sorties (les décisions sur l'acceptation de l'anomalie).

2. MODE SUPERVISÉ

Si on considère un réseau de neurones avec une couche d'entrée comportant n_e neurones, une couche cachée de n_c neurones et une couche de sortie ayant n_s neurones.

Le réseau est supervisé à l'aide d'un ensemble de N_k exemples d'apprentissage noté $\{(x_1, o_1), (x_2, o_2), \dots, (x_k, o_k)\}$ avec :

x_k : vecteur de n_e éléments représentant l'ensemble des entrées du $k^{\text{ième}}$ exemple à apprendre parmi les N_k .

t_k : vecteur de n_s éléments représentant l'ensemble des sorties théoriques pour l'entrée x_k (les valeurs que le réseau doit apprendre).

o_k : vecteur de n_c éléments représentant l'ensemble des sorties calculées pour le $k^{\text{ième}}$ exemple.

Chaque neurone j d'une couche du réseau est ainsi connecté à tous les neurones de la couche suivante et produit une réponse sur chaque neurone i de la couche suivante. Cette réponse, qui va constituer une entrée pour le neurone i , est obtenue en calculant la somme pondérée des sorties o_j des neurones de la couche précédente. Cette somme est ensuite transformée par une fonction de transfert f .

$$o_i = f\left(\sum_j w_{ij} o_j - \theta_j\right)$$

avec :

w_{ij} : poids de la connexion entre le neurone i et le neurone j

o_i : sortie du neurone i

o_j : sortie du neurone j

θ_i : seuil du neurone i

Le plus souvent, la fonction de transfert sert à introduire une non-linéarité dans le fonctionnement du neurone. Elle présente généralement trois intervalles : un intervalle en deà duquel le neurone est non actif, un intervalle de transition et un intervalle au-delà duquel le neurone est actif. La fonction de Heaviside et la fonction Sigmoidé sont les deux fonctions les plus utilisées.

La fonction de Heaviside (Figure A4.2) est définie par :

$$\forall x \in \mathbb{R}, f(x) = 1 \text{ si } x \geq 0$$

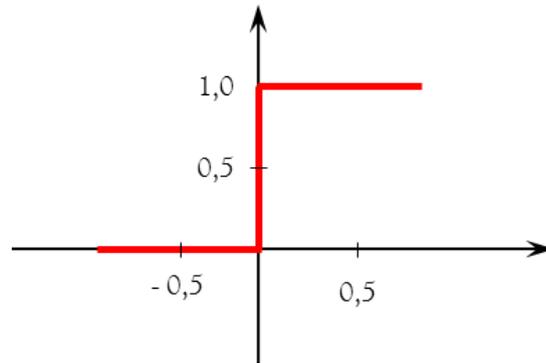


Figure A4.2 Fonction Heaviside

La fonction de sigmoïde (Figure A4.3) est définie par :

$$\forall x \in \mathbb{R}, f(x) = \frac{1}{1 + e^{-kx}}$$

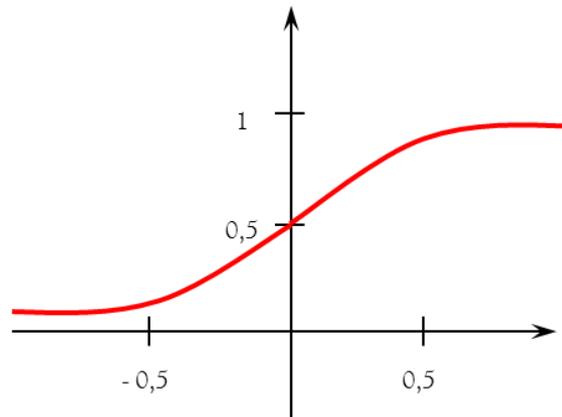


Figure A4.3 Fonction sigmoïde ($k=5$)

La fonction Sigmoidé présente l'avantage de retourner des valeurs intermédiaires (des réels compris entre 0 et 1) par opposition à la fonction de Heaviside qui ne retourne que la valeur 0 ou la valeur 1. Elle présente également l'avantage d'être dérivable.

