



Identification, formalisation et déploiement des bonnes pratiques industrielles

Jean-Luc Maire

► To cite this version:

Jean-Luc Maire. Identification, formalisation et déploiement des bonnes pratiques industrielles . Autre. ComUE Grenoble-Alpes, 2018. tel-01727776

HAL Id: tel-01727776

<https://hal.science/tel-01727776v1>

Submitted on 9 Mar 2018

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

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



Ecole Doctorale SISEO
DRED - 27 rue Marcoz - B.P. 110
73011 Chambéry Cedex

Habilitation à Diriger des Recherches

Identification, formalisation et déploiement des bonnes pratiques industrielles

Application au Benchmarking et au Contrôle sensoriel de la Qualité

Jean-Luc MAIRE

UNIVERSITE SAVOIE MONT BLANC
jean-luc.maire@univ-smb.fr

Soutenue le **7 mars 2018**

Devant le jury composé de :

Zohra CHERFI, Professeur des Universités, UTC, Rapporteur
Laurent GENESTE, Professeur des Universités, ENIT, Rapporteur
Samir LAMOURI, Professeur des Universités, Arts et Métiers ParisTech, Rapporteur
Yannick FREIN, Professeur des Universités, INP Grenoble, Président
Laurent TABOUROT, Professeur des Universités, Université Savoie Mont Blanc
Maurice PILLET, Professeur des Universités, Université Savoie Mont Blanc

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	6
-----------------------------------	----------

DOSSIER ADMINISTRATIF	9
------------------------------------	----------

I. Curriculum Vitae	9
----------------------------------	----------

II. Publications	11
-------------------------------	-----------

1. Revues internationales.....	11
2. Revues francophones	12
3. Chapitres d'ouvrage	13
4. Congrès internationaux	13
5. Congrès francophones.....	14

III. Encadrements	16
--------------------------------	-----------

1. Co-Encadrements de doctorants (thèses en cours).....	16
2. Co-Encadrements de doctorants (thèses soutenues).....	17

IV. Rayonnement scientifique et Responsabilités Collectives.....	19
---	-----------

1. Pilotage et/ou participation à des programmes de recherche	19
2. Responsabilités en recherche.....	22

V. Activités d'Enseignement	24
--	-----------

1. Liste des modules enseignés	24
2. Responsabilités en enseignement.....	24
3. Autres Responsabilités.....	25

ACTIVITES DE RECHERCHE	27
-------------------------------------	-----------

I. Introduction	27
------------------------------	-----------

II. Présentation synthétique des résultats	30
---	-----------

III. Resultats de recherche en Benchmarking	33
--	-----------

1. A l'origine de nos travaux sur le Benchmarking	33
2. Présentation des résultats	34
2.1. Définition du benchmarking	35
2.2. Le benchmarking coopératif : un nouveau type de benchmarking.....	36
2.3. De nouveaux outils et méthodes pour le benchmarking.....	37
2.3.1. Méthode proposée pour la phase 1: diagnostic de la performance de l'entreprise.....	38
2.3.2. Méthode proposée pour la phase 2: choix de l'élément à benchmarker et du partenaire	45
2.3.3. Méthode proposée pour la phase 3 : identification des écarts entre partenaires	45
2.4. Description et de comparaison des bonnes pratiques pour un benchmarking.....	46
2.4.1. Proposition d'une définition d'une « Bonne pratique »	47
2.4.2. Proposition d'un modèle de description d'une « Bonne pratique »	49
2.4.3. Proposition d'une méthode de comparaison des « Bonnes pratiques ».....	51
3. Bilan de mes travaux sur le benchmarking	52
Références.....	52

IV. Résultats de Recherche sur le Contrôle Visuel	54
1. A l'origine de mes travaux	54
2. Présentation des résultats	55
2.1. Problématique du contrôle visuel	55
2.2. Un test R^2E^2 pour mesurer la variabilité des résultats d'un contrôle visuel	56
2.3. Méthode d'exploration des anomalies	60
2.3.1. Classification des anomalies d'aspect	60
2.3.2. Formalisation de la méthode d'exploration	61
2.3.3. Caractérisation d'une anomalie	62
2.4. Méthode d'évaluation des anomalies	64
2.4.1. Cas d'une relation linéaire entre les attributs de l'anomalie et le résultat du contrôle.....	64
2.4.2. Cas d'une relation non linéaire entre les attributs de l'anomalie et le résultat du contrôle.....	64
2.4.3. Formalisation de l'expertise d'évaluation.....	66
3. Bilan de mes travaux sur le contrôle visuel.....	67
Références.....	67
V. Resultats de Recherche sur le Contrôle Haptique.....	69
1. A l'origine de mes travaux	69
2. Présentation des résultats	70
2.1. De sensation(s) à perception.....	70
2.2. Une liste des sensations élémentaires et de leurs descripteurs.....	71
2.2.1. Une approche utilisant les liens entre stimuli et descripteurs.....	74
2.2.2. Une approche utilisant les relations sémantiques entre descripteurs.....	75
2.2.3. Une approche utilisant la logique floue	75
2.3. Modes d'exploration des sensations élémentaires.....	76
2.3.1. Récepteurs sensoriels tactiles	76
2.3.2. Modes d'exploration tactile.....	77
2.3.3. Liens entre sensations élémentaires, récepteurs sensoriels, modes et zones d'exploration	77
2.4. Représentation par ontologies.....	78
3. Bilan de mes travaux sur le contrôle haptique	81
Références.....	82
VI. Conclusion et Perspectives de recherche	83
1. Formalisation des bonnes pratiques pour le benchmarking	83
1.1. Un nouvel état des lieux du benchmarking à réaliser	83
1.2. Les ontologies pour formaliser une bonne pratique.....	85
1.3. Les outils collaboratifs au service du benchmarking.....	85
2. Une orientation des recherches sur la Qualité Sensorielle	87
2.1. Suite Contrôle haptique	87
2.2. Lien visuel / haptique.....	87
2.3. Vision pour le toucher	87
2.4. Vers une mesure de qualité sensorielle.....	88
Annexes	90

INTRODUCTION GENERALE

Ce document résume mon parcours d'enseignant-chercheur et évoque les probables orientations de mes recherches.

Ce parcours débute en 1992 à l'IUT d'Annecy où je suis nommé maître de conférences dans le département Organisation et Génie de la Production (OGP). J'effectue mes recherches dans le Laboratoire de Logiciels pour la Productique (LLP) où ma thèse s'est déroulée (diagnostic de la performance d'une entreprise via la modélisation de son système d'information). Mes activités, en enseignement et en recherche, se situent d'abord principalement en informatique (modélisation et conception du système d'information) mais elles vont très vite évoluer vers le génie industriel (gestion de production et amélioration de la performance industrielle).

En 1995, je démarre ma recherche sur le benchmarking qui se positionne à l'époque comme une nouvelle méthode d'amélioration de la performance industrielle et comme une alternative aux méthodes traditionnelles d'amélioration continue. Avec le professeur Alain Haurat, nous développons cette nouvelle thématique de recherche au laboratoire LLP avec l'objectif de proposer des solutions aux entreprises pour les aider à réaliser un benchmarking. A partir de 1999, j'anime le club Benchmarking au Centre Productique Haute Savoie (CPHS), en collaboration avec le Mouvement Français pour la Qualité (MFQ) pour promouvoir la méthode auprès de plusieurs entreprises haut-savoyardes. De 1997 à 2000, je pilote un projet INTERREG accompagnant plusieurs entreprises françaises et suisses dans la réalisation de leurs benchmarkings.

En 2003, j'intègre le laboratoire Systèmes et Traitement de l'information (LISTIC), créé à la suite de la fusion du laboratoire LLP et du laboratoire LAMII, un autre laboratoire informatique de l'Université de Savoie. J'y poursuis mes travaux sur le benchmarking en axant mon travail sur l'identification, la représentation et le transfert des bonnes pratiques industrielles (« *best practices* »).

En 2005, je prends la responsabilité du département Qualité Logistique Industrielle et Organisation (QLIO, en remplacement de OGP) et je rejoins le laboratoire Systèmes et Matériaux pour la Mécatronique (SYMME) dans le groupe de compétences Qualité des Produits et des Procédés (QPS). J'oriente ma recherche dans le domaine de l'inspection visuelle des produits. L'objectif de notre équipe est d'identifier de bonnes pratiques contribuant à réduire la variabilité généralement observée dans les entreprises industrielles pour ce type de contrôle. Avec le professeur Maurice Pillet, nous animerons plusieurs projets de recherche sur le thème du contrôle visuel des produits (projets DASuVA puis MeSurA).

En 2008, je deviens le président de l'Assemblée des Chefs de Départements QLIO (PACD) et je participe dans la CPN à l'élaboration du nouveau programme pédagogique du DUT QLIO. A l'origine de la création du DUT QLIO par apprentissage orienté vers la gestion des entreprises artisanales (GAMA), j'en deviens également le responsable pédagogique.

En 2013, je prends la responsabilité et anime les activités du groupe Qualité des Produits et des Systèmes (QPS) au laboratoire SYMME.

En 2015, je démarre une nouvelle activité de recherche sur les pratiques utilisées en contrôle haptique des produits. Mes travaux, réalisés dans le cadre du projet FeLiCiTy, visent à développer des solutions pour les entreprises industrielles dans la construction d'un standard qualité pour le contrôle « par toucher dynamique » de leurs produits. Cette recherche s'inscrit dans le thème Inspection des produits de l'axe Production Industrielle du laboratoire SYMME.

Mon objectif est aujourd'hui, à partir des compétences acquises par le laboratoire dans les domaines du contrôle visuel et du contrôle haptique, de **développer de nouveaux projets de recherche dans le domaine plus large du contrôle sensoriel des produits.**

Ce dossier comprend trois parties :

- Une partie **DOSSIER ADMINISTRATIF** qui présente mon parcours professionnel, un état synthétique de mes activités en recherche (publications, co-encadrements, projets et responsabilités), de mes activités en enseignement (public et volume horaire, service actuel) et de mes responsabilités administratives (enseignement et recherche).
- Une partie **ACTIVITES DE RECHERCHE** qui décrit mes travaux, d'abord de manière synthétique, puis de manière plus détaillée dans les trois thèmes de recherche dans lesquels je me suis impliqué : benchmarking, contrôle visuel et contrôle haptique des produits. Les principaux résultats obtenus sont résumés et mon projet de recherche est présenté.
- Une partie **ANNEXES** reprend trois publications illustrant des résultats de mes activités de recherche : benchmarking, contrôle visuel et contrôle haptique.

Partie I
DOSSIER ADMINISTRATIF

DOSSIER ADMINISTRATIF

I. CURRICULUM VITAE

Jean-Luc Maire

né le 2 Décembre 1963 à Besançon (25)

Laboratoire SYMME – Systèmes et Matériaux pour la MEcatronique (EA 4144)

Université Savoie Mont Blanc, Polytech Annecy Chambéry

BP 80439 74944 Annecy le Vieux Cedex

jean-luc.maire@univ-smb.fr

+ 33.450.09.22.56

+ 33.450.09.65.38

Formation (compétences acquises)

1991 : **Doctorat en Informatique**, Univ. Savoie, LLP/CESALP, Annecy (modélisation du système d'information d'une entreprise manufacturière / diagnostic de la performance industrielle)

1988 : **DEA Automatique, Informatique et Robotique**, Univ. Franche Comté, Besançon (intelligence artificielle / génération de plans en robotique mobile)

1986 : **Maîtrise en informatique**, Univ. Franche Comté, Besançon (architecture, systèmes, réseaux, mathématiques et informatique)

1985 : **Licence en informatique**, Univ. Franche Comté, Besançon (statistiques et informatique, analyse de données)

1984 : **DUT en informatique**, Univ. Franche Comté, Belfort (analyse / programmation)

Parcours professionnel

Depuis 1992 : **Maître de Conférences** (HC depuis le 01/09/2009)

CPIM (Certified in Production and Inventory Management) / APICS

IUT Annecy – Département Qualité Logistique Industrielle et Organisation (QLIO)

Laboratoire LLP / Université de Savoie (jusqu'en 2003)

Laboratoire LISTIC / Univ. Savoie (de 2003 à 2006)

Laboratoire SYMME / USMB (depuis 2006)

1990-1991 : **ATER**, IUT Annecy / Laboratoire LLP/CESALP, Université de Savoie

Thèse soutenue le 23/12/1991, « **OLYMPIOS : un modèle de conception du système d'information d'une entreprise manufacturière – Application à l'audit** » (Direction Alain Haurat) à l'Université de Savoie

Rapporteurs : Colette Rolland (Univ. Paris I) et Alain Dussauchoy (Univ. Claude Bernard Lyon)

Encadrements doctorants

2 en cours : Bruno Albert (fin 2018) et Benoît Giraut (2018)

5 terminées : Nathalie Baudet (2012), Anne-Sophie Guerra (2008), Vincent Bronet (2006), Thierry Sibenbeborn (2005) et Gülçin Büyükozkhan (1999)