Dans le cas d'un apprentissage supervisé, la méthode dite de rétro-propagation de l'erreur est généralement utilisée. Elle permet de calculer les poids des connexions entre les neurones de manière à minimiser l'erreur entre la sortie théorique et la sortie calculée.

Pour chaque exemple, il s'agit de minimiser l'erreur quadratique Q avec :

$$Q = \frac{1}{2} \sum_i (o_i - t_i)^2$$

avec :

o_i : la sortie calculée

t_i : la sortie théorique.

La méthode du gradient consiste à faire évoluer les poids w_{ij} dans la direction inverse de celle du gradient.

$$\Delta w_{i,j} = -n * \frac{\delta Q}{\delta w_{i,j}}$$

avec :

n : la constante réelle d'apprentissage ($n \in \mathbb{R}$ et $0 \leq n \leq 1$)

La sortie o_i du neurone i est égale à :

$$o_i = f(e_i)$$

avec :

f : la fonction de transfert

e_i : l'entrée du neurone i .

L'entrée e_i du neurone i est égale à :

$$e_i = \sum_j w_{i,j} * o_j$$

avec :

$w_{i,j}$: le poids entre le neurone j (couche précédente) et le neurone i .

$$\begin{aligned} \Delta w_{i,j} &= -n * \frac{\delta Q}{\delta w_{i,j}} \\ &= -n * \frac{\delta Q}{\delta o_i} * \frac{\delta o_i}{\delta e_i} * \frac{\delta e_i}{\delta w_{i,j}} \\ &= -n * \frac{\delta Q}{\delta o_i} * \frac{\delta o_i}{\delta e_i} * \frac{\delta}{\delta w_{i,j}} \sum_k w_{i,k} * o_k \end{aligned}$$

$$= -n * \frac{\delta Q}{\delta o_i} * \frac{\delta o_i}{\delta e_i} * o_j$$

$$\text{(car } -n * \frac{\delta Q}{\delta o_i} * \frac{\delta w_{i,j}}{\delta w_{i,k}} = 0 \text{ si } k \neq j \text{)}$$

La correction du poids s'effectue donc avec :

$$\Delta w_{i,j} = -n * d_i * o_j$$

avec :

$$d_i = -\frac{\delta Q}{\delta o_i} * \frac{\delta o_i}{\delta e_i}$$

Le calcul du signal d'erreur d_i s'effectue de deux façons selon que le neurone i se trouve sur la couche de sortie ou sur une couche cachée.

Sur la couche de sortie :

$$\begin{aligned} \frac{\delta Q}{\delta o_i} &= \frac{\partial}{\partial o_i} \frac{1}{2} \sum_j (t_j - o_j)^2 \\ &= -1 * (t_i - o_i) \end{aligned}$$

$$\text{(car } \frac{\delta}{\delta o_i} * (t_j - o_j)^2 = 0 \text{ si } j \neq i \text{)}$$

D'où :

$$\begin{aligned} d_i &= (t_i - o_i) * \frac{\delta o_i}{\delta e_i} \\ &= (t_i - o_i) * \frac{f(e_i)}{\delta e_i} \\ &= (t_i - o_i) * f'(e_i) \end{aligned}$$

Sur une couche cachée :

$$\begin{aligned} \frac{\delta Q}{\delta o_i} &= \sum_k \frac{\delta Q}{\delta o_k} * \frac{\delta o_k}{\delta o_i} \\ &= \sum_k \frac{\delta Q}{\delta o_k} * \frac{\delta o_k}{\delta e_k} * \frac{\delta e_k}{\delta o_i} \\ &= \sum_k \frac{\delta Q}{\delta o_k} * \frac{\delta o_k}{\delta e_k} * \frac{\delta}{\delta o_i} \sum_i o_i * w_{ki} \\ &= \sum_k \frac{\delta Q}{\delta o_k} * \frac{\delta o_k}{\delta e_k} * w_{ki} \end{aligned}$$

$$= \sum_k -d_k * w_{ki}$$

D'où : $d_i = -\frac{\delta Q}{\delta o_i} * \frac{\delta o_i}{\delta e_i}$

$$\begin{aligned} &= \left(\sum_k d_k * w_{ki} \right) * \frac{\delta o_i}{\delta e_i} \\ &= \left(\sum_k d_k * w_{ki} \right) * \frac{f(e_i)}{\delta e_i} \\ &= \left(\sum_k d_k * w_{ki} \right) * f'(e_i) \end{aligned}$$