Projets de recherche

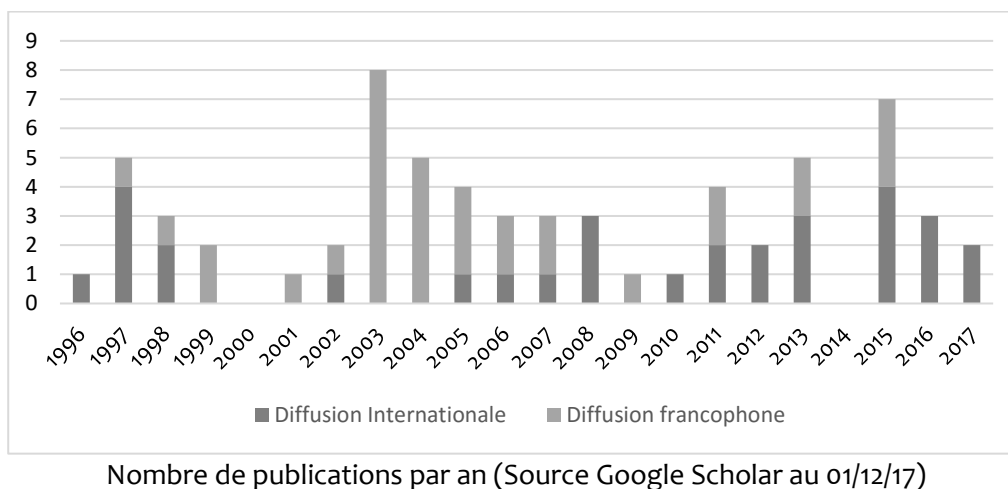
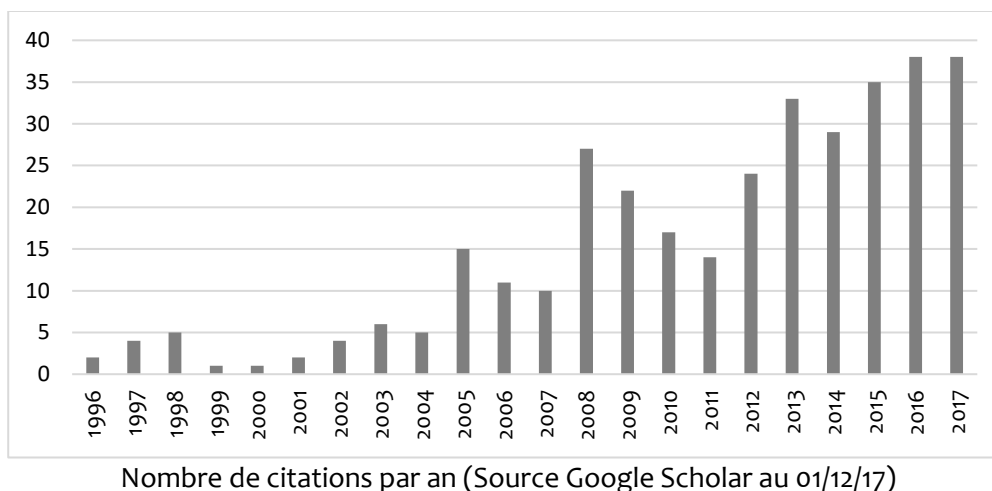
- 2015-2018 : **FeLiCiTy** (FormaLlisation Contrôle Tactile) / CIFRE (INEVA)
- 2014-2017 : **AdEQUATE** (Agilite et Efficience par la **QUALité** collaborativ**E**) / Collaboration avec industriels (Agilium, Allergan, Aventics et Fournier)
- 2012-2015 : **MeSURA** (**M**ea**S**uring **S**urface **A**pp**E**arance) / Collaboration avec industriel (OPTO) et centres techniques (CTDEC et CETEHOR)
- 2009-2012 : **DASuVA** (Défauts d'Aspect des **S**urfaces à forte **V**aleur **A**jsoutée) / **INTERREG IV** / Collaboration avec EPFL (laboratoire LPM) et industriels suisses et français (Audemars Piguet, Eudica, Fournier, MPS, NTN SNR et ST Dupont)
- 2005-2008 : **Métrologie sensorielle pour le contrôle visuel** / Collaboration avec industriel (Patek Philippe)
- 2003-2006 : **Benchmarking interne** / CIFRE (Tecumseh Europe)
- 2003-2004 : **Best Practices** / Collaboration avec CRISTO (Univ. Pierre Mendes France)
- 1997-2000 : **Benchmarking franco-suisse** / **INTERREG II** / Collaboration avec industriels et centres techniques (CIM Genève, CIM Vaud et CIMTEC)

Publications

- 12** articles dans des revues internationales
- 8** articles dans des revues nationales
- 1** chapitre d'ouvrage
- 18** communications dans des congrès à audience internationale
- 28** communications dans des congrès à audience francophone

II. PUBLICATIONS

Au démarrage de ma recherche, je publie essentiellement dans les congrès à diffusion internationale (PICMET, MSD, GMI, ...) ou à diffusion francophone (QUALITA, GI, CPI, ...) où la communauté des chercheurs en génie industriel est très présente. A partir de 2007, l'AERES préconisant aux laboratoires de publier dans des revues internationales, je réoriente mes publications vers des revues dédiées au benchmarking (BIJ) et/ou à l'amélioration de la qualité industrielle (TQM, IJQRM, IJPQM).



1. Revues internationales

- 1 Albert, B., Zanni-Merk C., de Bertrand de Beuvron, F., Maire, J.L., Pillet, M., Charrier, J., Knecht, C., 2017. A Smart System to Standardize the Specifications of Haptic Quality Control, *Procedia Computer Science*, 112, 2017, 723-730
Procedia Computer Science, CiteScore: 0.88, HighestCiteScore: 56%, CiteScoreRank: 83/191, Citations 2016: 5284, SNIP: 0.705, SJR: 0.267
- 2 Maire, J.L., Pillet, M., Baudet, N., 2016. Toward a better visual inspection of products. *The TQM Journal* 28 (3), 411-430.
The TQM Journal, CiteScore: 1.22, HighestCiteScore: 74%, CiteScoreRank: 50/194, Citations 2016: 186, SNIP: 0.925, SJR: 0.362
- 3 Maire, J.L., Pillet, M., Baudet, N., 2015. How to carry out visual inspection more efficiently and more effectively: the characterisation and evaluation of aesthetic anomalies. *International Journal of Productivity and Quality Management* 15 (4), 429-447.
International Journal of Productivity and Quality Management, CiteScore: 1.00, HighestCiteScore: 70%, CiteScoreRank: 58/196, Citations 2015: 150, SNIP: 0.739, SJR: 0.376

- 4 Maire, J.L., Pillet, M., Baudet, N., 2013. Gage R2&E2: an effective tool to improve the visual control of products. *International Journal of Quality & Reliability Management* 30 (2), 161–176.
International Journal of Productivity and Reliability Management, CiteScore: 1.40, HighestCiteScore: 81%, CiteScoreRank: 35/194, Citations 2016: 241, SNIP: 1.176, SJR: 0.477
- 5 Baudet, N., Maire, J.L., Pillet, M., 2013. The visual inspection of product surfaces. *Food Quality and Preference* 27 (2), 153–160.
Food Quality and Preferences, CiteScore: 4.21, HighestCiteScore: 94%, CiteScoreRank: 13/247, Citations 2016: 2055, SNIP: 1.703, SJR: 1.146
- 6 Pillet, M., Maire, J.L., 2013. Inertial Tolerancing and Acceptance Sampling. *International Journal of Engineering and Innovative Technology IJEIT* 2 (10), 265–271.
International Journal of Engineering and Innovative Technology, peer reviewed and referred open-access journal, Global impact and quality factor: 0.765 (source: globalimpactfactor.com)
- 7 Baudet, N., Pillet, M., Maire, J.L., 2011. Visual inspection of products: a comparison of the methods used to evaluate surface anomalies. *International Journal of Metrology and Quality Engineering* 2 (1), 31–38.
International Journal of Metrology and Quality Engineering, CiteScore: 0.52, HighestCiteScore: 40%, CiteScoreRank: 81/145, Citations 2016: 42, SNIP: 0.497, SJR: 0.246
- 8 Maire, J.L., Bronet, V., Pillet, M., 2008. Benchmarking: methods and tools for SME. *Benchmarking: An International Journal* 15 (6), 765–781.
Benchmarking: an international journal, CiteScore: 1.37, HighestCiteScore: 74%, CiteScoreRank: 79/309, Citations 2016: 224, SNIP: 0.929, SJR: 0.436
- 9 Pillet, M., Maire, J.L., 2008. How to sustain improvement at high level: Application in the field of statistical process control. *The TQM Journal* 20 (6), 570–587.
The TQM Journal, CiteScore: 1.22, HighestCiteScore: 74%, CiteScoreRank: 50/194, Citations 2016: 186, SNIP: 0.925, SJR: 0.362
- 10 Maire, J.L., Bronet, V., Pillet, M., 2005. A typology of “best practices” for a benchmarking process. *Benchmarking: An International Journal* 12 (1), 45–60.
Benchmarking: an international journal, CiteScore: 1.37, HighestCiteScore: 74%, CiteScoreRank: 79/309, Citations 2016: 224, SNIP: 0.929, SJR: 0.436
- 11 Maire, J.L., 2002. A model of characterization of the performance for a process of benchmarking. *Benchmarking: An International Journal* 9 (5), 506–520.
Benchmarking: an international journal, CiteScore: 1.37, HighestCiteScore: 74%, CiteScoreRank: 79/309, Citations 2016: 224, SNIP: 0.929, SJR: 0.436
- 12 Büyüközkan, G., Maire, J.L., 1998. Benchmarking process formalization and a case study. *Benchmarking for Quality Management & Technology* 5 (2), 101–125.
Benchmarking: an international journal, CiteScore: 1.37, HighestCiteScore: 74%, CiteScoreRank: 79/309, Citations 2016: 224, SNIP: 0.929, SJR: 0.436

2. Revues francophones

- 13 Guerra, A., Pillet, M., Maire, J.L., 2006. Formalisation de connaissances subjectives par l’analyse sensorielle. *Revue française de gestion industrielle* 25 (9).
- 14 Maire J.L., Pillet M., Bronet V., 2005. Benchmarking et Bonnes Pratiques, *Cahiers des CPIM*, 16.
- 15 Maire J.L., Pillet M., 2004. Pérennisation des actions d’amélioration, *Journal JITEC* 6 (80).
- 16 Pillet M., Maire J.L., Bronet V., 2004. Faut-il une sixième étape dans la démarche Six Sigma pour garantir la pérennité ? *Qualité Références*, pp. 60-63.
- 17 Maire J.L., Best Practices, 2003 *Journal JITEC* 68.
- 18 Maire, J.L., Büyüközkan, G., 2001. La coopération dans un processus de référencement (benchmarking). *Revue des Sciences de Gestion : Direction et Gestion*, 188-189.
- 19 Maire J.L., Benchmarking, 2003 *Journal JITEC* 43.
- 20 Beauchene, D., Maire, J.L., 1995. Diagnostic de l’organisation d’une entreprise avec OLYMPIOS. *Ingénierie des systèmes d’information* 3 (4), pp. 555–574.

3. Chapitres d'ouvrage

- ²¹ Maire J.L., Pillet M., Bronet V., 2004. Chapitre 12 : Le benchmarking, comment identifier et caractériser les bonnes pratiques, Gestion dynamique des connaissances industrielles (Traité IC2), Vol. 2-7462-0952-7, Eds. IC2, Hermès Science, 150-175.