La fonction sigmoïde présente l'avantage d'être facilement dérivable. En effet :

$$\begin{aligned} f'(x) &= \left(\frac{1}{1 + \exp -k * x} \right)' \\ &= -\frac{k * \exp(-k * x)}{(1 + \exp -k * x)^2} \\ &= -\frac{k * (1 + k * \exp -k * x - 1)}{(1 + \exp -k * x)^2} \\ &= \frac{k}{1 + \exp(-k * x)} * \left(\frac{1 + \exp -k * x}{1 + \exp -k * x} - \frac{1}{1 + \exp -k * x} \right) \\ &= k * f * x * (1 - f * x) \end{aligned}$$

Soit, dans le cas k=1 :

$$f'(x) = f * x * (1 - f * x)$$

Sur la couche de sortie, on a donc :

$$\begin{aligned} d_i &= (t_i - o_i) * f'(e_i) \\ &= (t_i - o_i) * o_i * (1 - o_i) \end{aligned}$$

Sur une couche cachée, on a donc :

$$\begin{aligned} d_i &= \left(\sum_k d_k * w_{ki} \right) * f'(e_i) \\ &= \left(\sum_k d_k * w_{ki} \right) * o_i * (1 - o_i) \end{aligned}$$

3. ALGORITHME DE RÉTRO-PROPAGATION

Les poids w_{ij} du réseau de neurones sont initialisés avec des valeurs aléatoires.

On utilise un ensemble de N_k exemples $\{(x_1, t_1), (x_2, t_2), \dots, (x_k, t_k)\}$ qui vont permettre l'apprentissage du réseau, avec :

x_k : vecteur représentant l'ensemble des entrées du $k^{\text{ième}}$ exemple à apprendre

t_k : vecteur représentant l'ensemble des sorties théoriques pour l'entrée x_k (les valeurs que le réseau doit apprendre)

On propage le signal de la couche d'entrée du réseau jusqu'à la couche de sortie pour chacun des exemples. Cette propagation se fait à l'aide de la fonction sigmoïde. On obtient un ensemble $\{(x_1, o_1), (x_2, o_2), \dots, (x_k, o_k)\}$ avec :

o_k : vecteur représentant l'ensemble des sorties calculées pour l'entrée x_k

On calcule alors les erreurs entre les sorties calculées et les sorties théoriques pour chaque exemple.

Pour chaque exemple, et pour chaque exemple i de la couche de sortie, on calcule l'erreur Q , avec :

$$Q = \frac{1}{2} \sum_i (o_i - t_i)^2$$

avec :

o_i : la sortie calculée pour le neurone i

t_i : la sortie théorique pour le neurone i

On calcule le signal d'erreur d_i de la couche de sortie :

$$d_i = (t_i - o_i) * o_i * (1 - o_i)$$

On calcule le signal d'erreur d_i de la couche de sortie :

$$d_i = (t_i - o_i) * o_i * (1 - o_i)$$

On calcule le signal d'erreur d_i de chaque couche intermédiaire (d_k représentant le signal d'erreur de la couche suivante)

$$d_i = \left(\sum_k d_k * w_{ki} \right) * o_i * (1 - o_i)$$

On propage l'erreur vers les couches en modifiant les poids selon la formule :

$$w_{i,j} = w_{i,j} - \Delta w_{i,j}$$

$$= w_{i,j} + n * d_i * o_j$$

$$= w_{i,j} + d_i * o_j$$

(avec $n=1$ comme constante d'apprentissage)

ANNEXE 5

RÉSEAU DE NEURONES DONNÉES – S.T. DUPONT

Cette annexe présente les données utilisées lors de la modélisation de la démarche de raisonnement, sur l'acceptation d'anomalies, des experts, chez S.T. Dupont.

1. CRÉATION DU MODÈLE DE CORRÉLATION

Le Tableau A5.1 donne les valeurs d'évaluation de chaque attribut et la décision prise par les experts sur l'acceptation des anomalies. Pour la modélisation, nous avons utilisé 4 valeurs possibles pour la décision (C = 1 ; C? = 2 ; NC? = 3 et NC =4). Cependant, pour la comparaison entre les résultats fournis par le réseau et les décisions des experts, nous avons utilisé seulement 2 niveaux (C et NC). Ces données ont été utilisées dans l'apprentissage du réseau.