4. Congrès internationaux

- ²² Albert, B., Maire, J.L., Pillet, Zanni-Merk C., de Bertrand de Beuvron, F., M., Charrier, J., Knecht, C., 2017. A haptic quality control method based on the human somatosensory system in: IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications, CIVEMSA'2017, 26-28 June 26-28, Annecy, France.
- ²³ Albert, B., Zanni-Merk C., de Bertrand de Beuvron, F., Maire, J.L., Pillet, M., Charrier, J., Knecht, C., 2016. A Smart System for Haptic Quality Control: Introducing an Ontological presentation of Sensory Perception Knowledge, in: 8th international joint Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development, KEOD'2016, IC3K, November 9-11, Porto, Portugal.
- ²⁴ Albert, B., Maire, J.L., Pillet, M., Zanni-Merk, C., de Bertrand de Beuvron, F., Knecht, C., Charrier, J., 2016. Generic and structured description of tactile sensory perceptions, in. 6th Kansei Engineering and Emotion Research, KEER'2016, August 31-September 2nd, Leeds, United Kingdom.
- ²⁵ Desage, S.-F., Pitard, G., Pillet, M., Favrelière, H., Maire, J.-L., Frelin, F., Samper, S., Le Goïc, G., 2015. Extended visual appearance texture features, in: SPIE/IS&T Electronic Imaging. International Society for Optics and Photonics, February 8, San Francisco, United States.
- ²⁶ Desage, S.-F., Pitard, G., Pillet, M., Favrelière, H., Maire, J.L., Frelin, F., Samper, S., Le Goïc, G., 2015. Syntactic texture and perception for a new generic visual anomalies classification, in: 12th International Conference on Quality Control by Artificial Vision QCAV'2015, June 3-5, Le Creusot, France.
- ²⁷ Baudet, N., Pillet, M., Maire, J.L., 2012. Neural network for improvement of the visual quality process, in: International conference on Kansei engineering and emotional research KEER'2012, April 23-26, Penghu, Taiwan.
- ²⁸ Baudet, N., Pillet, M., Maire, J.L., 2012. Proposal of a methodological approach to reduce variability in the visual inspection, in: 3rd International Conference on Surface Metrology ICSM2012, March 21-23, Annecy, France.
- ²⁹ Baudet, N., Pillet, M., Maire, J.L., 2011. Sensory analysis applied in the particular case of visual inspection of products, in: 9th Pangborn Sensory Science Symposium, September 14-18, Toronto, Canada.
- ³⁰ Debrosse, T., Pillet, M., Maire, J.L., Baudet, N., 2010. Sensory perception of surfaces quality - Industrial practices and prospects in: International conference on Kansei engineering and emotional research KEER'2010, March 2-4, Paris, France.
- ³¹ Guerra, A-S., Pillet, M., Maire, J.L., 2008. Control of variability for man measurement, in: 12th IMEKO TC1-TC7 Joint Symposium on Man, Science and Measurement. September 3-5, Annecy, France.
- ³² Guerra A-S., Pillet M., Maire J.L., 2007. Acquisition and Validation of the two types of expertise of a Visual control, in International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, IESM'2007, May 30 June 2, Beijing, China.
- ³³ Guerra A-S., Pillet M., Maire J.L., 2006. Formalization of subjective knowledge by the sensory analysis, in: Global Manufacturing and Innovation GMI'2006, July 27-29, Coimbatore, India.
- ³⁴ Büyüközkan, G., Maire, J.L., 1998. Toolbox for a Benchmarking Process, in: Computational engineering in systems applications CESA'98 IMACS MultiConference IEEE, April 1-4, Hammamet, Tunisia.
- ³⁵ Maire J.L., Büyüközkan G., 1997. Evaluation and Improvement of Performance in Enterprises by Benchmarking, in: Manufacturing System Design'97, 15-16 May 15-16, Magdeburg, Germany.
- ³⁶ Mahé, S., Maire, J.L., Rieu, C. 1997. To evaluate and to improve the performance of the enterprise: a Franco Swiss benchmarking project, in: international workshop on Modelling techniques for business process re-engineering and benchmarking, 16-19 Apr 1996, Bordeaux, France.

- 37 Maire, J.L., Büyükközkcan, G., 1997. Methods and tools for first five steps of benchmarking process. Innovation in Technology Management of Engineering Technology. The key to Global Leadership. PICMET'97, July 27-31, Portland, United States.
- 38 Büyükközkcan G., Maire J.L., 1997. Methods and Tools for Benchmarking Process, in: 7th Mini Euro Conference, March 25-27, Bruges, Belgium.
- 39 Maire J.L., Büyükközkcan G., 1996. Formalization of the benchmarking process, in: 7th Australasian Conference on Information Systems, December 11-13, Tasmania, Australia.

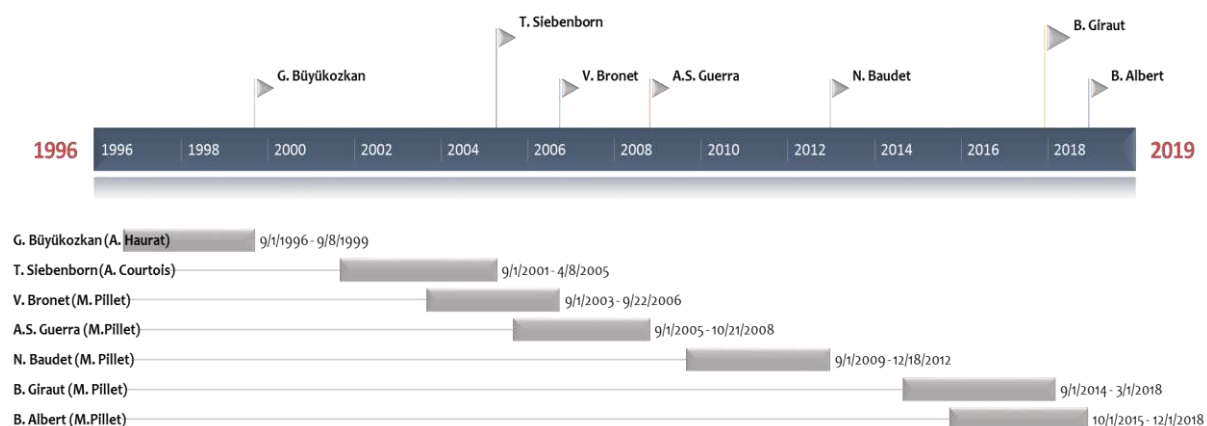
5. Congrès francophones

- 40 Giraut, B., Pillet, M., Maire, J.L., 2015. Améliorer la performance industrielle par une meilleure gestion des emails, in: 11^{ème} Congrès International de Génie Industriel CIGI2015, 26-28 Octobre, Québec, Canada
- 41 Desage, S-F., Pitard, G., Favrelière, H., Pillet, M., Maire, J.L., Frelin, F., Samper, S., Le Goïc, G., 2015. Vers une automatisation du contrôle visuel des produits, in: 11^{ème} Congrès International Pluridisciplinaire Qualité et Sécurité de Fonctionnement QUALITA'2015, 17-19 Mars, Nancy, France.
- 42 Pillet, M., Maire, J.L., Hernandez, P., Vincent, R., 2015. Tolérancement inertiel, Calcul Optimal, in: 11^{ème} Congrès International de Génie Industriel CIGI'2015, 26-28 Octobre, Québec, Canada.
- 43 Maire, J.L., Pillet, M., Baudet, N., 2013. Measurement of the perceived quality of a product-Characterization of aesthetic anomalies, in: 10^{ème} Congrès International Pluridisciplinaire Qualité et Sécurité de Fonctionnement QUALITA'2013, 19-22 Mars, Compiègne, France.
- 44 Pillet, M., Maire, J.L., Pralus, M., Boissiere, J., 2013. Structuration des démarches de progrès, in: 10^{ème} Congrès International de Génie Industriel CIGI'2013, 12-14 Juin, La Rochelle, France.
- 45 Baudet, N., Pillet, M., Maire, J.L., 2011. Contrôle visuel des produits : comparaison des méthodes d'évaluation des anomalies d'aspect, in: 9^{ème} Congrès International Pluridisciplinaire Qualité et Sécurité de Fonctionnement QUALITA'2011, 22-25 Mars, Angers, France.
- 46 Pillet, M., Pairel, E., Maire, J.L., Abdelhakim, B., 2011. Différentes stratégies de filtrage en pilotage inertiel multicritères., in: 7^{ème} Conférence Internationale en Conception & Production Intégrées CPI'2011, 19-21 Octobre, Oujda, Maroc.
- 47 Pillet, M., Guerra, A.S., Maire, J.L., 2009. Proposition d'une mesure inertielle de la qualité d'un objet évalué par analyse sensorielle, in: 8^{ème} Congrès International Pluridisciplinaire Qualité et Sécurité de Fonctionnement QUALITA'2009, 18-20 Mars, Besançon, France.
- 48 Guerra A.-S., Pillet M., Maire J.L., 2007. Métrologie sensorielle pour un contrôle visuel des produits, in 13^{ème} Congrès International de Métrologie, 18-21 Juin, Lille, France.
- 49 Guerra A.-S., Pillet M., Maire J.L., 2007. Organisation métrologique pour un contrôle qualité visuel in: 7e Congrès international de Génie Industriel CIGI 07, 5-8 Juin, Trois-Rivières, Québec, Canada.
- 50 Guerra A.-S., Pillet M., Maire J.L., 2006. Formalisation des connaissances subjectives par l'analyse sensorielle, Semaine de la Connaissance (SDC'06), Nantes, 26-30 Juin, pp. 87-93.
- 51 Pillet M., Maire J.L., Bronet V., Caroly S., Cholez C., 2005. Modélisation d'une démarche de pérennisation, Application pour une démarche MSP, in: 6^{ème} Congrès International Pluridisciplinaire Qualité et Sécurité de Fonctionnement QUALITA'2005, 5-7 Mars, Bordeaux, France.
- 52 Bronet V., Maire J.L., Pillet M., 2005. Une approche globale pour l'évaluation des bonnes pratiques, in: 6^{ème} Congrès International Pluridisciplinaire Qualité et Sécurité de Fonctionnement QUALITA'2005, 5-7 Mars, Bordeaux, France.
- 53 Revel, L., Habchi, G., Maire, J.L., 2004. Analyse du processus d'élaboration d'un projet de simulation, in: Modélisation et Simulation pour l'analyse et l'optimisation des systèmes industriels et logistiques MOSIM'2004, 1-3 Septembre, Nantes, France.
- 54 Maire J.L., Pillet M., Berchet C., 2004, Pérennisation des actions d'amélioration - application à la mise en place d'un ERP, Journée des CPIM de France, Septembre, Paris, France.

- 55 Maire J.L., Bronet V., 2003. Le Benchmarking interne, Journée Luxembourgeoise de la Qualité, 27 Novembre, Luxembourg/Kirchberg, Luxembourg.
- 56 Maire J.L., 2003. Le benchmarking : une approche réellement révolutionnaire ? Journée Cité Qualité, 2 Avril, Lyon, France.
- 57 Bronet V., Maire J.L., Pillet M., 2003. Best Practices for processes improvment, in: 6^{ème} Congrès International Pluridisciplinaire Qualité et Sûreté de Fonctionnement QUALITA'2003, Mars, Nancy, France.
- 58 Siebenborn T., Maire J.L., 2003. Codification des compétences collectives dans le contexte d'une migration de processus, in. 5^{ème} Congrès International de Génie Industriel GI'2003, 26-29 Octobre, Québec, Canada.
- 59 Pillet M., Avrillon L., Maire J.L., Bronet V., 2003. L'Automaîtrise : Une approche formelle de la performance des postes de production, in. 3^{ème} Conférence Internationale en Conception et Production Intégrées CPI'2003, 22-24 Octobre, Meknès, Maroc.
- 60 Pillet M., Maire J.L., Bronet V., 2003. Maîtrise statistique des procédés : cas particulier de l'injection plastique, in. 3^{ème} Conférence Internationale en Conception et Production Intégrées CPI'2003, 22-24 Octobre, Meknès, Maroc.
- 61 Bronet, V., Maire, J.L., Pillet, M., 2003. Identification et caractérisation d'une "bonne pratique" industrielle pour un benchmarking interne, in: 5^{ème} Congrès International de Génie Industriel CIGI'2003, 12-14 Octobre, Québec, Canada.
- 62 Siebenborn T., Maire J.L., 2002. Les ressources comme clé d'une codification des compétences dans le contexte de l'intégration d'un nouveau processus, Colloque Gestion des Compétences et des Connaissances en Génie Industriel CCC'2002, 12-13 Décembre, Nantes, France.
- 63 Büyüközkan G., Maire J.L., 1999. Mise en œuvre d'un processus de benchmarking, in: 3^{ème} Congrès International de Génie Industriel, 25-28 Mai, Québec, Canada.
- 64 Maire, J.L., Büyüközkan, G., 1999. Un modèle d'évaluation de la performance pour un processus de benchmarking, in: Modélisation et Simulation pour l'analyse et l'optimisation des systèmes industriels et logistiques MOSIM'1999, 6-8 Octobre, Annecy, France.
- 65 Büyüközkan, G., Maire, J.L., 1998. Capitalisation des connaissances des entreprises pour un benchmarking, in GIPI, 30 Janvier, Toulon, France.
- 66 Büyüközkan, G., Maire, J.L., 1997. Amélioration de la Performance avec un Processus de Benchmarking, in: 2^{ème} Congrès International de Génie Industriel, 3-5 Septembre, Albi, France.
- 67 Beauchêne, D., Haurat, A., Maire, J.L., N'Kongo, T., Rieu, C., 1992. OLYMPIOS : un modèle de conception du système d'information d'une entreprise manufacturière, in: Congrès Informatique des organisations et systemes d'information et de décision INFORSID'92., 19-22 Mai, Clermont-Ferrand, France.

III. ENCADREMENTS

Le diagramme qui suit montre la répartition dans le temps des co-encadrements des doctorants que j'ai effectués (7 dont 2 en cours). Les thèses soutenues ont été encadrées avec le professeur Haurat au laboratoire LLP (1999), le professeur Courtois au laboratoire LISTIC (2005) et le professeur Pillet, d'abord au laboratoire LISTIC (2006) puis à SYMME (2008, 2012). Les 2 thèses à soutenir en 2018 sont encadrées avec le professeur Pillet.



1. Co-Encadrements de doctorants (thèses en cours)

Bruno Albert, « Formalisation d'un processus de contrôle haptique des produits et réalisation d'un prototype quantifiant la qualité au toucher », (direction Maurice Pillet et Cecilia Zanni-Merk - Laboratoire ICube INSA Strasbourg, co-encadrement 50%), soutenance prévue en Octobre 2018.

La thèse, qui se déroule en collaboration avec l'entreprise INEVA, vise à proposer une méthode de création d'un standard de contrôle qualité haptique avec l'objectif de réduire de manière significative la variabilité généralement observée (comme pour le contrôle visuel) pour les résultats de ce type de contrôle. Les travaux mettent en avant la nécessité de définir un ensemble de sensations élémentaires pour détecter et évaluer efficacement les anomalies lors d'un contrôle haptique d'un produit. Un logiciel automatisant cette méthode et utilisant une base de connaissances structurée par ontologies est actuellement en cours de développement.

Benoît Giraut, « Lean Information : une nouvelle démarche pour donner de la valeur à l'information dans les PMI/PME » (direction Maurice Pillet, co-encadrement 50%), soutenance prévue mi 2018.

La thèse, réalisée dans le cadre du projet AdeQUATE (présenté plus loin), vise à analyser les pratiques existantes de l'entreprise dans la gestion de ses informations. L'objectif est de voir si ces pratiques sont toujours en cohérence avec les modes de fonctionnement induits par les nouveaux outils numériques de gestion de l'information (de plus en plus utilisés dans les entreprises) ou, au contraire, si de nouvelles pratiques sont à réinventer. L'idée avancée est de mettre sous contraintes certains flux d'informations de manière à, par analogie avec la démarche Lean sur les flux physiques, réduire et/ou éliminer des gaspillages et créer de la valeur. Ce travail est mené en collaboration avec les entreprises Fournier, Aventics, Allergan et Agylium.

2. Co-Encadrements de doctorants (thèses soutenues)

- ⁶⁸ **Nathalie Baudet**, « Maîtrise de la qualité visuelle des produits - Formalisation du processus d'expertise et proposition d'une approche robuste de contrôle visuel humain » (direction Maurice Pillet, co-encadrement 50%), soutenue le 18/12/2012
Michel Tollenaere, INPG (président)
Joël Rech, ENISE (rapporteur) - Patrick Charpentier, ENSTIB (rapporteur)
Jacques Jacot, EPFL
Serge Samper, Université de Savoie
Christian Farat, directeur Qualité Environnement Fournier
Les travaux de cette thèse¹ réalisés dans le cadre du projet INTERREG DaSuVa et d'une collaboration avec l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, se situent dans la continuité de ceux réalisés au cours de la thèse de Anne Sophie Guerra. Nous proposons un ensemble de méthodes et d'outils permettant à une entreprise de maîtriser l'ensemble des étapes d'un contrôle visuel d'aspect des produits : exploration, évaluation des anomalies et décision. Par rapport aux méthodes existantes, notre méthode présente l'intérêt d'être suffisamment générique pour être applicable à tout type de produits. Elle présente également l'avantage de réduire de manière significative la variabilité des résultats généralement observée lors d'un contrôle qualité visuel d'un produit. La méthode a été appliquée chez plusieurs partenaires du projet DASuVA (Fournier, Eudica, ST Dupont, Audemars Piguet). Depuis, elle a été reprise par un grand nombre d'entreprises horlogères pour le contrôle visuel de leurs produits. Nathalie est aujourd'hui ingénieur consultant Qualité.
- ⁶⁹ **Anne Sophie Guerra**, « Métrologie sensorielle dans le cadre du contrôle qualité visuel » (direction Maurice Pillet, co-encadrement 50%), soutenue le 21/10/2008
Bernard Yannou, Ecole Centrale de Paris (président)
Zohra Cherfi, UTC (rapporteur) - Catherine Dacremont, ENSBANA de Dijon (rapporteur)
Alexandre Vandini, directeur de Production Patek Philippe
La thèse², réalisée dans le cadre d'une collaboration avec l'entreprise horlogère Patek Philippe, donne les fondements d'un modèle métrologique sensoriel pour le contrôle visuel. Nous proposons une méthode générique pour détecter, puis évaluer une anomalie visuelle. L'originalité de la méthode réside dans la séparation qui est faite entre l'exploration des anomalies et leur évaluation, cette séparation réduisant de manière significative la variabilité des résultats d'un contrôle. Par analogie avec ce qui est proposé pour la métrologie dimensionnelle, la thèse propose également l'organisation à mettre en place pour une métrologie sensorielle des produits. La méthode a été implémentée dans l'entreprise Patek Philippe pour l'ensemble des contrôles visuels des produits. Elle a été depuis reprise par de nombreuses autres entreprises horlogères.
Anne-Sophie est aujourd'hui directrice de Timelab (Laboratoire d'Horlogerie et MicroTechnique de Genève).
- ⁷⁰ **Vincent Bronet**, « Amélioration de la performance industrielle à partir d'un processus référent - Déploiement inter-entreprises de bonnes pratiques » (direction Maurice Pillet, co-encadrement 50%), soutenue le 22/09/2006
Jacques Jacot, EPFL (président)
Emmanuel Caillaud, INSA Strasbourg (rapporteur) - Michel Tollenaere, ENSGI-INPG (rapporteur)
Sandro Ruffato, directeur industriel TECUMSEH Europe

¹ <https://halshs.archives-ouvertes.fr/tel-00807304/document>

² <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00362743/document>

La thèse³, réalisée en collaboration avec l'entreprise Tecumseh Europe, propose un ensemble de méthodes et outils pour accompagner une entreprise dans la réalisation d'un benchmarking interne, et plus particulièrement, l'aidant à mettre en œuvre trois des cinq phases de cette démarche : description des processus, comparaison et déploiement des bonnes pratiques. L'originalité de la thèse est de proposer une méthode d'identification, de représentation et de comparaison de bonnes pratiques d'un processus. Les propositions ont été testées et validées avec la réalisation d'un benchmarking interne dans l'entreprise Tecumseh visant à déployer les bonnes pratiques du processus Six Sigma sur l'ensemble des sites de production. Vincent est aujourd'hui directeur Performances Industrielles & QSE à AREVA.

- ⁷¹ **Thierry Siebenborn**, « Une approche de formalisation du processus de changement dans l'entreprise » (direction Alain Courtois, co-encadrement 50%), soutenue le 08/04/2005
Jean-Paul Kieffer, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers d'Aix-en-Provence (Président)
Michel Aldanondo, Ecole des Mines Albi (Rapporteur) - Zohra Cherfi, UTC (Rapporteur)
Pierre Ladet, INPG
Cette thèse⁴ présente une formalisation du processus de changement qui est mis en œuvre lors d'une transformation à mener sur un processus, opérationnel ou de support, d'une organisation industrielle. Partant du principe que tout changement passe par un ensemble de compétences à acquérir ou à faire évoluer, nous proposons une méthode permettant à un pilote de mobiliser dynamiquement les ressources pour absorber les réactions au changement. Cette démarche a été appliquée dans un site de production de l'entreprise Chabert Duval pour passer d'un mode de fabrication par campagnes à un mode de fabrication à la commande. Thierry est aujourd'hui directeur de la société EMP CONSEIL (Engineering Management & Process Conseil).

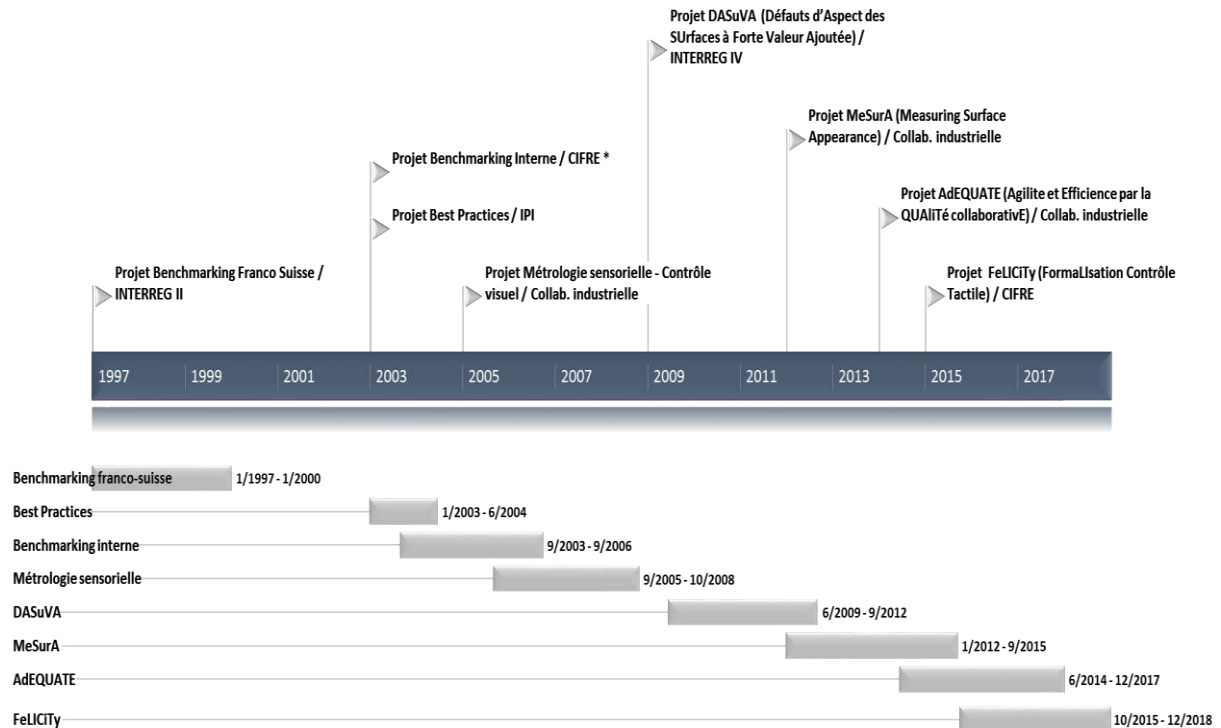
- ⁷² **Gülçin Büyükoçkan**, « Une approche de formalisation d'un processus de benchmarking coopératif » (direction Alain Haurat et Muhittin Oral - Université de Laval Canada, co-encadrement 50%), soutenue le 08/09/1999
Pierre Ladet, INPG (Président)
Jean Claude Gentina, Ecole Centrale de Lille (Rapporteur)
Claude Pourcel, Ecole d'Ingénieurs de Tours (Rapporteur)
Gérard Bel, HDR CERT Onera de Toulouse
Cette thèse présente une étude de l'existant sur les types de benchmarking actuellement utilisés. Elle propose également un nouveau type de benchmarking, le benchmarking coopératif, et détaille un ensemble d'outils et de méthodes accompagnant de manière cohérente les trois premières phases de ce processus : diagnostic de la performance de l'entreprise, choix du sujet et des partenaires du benchmarking, identification des écarts et choix des actions d'amélioration à mener. Gülçin est aujourd'hui professeur à l'Université de Galatasaray.

³ https://www.polytech.univ-savoie.fr/fileadmin/polytech_autres_sites/sites/listic/Theses_HdR/TheseBronet.pdf

⁴ https://www.polytech.univ-savoie.fr/fileadmin/polytech_autres_sites/sites/listic/Theses_HdR/TheseSiebenborn.pdf

IV. RAYONNEMENT SCIENTIFIQUE ET RESPONSABILITES COLLECTIVES

Le diagramme qui suit montre la répartition dans le temps des projets de recherche que j'ai co-pilotés et/ou dans lesquels j'ai participé : 2 projets internationaux (Suisse), 1 projet régional et 6 projets avec des industriels et/ou centres techniques dont 2 CIFRE (Tecumseh Europe et INEVA).



1. Pilotage et/ou participation à des programmes de recherche

Projet en cours

Projet FeLiCiTy / CIFRE (FormaLisation Contrôle Tactile) (2015 – 2018)

Participants : SYMME / Université Savoie Mont Blanc, Laboratoire ICube INSA Strasbourg et entreprise INEVA

Objectif : proposer une méthode robuste de mesure de la qualité tactile d'un produit avec l'objectif de développer des moyens de mesure pertinents et répétables de contrôle de la qualité perçue « tactile » d'un produit.

Financement : ANRT (Cifre) et contrat accompagnement INEVA

Participation à ce projet via l'encadrement (50%) de la thèse de Bruno Albert.

Les travaux menés transposent et étendent la méthode de contrôle d'aspect, développée dans le domaine du visuel dans le projet DASuVA, au domaine du contrôle tactile. Le projet aboutira également au développement d'un outil logiciel aidant une entreprise à construire le standard de contrôle haptique de ses produits (définition des sensations à suivre, définition des modes d'exploration, techniques d'évaluation, modes de décision de conformité du produit, etc.).