Le Tableau A5.1, présente également, dans la colonne « RN », les résultats obtenus par réseau de neurones.

Tableau A5.1 Données pour la modélisation – S.T. Dupont

n	E.L	F	T	C. F	C. C	P	Experts	RN
							C/NC	C/NC
1	3	2	3	-1	1	3	C?	C
2	4	1	3	-1	2	3	C?	C
3	3	1	1	0	2	4	C	C
4	3	1	3	1	1	2	NC	NC
5	3	1	2	0	2	3	C?	C
6	4	1	2	1	1	3	NC	NC
7	2	2	1	1	1	2	C	C
8	3	1	3	0	0	4	NC	NC
9	4	1	2	-1	2	4	NC	NC
10	4	1	0	1	2	4	C?	C
11	3	2	0	1	1	4	C?	C
12	2	2	0	1	0	3	C?	C
13	3	2	3	1	2	2	NC	NC
14	2	2	0	1	1	3	C?	C
15	2	1	2	-1	0	4	C?	C

16	3	1	1	-1	2	4	NC	NC
17	3	1	2	1	1	2	NC	NC
18	3	2	3	1	2	2	NC	NC
19	4	2	3	1	1	1	NC	NC
20	3	2	1	1	1	4	NC	NC
21	3	2	3	1	2	2	NC	NC
22	2	1	3	0	0	4	C?	C
23	2	1	3	0	0	4	C?	C
24	3	2	3	0	2	3	NC	NC
25	3	1	3	0	2	4	NC	NC
26	4	2	1	0	1	4	C?	C
27	2	2	2	0	0	4	C?	C
28	3	1	2	0	1	4	C?	C
29	3	2	3	1	2	2	NC	NC
30	3	1	1	1	2	1	C?	C
31	3	1	0	1	1	4	C?	C
32	3	1	0	1	2	3	C?	C
33	4	1	0	1	2	3	C?	C
34	4	1	0	1	2	2	C?	C
35	2	2	1	1	1	4	C?	C
36	3	2	0	1	1	2	C?	C
37	3	2	3	1	1	3	NC	NC
38	4	2	2	1	2	2	NC	NC
39	3	2	2	1	2	4	C?	C
40	4	1	3	0	0	3	NC	NC
41	4	2	2	1	2	4	NC	NC
42	3	1	3	1	0	3	NC?	NC
43	3	1	1	0	2	3	C	C
44	3	1	2	0	2	2	C?	C
45	4	1	1	-1	2	2	C?	C
46	3	1	2	-1	2	3	C?	C
47	4	1	3	1	2	2	NC?	NC
48	2	2	1	0	2	4	C?	C
49	2	1	0	-1	0	1	C	C
50	2	1	0	-1	0	2	C	C
51	2	1	0	-1	0	3	C	C
52	2	1	0	-1	0	4	C	C
53	2	2	0	-1	0	1	C	C
54	2	2	0	-1	0	2	C	C
55	2	2	0	-1	0	3	C	C
56	2	1	0	-1	1	1	C	C
57	2	1	0	-1	1	2	C	C
58	2	2	0	-1	1	1	C	C
59	2	2	0	-1	1	2	C	C
60	3	1	0	-1	0	1	C	C
61	3	1	0	-1	0	2	C	C
62	3	2	0	-1	0	1	C	C
63	3	2	0	-1	0	2	C	C
64	3	1	0	0	0	1	C	C
65	3	1	0	0	0	2	C	C
66	3	2	0	0	0	1	C	C
67	3	2	0	0	0	2	C	C