Les résultats seront détaillés dans la thèse de Bruno Albert (soutenance prévue fin 2018) mais les premiers travaux effectués sont décrits dans (1, 22, 23 et 24).

Projets terminés

Projet AdeQUATE (Agilite et Efficience par la QUALité collaborativE) / Collaboration industrielle (2014 – 2017)

Participants : SYMME / USMB, entreprises FOURNIER, AVENTICS, ALLERGAN et AGYLIUM

Objectif : définir de nouvelles pratiques dans la gestion de l'information en vue de réduire les gaspillages et de créer de la valeur.

Montant : 35 K€/an - Financement : industriels

Participation à ce projet via l'encadrement (50%) de la thèse de Benoît Giraut.

Le projet se fonde sur l'hypothèse que la mise sous contrainte de certains flux d'information dans l'entreprise est à l'origine, d'une part d'une réduction significative des gaspillages, et d'autre part d'une création de valeur pour l'information. Les propositions sont appliquées dans les entreprises partenaires du projet.

Les résultats seront détaillés dans la thèse de Benoît Giraud (soutenance prévue mi 2018). Les premiers travaux effectués sont décrits dans (40).

Projet MeSurA (Measuring Surface Appearance) / Collaboration industrielle (2012 – 2015)

Porteur : SYMME / Université de Savoie

Partenaires : Centres techniques CTDEC et CETEHOR, entreprise OPTO

Participation à ce projet via des travaux menés avec Simon-Frédéric Desage (thèse soutenue le 24/11/2015) sur les méthodes de détection et de reconnaissance des anomalies d'aspect.

Montant : 318 K€ - Financement : INTERREG, Conseil Général Haute Savoie et industriels

Objectif : poursuivre les travaux initiés par le projet INTERREG IV / DaSuVA et réaliser un dispositif automatisé pouvant aider un contrôleur ou expert dans la détection puis l'évaluation d'anomalies sur la surface d'un produit.

Le dispositif⁵ qui a été développé réalise une inspection de la surface d'un produit, simule de façon instantanée le rendu visuel d'une surface sous un éclairage choisi, extrait les anomalies d'aspect (rayures, stries, piqures, coups, etc.) et décide de l'acceptabilité du produit.

Les résultats de mon implication dans ce projet sont décrits dans (25, 26 et 41).

Projet DASuVA⁶ (Défauts d'Aspect des Surfaces à forte Valeur Ajoutée) / INTERREG IV (2009 – 2012)

Porteurs : SYMME / Université de Savoie et Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

Partenaires : Centres techniques CTDEC et CETEHOR - Entreprises Fournier, St Dupont, Eudica, SNR, MPS, QMT et Audemars Piguet.

Montant : 472 K€ - Financement : INTERREG et industriels

Participation à ce projet via l'encadrement (50%) de la thèse de Nathalie Baudet.

Objectif : formaliser le processus de contrôle de la surface d'un produit et proposer des solutions pour automatiser ce contrôle.

Les travaux ont abouti à la proposition d'une nouvelle méthode de contrôle de la surface d'un produit prenant en compte les aspects subjectifs humains durant les étapes de détection des anomalies, d'évaluation de ces anomalies et de décision sur la conformité du produit. Le projet a également abouti à la réalisation d'un prototype semi-automatisé de mesure de la qualité d'une surface (thèse de Gaëtan Le Goïc). Les solutions proposées ont été appliquées dans les entreprises Fournier, et en partie pour certains d'entre eux, dans les entreprises Eudica et St Dupont.

Les résultats de ce projet sont décrits dans la thèse de Nathalie Baudet (68), ainsi que dans (4, 5, 7, 27, 28, 29, 43 et 45).

⁵ <http://symme-mesura.com/>

⁶ http://www.clients-cms.com/CMS/documents/2981/innovation/aspects_de_surface.pdf

Projet Métrologie sensorielle pour le contrôle visuel / Collaboration industrielle (2005 – 2008)

Participants : SYMME / Université de Savoie et entreprise Patek Philippe

Financement : contrat accompagnement Patek Philippe

Objectif : proposer une formalisation du contrôle visuel des produits et une démarche métrologique sensorielle réduisant la variabilité des résultats de contrôle.

Participation à ce projet via l'encadrement (50%) de la thèse de Anne-Sophie Guerra.

La thèse propose de décomposer le processus de contrôle visuel en trois étapes distinctes (exploration, évaluation et décision) et propose un ensemble d'outils et de méthodes associées à chacune de ces étapes visant à réduire la variabilité des résultats du contrôle. Une organisation métrologique est également proposée avec l'objectif de s'assurer que le standard de contrôle d'aspect est correctement assimilé, compris et partagé par l'ensemble des acteurs du contrôle. Les solutions proposées ont été appliquées dans l'entreprise Patek Philippe sur le contrôle visuel des boîtes de montres.

Les résultats sont détaillés dans la thèse de Anne Sophie Guerra (69), ainsi que dans (31, 32, 33, 47, 48, 49 et 50).

Projet Benchmarking interne / CIFRE (2003 – 2006)

Participants : Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance (LISTIC) / Université de Savoie et Tecumseh Europe

Financement : ARNT (Cifre) et contrat accompagnement Tecumseh Europe

Objectif : proposer une méthode et des outils aidant une entreprise à réaliser un benchmarking interne (déploiement en interne de bonnes pratiques)

Participation à ce projet via l'encadrement (50%) de la thèse de Vincent Bronet en charge du pilotage des chantiers d'amélioration continue à Tecumseh Europe.

Les travaux ont abouti à la proposition de méthodes et d'outils identifiant les bonnes pratiques d'un processus et les comparant à celles d'un processus référent. Les propositions ont été appliquées dans le cadre de la réalisation d'un benchmarking interne dans l'entreprise Tecumseh Europe en vue d'un déploiement du processus Six Sigma sur les trois sites de production de l'entreprise (Cessieu, La Verpillière et La Mûre).

Les résultats sont détaillés dans la thèse de Vincent Bronet (70), ainsi que dans (8, 10, 14, 17, 51, 52, 56, 60 et 61).

Projet régional Best Practices / IPI (2003 – 2004)

Porteur : Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance (LISTIC) / Université de Savoie

Partenaires : Centre de Recherche et d'Innovation Sociotechnique et Organisation Industrielle (CRISTO) - Entreprise TECUMSEH Europe

A l'origine et porteur du projet, encadrement (50%) de Vincent Bronet durant sa 1^{ère} année de thèse et de Thierry Siebenborn durant sa 2^{ème} année de thèse.

Objectif : définir ce qu'est une « best practice » dans un contexte de benchmarking et proposer une méthode pour sa diffusion intra ou interentreprises.

Ce projet a permis de montrer les différentes manières de caractériser une *best practice* pouvant être transférée à des partenaires d'un benchmarking. Avec une enquête menée auprès d'une quarantaine d'entreprises, le projet a également mis en évidence la difficulté des entreprises à pérenniser leurs bonnes pratiques. Quelques solutions ont été proposées pour mieux pérenniser ces pratiques.

Les résultats de ce projet sont décrits dans la thèse de Vincent Bronet (70), Thierry Siebenborn (71), ainsi que dans (9, 10, 14, 15, 16, 17, 21, 51, 54, 55, 56, 57, 58, 61 et 62).

Projet Benchmarking franco-suisse / INTERREG II (1997 – 2000)

Porteur : Laboratoire de Logiciels pour la Productique (LLP/CESALP) / Université Savoie

Partenaires : Association Patronale Interprofessionnelle (API), Centre Productique de Haute-Savoie (CPHS), Centres CIM de Genève et de Vaud, Association Valaisanne pour la Promotion de l'Innovation et des Technologies de Fabrication (CIMTEC) et 10 entreprises suisses et françaises dans différents domaines d'activité (mécanique, électronique, agroalimentaire).

Financement : INTERREG et industriels

A l'origine et porteur du projet, encadrement (100%) du DEA de Gülçin Büyükoçkan, réalisation du diagnostic de la performance de trois entreprises suisses (en collaboration avec le centre CIM Vaud) et animation du Club Benchmarking Haute Savoie (en collaboration avec le MFQ Haute Savoie).

Objectif : proposer une méthode pour accompagner la mise en œuvre de l'ensemble des étapes d'un benchmarking.

La méthode qui a été développée dans ce projet se base sur le diagnostic de la performance d'une entreprise par caractérisation et hiérarchisation des points d'amélioration de son système d'information, les valeurs de performance obtenues étant ensuite comparées entre entreprises ainsi qu'avec des benchmarks existants. Côté français, le logiciel AIDQUAL, intégrant l'outil OLYMPIOS_AUDIT développé par le LLP et l'outil WIN-ADA développé par l'API, a été réalisé. Côté Suisse, CIMTEC Valais a mis au point une méthode d'audit stratégique basée sur les travaux de W.B. Rouse. Les résultats de ce projet sont décrits dans la thèse de Gülçin Büyükoçkan (72), ainsi que dans (11, 12, 18, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 63, 64, 65 et 66).

2. Responsabilités en recherche

Je suis actuellement impliqué dans le fonctionnement du laboratoire SYMME à travers ma fonction de délégué RH et membre du Bureau. J'ai également participé à l'animation scientifique du laboratoire en tant que responsable d'un groupe de compétences.

Délégué RH au laboratoire SYMME, membre du Bureau (depuis 2015)

Je réalise l'ensemble des entretiens individuels avec les doctorants du laboratoire dans le cadre du Comité de Suivi Individuel du Doctorant (CSID). Le dispositif, qui ne concernait jusqu'à présent que les doctorants inscrits en 3^{ème} année, a été étendu en Juillet 2017 à l'ensemble des doctorants (soit une vingtaine d'entretiens par an). Le comité s'assure du bon déroulement de la thèse du doctorant et lui formule des recommandations l'aidant à avancer dans ses travaux et/ou l'aidant à préparer pour son insertion professionnelle après sa thèse.

En tant que membre du Bureau du laboratoire, je participe également au suivi et à l'animation des activités du laboratoire (réunions hebdomadaires).

Responsable du Groupe de Compétences « Qualité des Produits et des Systèmes » du laboratoire SYMME (2013 – 2015)

J'ai animé ce groupe, constitué de 10 enseignants chercheurs et de 7 doctorants, tous spécialisés dans le domaine des sciences pour l'Ingénieur en génie mécanique, génie industriel et informatique. L'objectif du groupe est de fédérer, via des réunions et des séminaires réguliers, un ensemble de compétences pour travailler ensemble sur des problématiques de recherche dans les domaines de la maîtrise de la qualité et de l'amélioration de la performance industrielle. Les thèmes d'étude se situent principalement dans la production industrielle manufacturière, mais certains d'entre eux concernent également les phases de conception et de mise au point mécanique des projets liés au domaine de la santé et le domaine des très grands Instruments.

Tuteur MIES (2005-2011)

En tant que responsable du département QLIO à l'IUT d'Annecy de 2005 à 2011, j'ai assuré le suivi et l'initiation à l'enseignement de 4 doctorants exerçant les fonctions de Moniteurs d'Initiation à l'Enseignement Supérieur (MIES).

Animateur du Club Benchmarking Haute Savoie (2000 – 2005)

Participants : LISTIC / Université de Savoie, MFQ RA (Mouvement Français pour la Qualité Rhône Alpes), une vingtaine d'entreprises dans des secteurs d'activités différents (Rexroth, SNR/NTN, Amphenol Socapex, Fournier, CILSE, SEDC Industrie, Dynastar, etc.)

J'ai animé ce groupe qui avait pour objectif d'initialiser puis d'accompagner des opérations de benchmarking entre membres du club, ainsi que de finaliser une méthode de benchmarking orientée PMI/PME. Ce groupe a été créé à l'initiative du Centre Productique de Haute Savoie (CPHS), du Mouvement Français pour la Qualité (MFQ), de l'European Institute of Purchasing Management (EIPM) et du Laboratoire de Logiciels pour la Productique (LLP/CESALP).

Membre de la Commission de Spécialistes Section 27, Université de Savoie (1993 - 1996)

J'ai participé durant cette période aux commissions de recrutement d'ATER et d'enseignements chercheurs en informatique pour les composantes de l'Université de Savoie.

V. ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT

1. Liste des modules enseignés

Le tableau qui suit liste les matières enseignées jusqu'à présent. Mes enseignements couvrent des domaines de la 61^{ème} section (génie Industriel, planification et ordonnancement) et de la 27^{ème} section (algorithmique, système d'information et intelligence artificielle).

Composantes	Matières
IUT Qualité, Organisation et Logistique Industrielle Formation Initiale & Formation par Apprentissage (Orientation Gestion Appliquée aux Métiers de l'Artisanat)	Informatique générale Gestion des approvisionnements Coordination approvisionnements/Production Conception des systèmes d'information Systèmes de gestion de bases de données Pilotage de la production par ERP/GPAO Paramétrage d'une GPAO/ERP Ordonnancement d'atelier Fundamentals in Logistics
Tetras Annecy - Licence Professionnelle Amélioration Industrielle et Qualité des Produits et Processus	Gestion des flux – Planification de la production Bases de données
IAE Annecy – Master Technologies et Management	Amélioration radicale / Performance Industrielle
Polytech'Savoie - ITII 2 Savoies Filière Mécanique et Productique	Bases de données Logistique – Amélioration Industrielle
ENSGI – INP Grenoble	Programmation par contraintes

2. Responsabilités en enseignement



Depuis mon recrutement, je me suis très impliqué dans le fonctionnement du département QLIO de l'IUT d'Annecy (directeur des études, puis chef de département et actuellement responsable du DUT QLIO par apprentissage sur l'orientation GAMA). J'ai également participé à l'évolution du contenu pédagogique de la spécialité QLIO (PACD QLIO, membre CPN QLIO et à l'origine de la création de l'orientation « Entreprises artisanales » dans la spécialité QLIO).

Depuis Juillet 2007, responsable pédagogique du DUT QLIO Orientation GAMA (Gestion Appliquée aux Métiers de l'Artisanat), 1^{ère} et 2^{ème} année

Réalisé en collaboration avec la Chambre des Métiers et de l'Artisanat de Haute Savoie, le DUT QLIO GAMA⁷ forme des techniciens capables de créer ou reprendre une entreprise artisanale ou industrielle. Cette formation, qui compte une promotion de 15 nouveaux apprentis chaque année, s'adresse en priorité à des étudiants ayant déjà suivi une formation professionnelle (titulaires d'un Bac ou Brevet Professionnel, Bac général ayant une expérience professionnelle ou VAE) et souhaitant acquérir des connaissances sur la gestion opérationnelle d'entreprise (gestion des approvisionnements, planification de la fabrication, gestion des stocks, ordonnancement des

⁷ https://www.iut-acy.univ-smb.fr/departement_qlio/alternance-2/

activités, conception d'un système d'assurance qualité, démarches d'amélioration, etc.). Je suis à l'origine de la création de cette nouvelle filière (dépôt de la demande en Mai 2005, autorisation d'ouverture en Juin 2007 et rentrée de la première promotion en Octobre 2007).

Missions principales réalisées : promotion de la formation, recrutement des apprentis en lien avec la Chambre des Métiers et de l'Artisanat de Haute-Savoie, coordination des enseignements, suivi pédagogique des apprentis et liens avec entreprises.

De 2005 à 2011 (2 mandats), chef du département QLIO (Qualité, Logistique Industrielle et Organisation)

Le DUT QLIO⁸ d'Annecy forme des techniciens dans les domaines de la gestion des flux, de la planification et du suivi de la production, du management de la qualité et de l'amélioration continue. Chaque promotion compte environ une centaine d'étudiants (85 en formation initiale et 15 en apprentissage). A l'IUT d'Annecy, les étudiants suivent les mêmes modules durant la 1^{ère} année et optent durant leur 2^{ème} année pour un parcours scientifique ou un parcours d'insertion professionnelle (3 modules différenciés) et pour un approfondissement en logistique ou un approfondissement en qualité (6 modules différenciés).

Missions principales réalisées : direction du département, gestion du budget, animation des équipes pédagogique et technique, représentation du département à la commission pédagogique nationale, à l'assemblée des chefs de département de la spécialité QLIO et au conseil de l'IUT, participation aux travaux du comité de direction et du conseil de l'IUT, gestion des candidatures VAE, etc.

De 2008 à 2011, président de l'ACD QLIO (Assemblée des chefs de Département)

L'ACD QLIO⁹ rassemble les 24 départements d'IUT proposant la spécialité QLIO (Qualité, Logistique Industrielle et Organisation), soit environ 1000 diplômés par an. Son rôle est notamment d'assurer l'homogénéité du contenu de la formation dans les différents établissements.

Missions principales : pilotage des évolutions dans les contenus de la formation¹⁰, représentation de la spécialité à la commission pédagogique nationale, validation des modules complémentaires de la formation, promotion de la spécialité, harmonisation des pratiques des départements (recrutement, actions de promotion, validation des modules complémentaires, ...).

De 1993 à 2002, directeur des études 1^{ère} année OGP (Organisation et Génie de la Production)

Missions principales : gestion de l'emploi du temps, suivi pédagogique des étudiants, préparation des jurys, coordination des modules d'enseignements, recherche et embauche de vacataires (en lien avec le chef de département), établissement du règlement des études.

3. Autres Responsabilités

Depuis 1992, membre du CA de l'association ProGection, secrétaire général jusqu'en 1999

Créée en 1987, cette association¹¹ vise à promouvoir les nouvelles méthodes en gestion de production auprès des industriels (Amphenol Socapex, Aventics, Fournier, Labcatal, LNS Group, MGHH, NTN-SNR, Patek Philippe, Piaget, Rolex, Salomon, Schoeller Arca Systems, Sensorex, Silverprod, Somfy, Stäubli, Ugitech, Vacheron Constantin, ...), des enseignants de l'Université Savoie Mont Blanc (IUT, Polytech Annecy Chambéry, IAE Savoie Mont Blanc, ...) et des chercheurs (SYMME, LISTIC et IREGÉ). L'association est aujourd'hui reconnue en France comme l'un des lieux de rencontre des plus grands spécialistes français en Supply Chain et en Qualité.

Missions principales : organisation des conférences, séminaires et visites d'entreprise (5 par an en moyenne).

⁸ https://www.iut-acy.univ-smb.fr/departement_qlio/presentation-qlio/

⁹ <http://www.iut-qlio.net/>

¹⁰ http://cache.media.enseignementsup-recherche.gouv.fr/file/25/09/9/PPN_QLIO_256099.pdf

¹¹ <http://www.ogp.univ-savoie.fr/progection.htm>

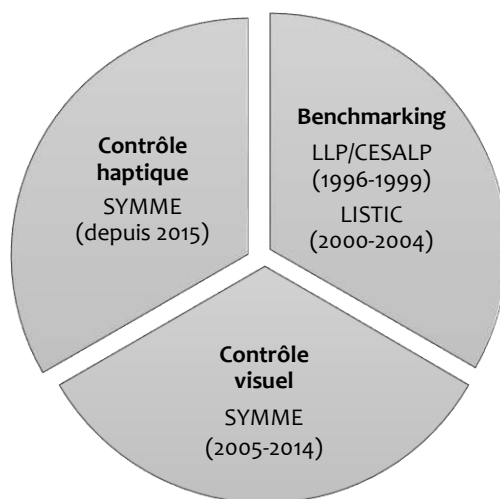
Partie II

ACTIVITES DE RECHERCHE

ACTIVITES DE RECHERCHE

I. INTRODUCTION

La préparation de cette habilitation à diriger des recherches m'a permis, avec la rédaction de ce document, de synthétiser mes activités de recherche. Celles-ci ont principalement couvert trois domaines principaux : le **benchmarking**, le **contrôle visuel** et le **contrôle haptique des produits**. Ces activités ont d'abord été menées au laboratoire LLP/CESALP, au laboratoire LISTIC et au laboratoire SYMME de l'Université de Savoie.



Les activités de recherche sont présentées dans cette partie, d'abord avec une **description synthétique des résultats obtenus** (& II), puis avec une **description plus détaillée** pour chacun des domaines (& III, & IV et & V). Je décris ensuite mes perspectives de recherche (& VI). Les trois publications, annexées à ce document, illustrent enfin quelques résultats que nous avons diffusés dans les trois domaines.

Mes activités de recherche, bien que couvrant des domaines d'application différents, ont en commun d'apporter des solutions à la problématique de **l'identification des bonnes pratiques et de leur formalisation** (d'où le titre choisi pour ce dossier).

C'est le cas évidemment du benchmarking qui, comme nous le verrons plus loin, se fonde sur le principe même de l'utilisation par l'entreprise de bonnes pratiques pour améliorer sa performance. Mais c'est aussi le cas du contrôle sensoriel des produits (visuel et haptique) qui implique l'élaboration d'un standard incluant de bonnes pratiques à faire assimiler et partager par l'ensemble des contrôleurs.

C'est enfin le cas de la gestion de l'information, sur lequel je travaille actuellement, qui m'amène à me poser la question de savoir si, avec le développement des outils numériques collaboratifs dans l'entreprise, de nouvelles bonnes pratiques ne sont pas à inventer.



Ma thèse (soutenue fin 1991) proposait une méthode de diagnostic d'une entreprise à partir d'une analyse de son système d'information. Celui-ci était décrit en listant l'ensemble des relations d'échange s'établissant entre les fournisseurs et utilisateurs internes ou externes à l'entreprise, puis était analysé en comparant le fonctionnement de ces relations par rapport à un fonctionnement idéal. Sans explicitement le dire, la méthode que je proposais présentait ce modèle de fonctionnement, décrit dans le modèle Olympios (Braesch, 1989), **comme une bonne pratique à généraliser** sur l'ensemble des relations d'échange de l'entreprise. L'hypothèse que j'avais retenue était celle de considérer que de très nombreux problèmes relevés dans l'entreprise trouvent leur origine dans les dysfonctionnements de certaines relations d'échanges entre collaborateurs (10 types de dysfonctionnements possibles) et qu'une amélioration de la performance peut rapidement être obtenue en corrigeant ces dysfonctionnements.

Mes travaux se sont ensuite poursuivis sur le benchmarking dont l'objectif est d'améliorer la performance d'une entreprise en copiant (et en les adaptant au besoin) les meilleures pratiques industrielles (**best practices**) à l'origine de sauts de performance significatifs.

J'avais relevé que les entreprises étaient nombreuses à juger la méthode comme indispensable pour obtenir une amélioration radicale de leur performance, mais qu'elles étaient également nombreuses à faire état des difficultés à l'appliquer. Mes premiers travaux, menés avec Gülçin Büyükoçkan (en DEA en 1996, puis en thèse jusqu'en 1999) sur la formalisation d'un processus de benchmarking nous avaient conduit à noter que l'une de ces difficultés était pour l'entreprise d'identifier de bonnes pratiques et celle de les déployer pour obtenir une amélioration de performance.

Cela m'a conduit, d'abord avec Thierry Siebenborn (en thèse jusqu'en 2005), puis avec Vincent Bronet (en thèse jusqu'en 2006), à proposer **une méthode définissant et représentant de bonnes pratiques, les comparant entre elles en vue de leur déploiement** dans le cadre de la réalisation d'un benchmarking interne. Nos propositions ont été appliquées pour le déploiement des bonnes pratiques d'un processus Six Sigma sur les trois sites de l'entreprise Tecumseh Europe. Une autre application de ce travail a également concerné les bonnes pratiques associées à la mise en œuvre d'une démarche MSP.

Enfin, le club Benchmarking Haute Savoie, que j'ai animé de 1999 à 2005 en collaboration avec le MFQ (Mouvement Français pour la Qualité) et le CPHS (Centre Productique Haute Savoie), avait également placé l'identification et le partage de bonnes pratiques comme un point de départ à toutes les actions de benchmarking que nous avons accompagnées.

Notre travail a montré l'intérêt d'identifier de bonnes pratiques pour l'amélioration de la performance, mais également et surtout, l'intérêt de les formaliser et les standardiser pour leur rendre leur déploiement efficace. Cela m'a amené, à partir de 2005, à m'intéresser à des secteurs où de bonnes pratiques étaient présentes et absolument nécessaires, mais encore trop peu formalisées pour être déployées efficacement.

C'est le cas du contrôle visuel de produits où la définition de bonnes pratiques standardisées, ainsi que leur partage et leur appropriation par l'ensemble des contrôleurs, sont déterminantes pour garantir la qualité des résultats d'un contrôle. J'ai donc travaillé sur l'analyse des bonnes pratiques dans ce domaine. Avec Maurice Pillet et Anne Sophie Guerra (en thèse jusqu'en 2008) et dans le cadre d'une collaboration avec l'entreprise Patek Philippe, nous avons d'abord travaillé sur la définition **des bonnes pratiques à utiliser par les contrôleurs pour l'inspection visuelle des produits**.

Avec Nathalie Baudet (thèse soutenue en 2012) dans le cadre d'une collaboration avec l'Ecole Nationale Polytechnique de Lausanne (projet DASuVA puis MeSurA), nous avons ensuite ciblé les pratiques à utiliser **pour évaluer des anomalies visuelles** détectées lors de l'inspection. L'ensemble de ces bonnes pratiques est aujourd'hui intégré dans la méthode que nous avons proposée pour accompagner une entreprise dans la standardisation du contrôle visuel de ses produits. Cette méthode a d'abord été appliquée dans les entreprises Fournier, ST Dupont, NTN SNR et Eudica, mais elle a depuis été reprise et appliquée dans un grand nombre d'entreprises horlogères.

J'ai souhaité suivre le même type de recherche dans le domaine haptique des produits et faire émerger un nouveau champ de compétences au laboratoire SYMME sur ce domaine.