68	4	2	3	1	2	1	NC	NC
69	4	2	3	1	2	2	NC	NC
70	4	2	3	1	2	3	NC	NC
71	4	2	3	1	2	4	NC	NC
72	4	1	3	1	2	3	NC	NC
73	4	1	3	1	2	4	NC	NC
74	3	2	2	-1	2	3	NC?	NC
75	3	2	0	-1	1	4	C?	C
76	4	1	3	1	1	2	C?	NC
77	3	1	1	-1	2	3	C	C
78	4	1	1	0	2	3	C	C
79	4	1	1	1	2	2	C?	C
80	4	1	2	1	1	1	C	NC
81	2	2	3	1	0	4	C?	C
82	4	1	0	1	2	3	C	C
83	3	1	2	1	1	3	NC?	NC
84	4	1	3	1	2	1	NC	NC
85	3	2	2	1	2	3	NC	NC
86	3	1	1	0	2	3	C?	C
87	3	1	1	1	1	4	C?	C
88	4	1	0	1	2	3	C?	C
89	3	1	3	1	1	1	C	NC
90	3	2	3	1	2	2	NC	NC
91	3	2	2	-1	1	3	C	C
92	4	2	3	1	1	3	NC?	NC
93	4	1	2	1	2	4	NC	NC
94	3	1	1	1	2	3	C?	C
95	3	2	1	1	1	4	NC?	NC
96	3	1	3	-1	2	4	NC	NC
97	4	2	3	1	1	4	NC?	NC
98	4	2	2	1	1	4	NC	NC
99	4	1	1	1	2	4	NC	C
100	4	2	2	1	1	4	NC	NC
101	3	2	2	1	0	4	NC?	NC
102	2	1	3	1	0	2	C?	C
103	4	2	1	1	2	2	NC?	NC
104	4	2	0	1	1	1	C	C
105	2	1	1	0	1	4	C?	C
106	4	1	3	-1	2	3	C	C
107	3	2	3	0	0	2	C	C
108	4	2	1	1	1	1	NC?	C
109	4	2	1	1	1	4	C	NC
110	3	1	3	-1	1	4	C?	C
111	3	2	1	-1	1	1	C?	C
112	4	2	2	-1	2	2	NC?	NC
113	4	1	0	1	2	3	C?	C
114	4	1	1	1	1	3	C	C
115	4	1	2	1	2	4	NC	NC
116	3	2	1	0	1	2	C	C
117	2	1	0	1	1	4	C	C
118	3	2	3	1	0	2	NC	NC
119	4	1	3	1	2	1	NC?	NC

120	4	2	2	1	2	2	NC	NC
121	4	1	2	1	2	4	NC	NC
122	3	1	0	1	2	4	NC	C

Le Tableau A5.2 donne les valeurs de coefficients du modèle généré par le réseau de neurones.

Tableau A5.2 Coefficient du modèle – Réseau de neurones

De la 1 ^{ère} à la 2 ^{ème} couche	De la 2 ^{ème} à la 3 ^{ème} couche	De la 3 ^{ème} à la 4 ^{ème} couche
-7,8028	4,8405	9,1343
1,8274	-12,2748	-1,3941
-5,9371	-17,4535	-1,3501
1,6440	-23,4380	1,4971
13,4914	-20,8131	
-6,5481	17,8737	
5,7148	8,8514	
-8,6061	-3,4088	
-0,8080	5,5527	
0,3937	0,3167	
-4,0217	-3,2434	
-5,9524	-0,4289	
-7,0463	-12,8888	
7,3891	2,5660	
-7,3746	0,4775	
-14,5834	17,0258	
12,6541	6,2737	
7,3619	1,3594	
-2,3879	-1,7710	
-0,3226	1,3623	
-1,2478	6,9836	
-1,0395	-12,3864	
1,7892	3,2290	
-0,7424	-1,8224	
0,4483		
7,1072		
-7,9694		
8,3390		
-4,7836		
-8,7343		
10,7872		
19,1755		
2,1442		
-7,7572		
-7,9206		
-14,8266		

2. TEST DU MODÈLE

Le Tableau A5.3 donne les valeurs d'évaluation de chaque attribut et la décision prise par les experts sur l'acceptation des anomalies. La colonne « RN » donne les résultats fournis par le modèle (ces résultats sont obtenus à partir des données d'évaluation), ce qui permet la comparaison avec les décisions des experts.