La collaboration que nous avons établie avec l'entreprise INEVA et le laboratoire ICube de l'INSA Strasbourg (thèse de Bruno Albert depuis 2015) vise à **proposer de bonnes pratiques dans le domaine du contrôle haptique**, celles-ci devant être suffisamment génériques pour être applicables à tous types de produits. Nous créons une base de connaissances associée à ce type de contrôle, cette base étant structurée à l'aide d'ontologies. Un logiciel, utilisant cette base de connaissances, est en cours de développement et assistera une entreprise dans la définition de son standard qualité dans le contrôle des produits par toucher. Ce standard inclura la proposition des pratiques à utiliser (stratégies d'exploration, méthodes d'évaluation, méthodes de décision sur la conformité des produits, etc.). Une application de ce travail a déjà été réalisée dans l'entreprise Piaget.

Dans les deux cas (visuel et haptique), ce qui me permet aujourd'hui de qualifier les pratiques que nous avons proposées de « bonnes », ce sont à la fois :

- leur efficacité : elles contribuent à réduire la variabilité des résultats des contrôles
- leur généricité : elles sont applicables, moyennant des adaptations mineures, au contrôle de tous types de produits.

Plus récemment, après avoir travaillé sur l'identification et la formalisation de bonnes pratiques, j'ai souhaité également travailler sur la **proposition de nouvelles pratiques dans le domaine de la gestion de l'information**, un domaine confronté à la nécessité d'imaginer de nouvelles pratiques pour améliorer la performance de l'entreprise. Les bonnes pratiques utilisées jusqu'à maintenant se révèlent en effet inadaptées pour gérer convenablement un système d'information qui, avec le déploiement important de nouveaux outils de gestion de l'information (collaboratifs pour la plupart), est en constante évolution.

Avec Benoît Giraut (thèse à soutenir mi 2018) et dans le cadre du projet AdeQuate, nous menons actuellement un travail sur les pratiques actuellement utilisées par plusieurs entreprises industrielles (Fournier, Aventics et Allergan) pour gérer leurs informations. La question que nous nous posons est de savoir si l'adaptation des pratiques existantes suffit ou s'il ne convient pas d'innover en proposant de nouvelles pratiques en rupture avec celles utilisées jusqu'à présent et compatibles avec les nouvelles manières de gérer l'information. La piste pour l'instant retenue est celle de proposer, en faisant l'analogie avec ce que propose le Lean Manufacturing, des pratiques visant à contraindre certains flux d'information dans le but de réduire les gaspillages et de créer de la valeur à l'information.

Actuellement, le laboratoire SYMME est organisé autour de deux axes de recherche : « Matériaux, structures et instrumentation intelligents / Technologies pour la santé » et « Qualité industrielle ». C'est sur ce dernier axe que sont positionnées mes activités de recherche avec le travail que je mène sur les pratiques dans le domaine du contrôle visuel et le contrôle haptique des produits.

Avec cette habilitation, mon objectif est d'étendre ce travail réalisé jusqu'à présent en créant de nouveaux projets de recherche autour de la problématique de l'identification, formalisation et déploiement de **bonnes pratiques dans le domaine de la qualité sensorielle des produits**.

II. PRESENTATION SYNTHETIQUE DES RESULTATS

Cette partie présente de façon résumée les principaux résultats de ma recherche dans les trois domaines (benchmarking, contrôle visuel et contrôle haptique). Ces résultats seront ensuite repris dans la partie III pour être décrits de manière beaucoup plus détaillée.

Benchmarking

Mes premiers résultats en recherche font directement suite aux travaux réalisés dans le cadre de ma thèse soutenue en Décembre 1991 et qui portait sur la proposition d'un modèle de conception d'un système d'information dédié aux entreprises manufacturières (modèle Olympios). En utilisant les concepts de ce modèle, introduits par Christian Braesch dans sa thèse en 1989, j'avais développé un outil, appelé Olympios-Audit, détectant et hiérarchisant les principaux dysfonctionnements d'une entreprise à travers son système d'information. La méthode consistait à décrire les principales relations d'échange entre collaborateurs de l'entreprise, puis à les comparer à un modèle de fonctionnement appelé SIFU dans le modèle Olympios (Système d'Information Fournisseur-Utilisateur).

Cette méthode de diagnostic présentait l'avantage d'être suffisamment générique pour être applicable à tout périmètre d'analyse, d'un service d'une entreprise à une entreprise toute entière, et pour tout champ d'activités, aussi bien pour des activités de production que pour des activités de support.

Dans le même temps, le benchmarking connaissait un essor important dans les entreprises avec l'idée qu'une amélioration radicale de performance pouvait être rapidement obtenue en adoptant (en les adoptant au besoin) de meilleures pratiques ayant prouvé leur efficacité dans d'autres entreprises.

La mise en œuvre de cette démarche suppose qu'au préalable un diagnostic précis de la performance de l'entreprise soit réalisé et que les résultats de ce diagnostic puissent être comparés à ceux provenant d'autres entreprises. C'est ce qui m'a amené à proposer et piloter le projet « Benchmarking franco-suisse » dans le cadre du programme Intereg II, avec l'objectif de faire évoluer l'outil Olympios Audit pour le rendre utilisable lors de la réalisation de la première étape d'un benchmarking.

Mon travail de recherche s'est poursuivi avec une étude détaillée des différents types de benchmarking. Cela m'a amené, avec Gülçin Büyükoçkan dont j'encadrais la thèse à proposer un nouveau type de benchmarking, le benchmarking coopératif, qui pallie certaines difficultés fréquemment rencontrées dans la réalisation de la démarche (comme par exemple le déséquilibre dans les échanges d'informations entre les partenaires d'un benchmarking) et garantir les améliorations de performance à en attendre.

Nous avons également proposé des méthodes et outils pour accompagner les autres étapes d'un benchmarking qui succèdent à celle du diagnostic de la performance : aide au choix du sujet à benchmarker et des partenaires à impliquer, mise en évidence des écarts de performance entre partenaires, définition des objectifs d'amélioration et choix des actions à mener pour atteindre le niveau de performance souhaité.

Enfin, avec Vincent Bronet, nous avons proposé de nouvelles manières d'identifier de « bonnes pratiques » (ou best practices), de les décrire et de les comparer.

Les résultats de mes travaux sur le benchmarking (détaillés dans la partie III) ont donné lieu à 3 thèses, 5 publications dans des revues internationales, 5 publications dans des revues nationales, 1 chapitre d'ouvrage, 6 communications dans des congrès internationaux et 13 publications dans des conférences à diffusion francophone.

Sur le Contrôle visuel des produits

Sur la base de mes travaux sur les « best practices », j'ai travaillé à partir de 2002 sur l'identification de bonnes pratiques utilisées dans le contrôle visuel d'aspect des produits. Ce travail m'a amené à m'intéresser aux pratiques contribuant à réduire la variabilité des résultats de contrôle observée dans l'entreprise Patek Philippe avec laquelle nous collaborons.

Dans le cadre de la thèse de Anne Sophie Guerra que j'ai co-encadré avec Maurice Pillet de 2005 à 2008, nous avons proposé un nouveau test, le test R^2E^2 , en complément du test R&R (Répétabilité et Reproductibilité), pour aider à déterminer la cause de la variabilité observée et aider au choix des actions correctives à mener pour réduire cette variabilité. Il s'agit avec ce test d'identifier ce qui réduit la part de désaccord généralement observée entre experts et contrôleurs.

Nous avons également formalisé le processus de contrôle visuel en distinguant les trois étapes successives qui composent ce processus : exploration et caractérisation des anomalies, évaluation des anomalies et décision sur la conformité des produits.

Concernant l'étape d'exploration, j'ai proposé une classification des anomalies visuelles avec l'idée qu'une réduction de la variabilité des résultats passait nécessairement par une réduction du nombre de descripteurs à utiliser par les contrôleurs pour décrire les anomalies. La classification proposée, réduite à quatre types de descripteurs génériques, décrit n'importe quelle anomalie présente sur la surface d'un produit.

Dans le cadre du projet DASuVA, nos travaux ont également abouti à la proposition d'une méthode caractérisant une anomalie. Nous sommes parvenus pour cela à établir une liste d'attributs génériques incluant évidemment des attributs de description de l'anomalie, mais aussi des attributs liés aux conditions d'exploration de l'anomalie ainsi que des attributs liés à sa mise en perspective locale et globale sur l'ensemble du produit.

Concernant l'étape d'évaluation, nous avons proposé une méthode qui évalue une anomalie en lui attribuant une intensité globale à partir des valeurs des attributs la caractérisant. Le calcul de cette valeur se fait par une grille lorsque le lien entre ces valeurs d'attributs et la valeur finale d'intensité de l'anomalie est linéaire mais nous avons également étudié comment un réseau de neurones pouvait être utilisé pour effectuer ce calcul dans le cas d'un lien non linéaire.

La méthode (description, caractérisation et évaluation) étant applicable à tout produit et pour tout type d'anomalie, nous avons lancé le projet DASuVA (programme Interreg IV) avec l'objectif de l'appliquer dans différentes entreprises pour différents contextes de contrôle visuel. Notre objectif était également d'examiner comment les méthodes proposées pouvaient être automatisées. Le projet a abouti, dans le cadre du projet MeSurA, à la réalisation d'un prototype, transformé aujourd'hui en un équipement industriel.

Les résultats de mes travaux sur le contrôle visuel (détaillés dans la partie IV) ont donné lieu à 2 thèses, 5 publications dans des revues internationales, 1 publication dans une revue nationale, 9 communications dans des congrès internationaux et 7 communications dans des congrès francophones.

Sur le Contrôle haptique des produits

J'ai souhaité ensuite poursuivre nos travaux en appliquant nos résultats sur le contrôle visuel au contrôle haptique. Ces travaux ont débuté fin 2015 et se font en collaboration avec l'entreprise INEVA de Strasbourg et le laboratoire ICube de l'INSA Strasbourg.

Avec Bruno Albert dont j'encadre la thèse avec Maurice Pillet et Cecilia Zanni Merk depuis 2015, nous travaillons sur la proposition d'une méthode guidant l'entreprise dans la définition d'un standard pour le contrôle tactile de ses produits (sur la base de celle que nous avons proposée pour le contrôle visuel). Ce standard intègre un ensemble de bonnes pratiques à appliquer pour ce type de contrôle (modes de spécification des contrôle, techniques d'exploration, mode de description des sensations, liens entre sensations et descripteurs, évaluation des anomalies, jugement de conformité des produits, etc.).

Notre travail a débuté par une recherche des termes classiquement utilisés pour décrire une sensation tactile lors d'un contrôle par toucher d'un produit. Cette étude a confirmé l'existence d'un très grand nombre de termes (plus de 1800), très différents d'un produit à l'autre et surtout très liés au produit contrôlé. A partir de cette liste de termes, nous avons défini neuf sensations élémentaires tactiles génériques susceptibles de représenter l'ensemble des sensations perçues par un contrôleur. Comme nous l'avons fait pour le contrôle visuel, notre objectif est en effet de diminuer le nombre de descripteurs de manière à réduire la variabilité des résultats des contrôles. Les sensations élémentaires à contrôler ayant été définies, l'entreprise définit ensuite l'ensemble des termes tactiles à utiliser par les contrôleurs pour décrire chaque niveau de sensation perçue. La détection d'une sensation, ainsi que son niveau d'intensité, sont très liés à la manière dont l'exploration est réalisée par le contrôleur. Nous proposons donc, pour chaque sensation, les modes d'exploration (mouvements, zones et effecteur) à privilégier pour détecter au mieux chacune des sensations tactiles élémentaires.

La définition d'un standard requiert pour l'entreprise de détenir, et au besoin pouvoir accéder à une connaissance de tous les éléments à prendre en compte lors d'un contrôle haptique (sensations, récepteurs, effecteurs, modes d'exploration, stimuli, capteurs, tâches, etc.). Nous avons fait le choix d'utiliser des ontologies de domaine pour représenter et structurer cette connaissance. Nous construisons actuellement plusieurs ontologies associées au domaine de la perception tactile. Ces ontologies pourront par la suite être utilisées dans un outil logiciel actuellement en cours de développement.

Les résultats menés sur le contrôle haptique (détaillés dans la partie V) ont donné lieu pour l'instant à 1 publication dans une revue internationale et 3 publications dans des congrès internationaux.

III. RESULTATS DE RECHERCHE EN BENCHMARKING

Cette partie détaille les principaux résultats de ma recherche dans les trois domaines (benchmarking, contrôle visuel et contrôle haptique), et cela en reprenant à chaque fois la même trame : ce qui a été à l'origine de nos travaux, les principaux résultats obtenus et bilan des activités menées et/ou à poursuivre.

1. A l'origine de nos travaux sur le Benchmarking

Au démarrage nos recherches en 1995, la problématique de la performance industrielle donnait déjà lieu à de nombreuses publications. La plupart d'entre elles s'attachaient à décrire de nouvelles démarches/méthodes d'amélioration de la performance (TQM, Kaizen, Hoshin, BPR, etc.) et à présenter comment les utiliser.