Tableau A5.3 Données pour le test du réseau - S.T. Dupont

n	E.L	F	T	C. F	C. C	P	Experts C/NC	RN C/NC
1	3	1	1	1	2	2	C	C
2	3	1	1	1	3	2	C	C
3	4	0	3	1	4	2	NC	C
4	3	1	0	2	3	2	C	C
5	2	0	3	0	2	2	C	C
6	3	0	0	2	3	2	C	C
7	3	-1	3	1	2	1	C	C
8	4	-1	3	1	4	2	C	C
9	4	1	1	2	3	2	C	C
10	3	-1	3	1	2	2	NC	NC
11	3	1	1	0	2	2	C	NC
12	3	-1	0	2	3	1	NC	C
13	4	1	1	1	3	2	C	NC
14	4	1	2	2	1	1	C	C
15	3	1	1	2	4	1	C	C

Résumé

L'apparence d'un produit joue un rôle important dans la perception de sa qualité par le client. Au-delà des fonctionnalités qu'il doit remplir, un produit doit désormais avoir un aspect irréprochable. Il n'y a cependant pas de surface parfaite car, à un niveau de grossissement donné, un écart par rapport à une surface idéale peut toujours être identifié. Pour détecter cet écart et évaluer son impact sur la qualité perçue du produit, les entreprises mettent généralement en place un contrôle visuel d'aspect de surface de leurs produits.

Une première thèse a été réalisée au Laboratoire SYMME afin de proposer une méthodologie permettant de réduire la variabilité généralement observée sur les résultats de ce type de contrôle. Nos travaux se situent dans la continuité de ces travaux avec l'objectif de proposer des méthodes et des outils pour la maîtrise des trois étapes d'un contrôle visuel d'aspect : exploration, évaluation et décision.

Le projet de thèse réalisé dans le cadre d'un programme européen de recherche INTERREG IV réunissait différentes Universités et Entreprises. Les pratiques des entreprises partenaires ont procurés un terrain d'expérimentation des recherches proposées. Partant de cette observation, nous avons proposé une conceptualisation du contrôle visuel humain débouchant sur des propositions de méthodes et outils adaptés aux trois étapes. Ces propositions ont été testées dans les entreprises partenaires pour vérifier leur robustesse à la variété des situations industriels. Nous avons par exemple proposé un nouveau test R2&E2 Conformité qui mesure la variabilité d'un contrôle visuel et contribue à l'identification des sources possibles de cette variabilité.

Outre cette conceptualisation pour la création d'outils, nous listons un ensemble de recommandations à suivre par les entreprises pour une meilleure exploration des anomalies. Nous proposons également un ensemble d'attributs sensoriels permettant de caractériser, en vue de l'évaluer, toute anomalie d'aspect. Enfin, nous montrons comment, en formalisant le processus d'expertise, un contrôleur peut évaluer une anomalie d'aspect et juger de son impact sur la qualité perçue du produit.

Mots clés : Contrôle visuel, qualité perçue, aspect de surface

Abstract

The product appearance plays an important role in the perception of quality by the customer. Beyond the features that must be satisfied, now a product must have a flawless appearance. However, there is no perfect surface, because a given level of magnification, a deviation from an ideal surface can always be identified. To detect this deviation and assess its impact on perceived product quality, companies usually set up a visual inspection of the surface appearance of their products.

A first PhD thesis was carried out at the Laboratoire SYMME to propose a methodology to reduce the variability generally observed on the results of this type of inspection. Our work is in the continuity of this thesis with the aim to propose methods and tools for the control of three stages of visual inspection of surface appearance: exploration, evaluation and decision.

The thesis project carried out under of a European research program INTERREG IV brought together different Universities and Companies. The practices of corporate partners have brought a testing field for the proposed researches. Based on this observation, we proposed a conceptualization of human visual inspection leading to proposals for methods and tools adapted to the three stages. These proposals were tested in the partner companies to verify their robustness to a variety of industrial situations. For example, we proposed a new test R2&E2 Compliance which measures the variability of a visual inspection and helps to identify possible sources of this variability.

In addition to this conceptualization for the development of tools, we list a set of recommendations to be followed by companies for a better exploration of anomalies. We also propose a set of sensory attributes to characterize, with a view to evaluate any anomaly appearance. Finally, we show how to formalize the expertise process, to allow the inspector to evaluate an anomaly appearance and to judge its impact on the perceived quality of the product.

Key words: Visual inspection, perceived quality, surface appearance