En revanche, les entreprises exprimaient de nouvelles exigences sur l'efficacité à attendre de ces démarches (i.e. le niveau de performance plus important à atteindre) et sur leur efficacité (i.e. une optimisation des moyens à fournir pour atteindre ce niveau de performance). D'une performance très longtemps monocritère et axée le plus souvent sur un objectif de réduction de coûts, on est ainsi passé à une performance multicritère couvrant également des objectifs de réduction de délai et surtout d'amélioration de la qualité. Ciblant généralement un ensemble d'activités réduit, les démarches ayant une portée plus globale, axées par exemple sur l'amélioration des processus, ont ensuite été privilégiées. Enfin, les entreprises ont rapidement exprimé l'exigence que cette amélioration soit obtenue dans un délai court et que la performance atteinte puisse être maintenue dans le temps.

C'est ce constat qui nous avait amené à énoncer les nouveaux enjeux de la performance industrielle et de son amélioration (enjeux encore d'actualité aujourd'hui) et que nous avons déclinés en :

- **Amélioration globale et radicale**
- **Performance pertinente et pérenne.**

Nous avons passé en revue quelques démarches d'amélioration existantes et nous nous étions interrogés sur leurs capacités respectives à prendre en compte ces nouveaux enjeux. Nous ne reprendrons ici à titre d'exemple que les résultats d'une enquête que nous avons menée auprès d'une quarantaine d'entreprises de Rhône Alpes sur l'enjeu d'une performance pérenne (51). Les résultats confirmaient la grande difficulté des entreprises à maintenir les améliorations obtenues et à l'incapacité de certaines démarches à être à l'origine d'une performance durable (Figure 2).

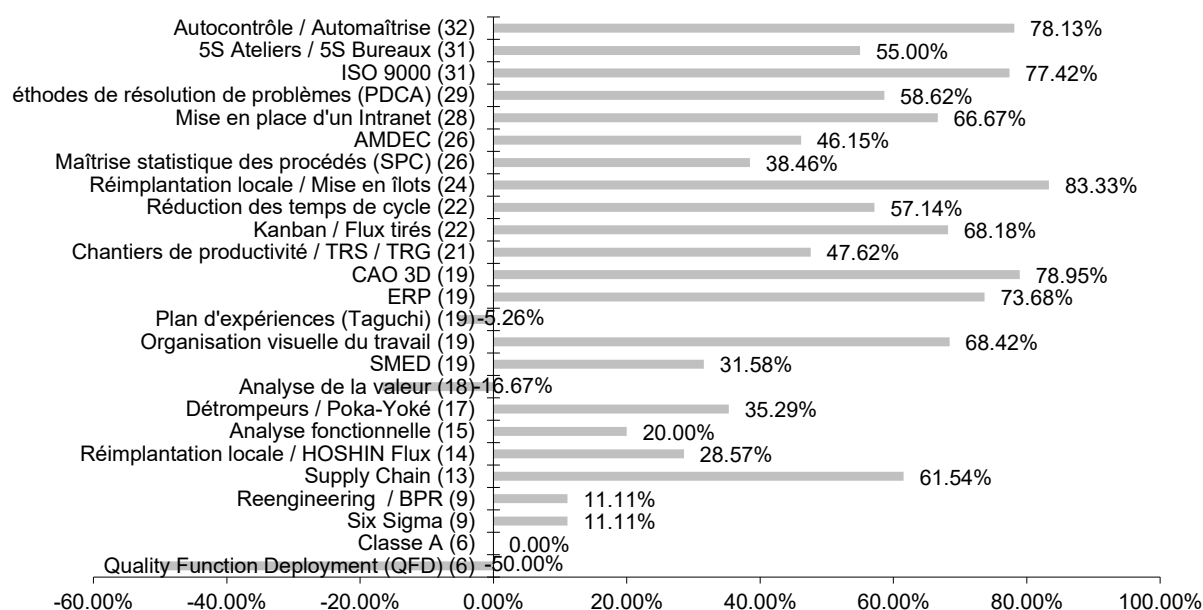


Figure 2. Enquête sur la pérennisation des actions d'amélioration
(% d'entreprises ayant réussi à pérenniser la démarche et l'amélioration obtenue)

Dans (71), nous avons relevé que certaines démarches d'amélioration répondaient efficacement à certains de ces enjeux (Hoshin par exemple pour l'amélioration radicale) mais qu'aucune d'entre elles ne semblait être en capacité d'y répondre à tous simultanément.

Ce n'était en revanche pas le cas du benchmarking, définie comme une *"méthode d'analyse de processus dans laquelle les meilleures pratiques sont identifiées et évaluées comme modèles pour l'amélioration"* (Harrington, 1996) qui donne les moyens à l'entreprise de répondre à l'ensemble de ces enjeux.

Le benchmarking est en effet d'abord considéré comme un moyen de réduire considérablement le délai pour obtenir une amélioration, la finalité d'un benchmarking étant de "copier", en les adaptant au besoin, de bonnes pratiques déjà expérimentées par d'autres.

C'est également l'assurance d'obtenir une performance qui soit pérenne dans le temps, les bonnes pratiques ayant déjà fait preuve de leur efficacité sur la durée.

Le benchmarking apporte également la garantie que l'amélioration engagée soit pertinente, les bonnes pratiques envisagées étant généralement étayées de résultats effectifs de gains de performance (les « benchmarks »).

Enfin, le benchmarking se basant le plus souvent sur une comparaison de pratiques associées à des processus, le benchmarking induit nécessairement une approche globale de la performance de l'entreprise.

Utilisé au départ par l'entreprise Xerox qui cherchait à réduire ses coûts de production, le benchmarking a été largement diffusé à partir des années 80 dans le domaine du génie industriel (Camp, 1992). Mais, malgré le succès de la démarche aux Etats Unis (près de 300 entreprises adhérentes à l'International Benchmarking Clearinghouse¹², ce n'est vraiment qu'à partir de 1995 que le benchmarking a véritablement été appliqué en Europe.

Quelques années plus tard, de nombreuses entreprises faisaient état de sérieuses difficultés à mettre en œuvre la démarche. Parmi les causes les plus souvent citées, on relevait évidemment le problème de la confidentialité des informations stratégiques à partager, mais également la difficulté à trouver des partenaires avec qui échanger, le manque d'outils disponibles pour accompagner la démarche, mais aussi et surtout, le manque de formalisation du processus pour mettre en œuvre cette démarche.

C'est ce constat qui nous a amené à m'intéresser au benchmarking avec un travail réalisé avec Gülçin Büyükoçkan, d'abord dans le cadre de la préparation de son DEA en 1996, puis de celui de son doctorat de 1997 à 1999 (72), ainsi que par Melhi Er en DEA en 1998. Le travail a été poursuivi avec Géraldine Scotton en DEA en 2001, avec Thierry Siebenborn (71) en doctorat de 2002 à 2005, et enfin avec Vincent Bronet en DEA en 2002 et en doctorat de 2003 à 2005 (70).

Nos résultats sur le benchmarking ont été publiés dans 5 revues internationales (8 à 12), 6 revues à diffusion nationale (14 à 19), 1 chapitre d'ouvrage (21) et 6 congrès internationaux (34 à 39), 13 conférences francophones (51, 52, 54 à 58, 61 à 66).

2. Présentation des résultats

Notre premier travail a d'abord été d'établir un état de l'existant sur la démarche de benchmarking, et en particulier de ses différentes évolutions successives. Il a été ensuite de montrer qu'un benchmarking coopératif, par rapport à d'autres types de benchmarking, pouvait être à l'origine d'améliorations de performance significatives et surtout atteignables pour l'entreprise. Il a été enfin de proposer un ensemble d'outils et de méthodes, dédiés aux PMI/PME, pouvant être utilisés de manière cohérente pour certaines étapes d'un benchmarking. Nous résumons ici quelques résultats de ce travail.

¹² <https://www.apqc.org/>

2.1. Définition du benchmarking

Nous avons recensé (72) de très nombreuses définitions du benchmarking dans la littérature. Les plus nombreuses d'entre elles ont été proposées dans des articles publiés dans la revue *Benchmarking : an International Journal* (*Benchmarking for Quality Management & Technology* avant 1999). Le plus souvent, le benchmarking est défini comme un outil de comparaison de performance d'un système quelconque (entreprise, service, activité, etc.) par rapport à d'autres systèmes (concurrents, best in class, autres services, etc.). Pour autant, nous avons montré qu'aucune définition consensuelle ne parvenait à s'imposer, les définitions proposées correspondant plutôt à des évolutions successives du benchmarking.

Nous avons synthétisé ces évolutions en trois étapes importantes :

- De benchmark à benchmarking

De nombreuses publications mettent en effet l'accent sur le rôle du benchmark dans la démarche, un benchmark pouvant être défini comme « une valeur physiologique ou biologique de référence par rapport à laquelle la performance est comparée ».

Mais réaliser un benchmarking ne se limite cependant pas pour une entreprise à se comparer à des benchmarks car, comme le rappelle l'American Productivity & Quality Center (APQC), « Benchmarking is not the same as Benchmark! Benchmarks are performance measures. Benchmarking is action ». Après la première définition du benchmarking formulée par Kearns (1986) qui définit le benchmarking comme « un processus continu et systématique d'évaluation des produits, services et méthodes par rapport à ceux des concurrents les plus sérieux ou des entreprises reconnues comme leaders », les définitions qui suivront mettront davantage l'accent sur la recherche des méthodes à l'origine des benchmarks. Citons par exemple celle très connue de Camp (1989) où le benchmarking est présenté comme « la recherche des méthodes les plus performantes pour une activité donnée, permettant de s'assurer une supériorité ».

L'évaluation par rapport à des valeurs de référence, les benchmarks, induit donc une action, le benchmarking, dont l'un des objectifs essentiels est de rechercher les bonnes méthodes à l'origine de ces valeurs, les best practices.

- D'une évaluation de produits/services/activités à une évaluation de processus

Le processus désignant un ensemble structuré d'activités finalisées, le benchmarking a donc tout naturellement évolué vers un rôle d'évaluation et d'amélioration de processus. Balm (1994) le définit par exemple comme « une action continue de comparaison d'un processus », tout comme Featherman et Wright (1994) pour qui le benchmarking est « une méthode d'analyse de processus dans laquelle les meilleures pratiques sont identifiées et évaluées comme modèles pour l'amélioration »¹³.

Le benchmarking s'applique ainsi à tous les processus clés d'une entreprise et vise à la recherche et l'utilisation de bonnes pratiques liées à ces processus.

- De benchmarking à Benchmarking

La performance des processus étant très orientée sur la satisfaction du client, le benchmarking a connu une nouvelle évolution liée à la nécessité d'identifier et de mettre en œuvre des bonnes pratiques contribuant à mieux prendre en compte les attentes des clients. À l'image de la qualité désignant la régularité de la fiabilité des produits qui s'est transformée en Qualité pour faire référence à la qualité totale du point de vue du client, Balm (1994) suggère de faire évoluer le benchmarking vers le Benchmarking en mettant l'accent sur la nécessité de comparer la performance des systèmes en se basant sur des mesures en lien direct avec la satisfaction des clients, qu'ils soient internes ou externes.

Le Benchmarking, orienté sur l'amélioration des processus, se base sur une évaluation comparative de performance privilégiant des mesures orientées clients.

¹³ Cité dans <http://www.apqc.org>

Il n'est donc pas surprenant, compte tenu de ces évolutions successives, qu'aucune définition unique du benchmarking n'ait réussi à s'imposer. Spendolini (1992) avait par exemple recensé 59 définitions différentes et les avait synthétisées sous forme d'un tableau à choix permettant d'aboutir à une définition possible (Table 1).

1. Processus	2. Continu A long terme	3. Systématique Structuré Formel Analytique Organisé
4. Evaluation Compréhension Mesure Comparaison	5. Pratiques Produits Services Processus Opérations Fonctions	6. Organisations Compagnies Institutions
7. Reconnu Admis Identifié	8. Meilleure dans la classe Classe mondiale Représentant des meilleures pratiques	9. Comparaison organisationnelle Amélioration de la performance Connaissance des meilleures pratiques Développement des objectifs de processus Etablissement des priorités et des cibles

Table 1. Une définition du benchmarking (Spendolini, 1992)

Parmi ces définitions possibles, et en prenant en compte ses évolutions, le benchmarking doit être défini aujourd'hui selon moi comme « **un processus continu et structuré pour l'évaluation des pratiques d'organisations reconnues comme représentantes des meilleures pratiques au service de l'amélioration de la performance** ».

2.2. Le benchmarking coopératif : un nouveau type de benchmarking

Je ne détaillerai pas ici tous les types de benchmarking existants. Leurs spécificités, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients, sont listés dans de nombreuses publications (Balm 1994) (Bogan et English, 1994) (Boxwell, 1994) (Camp, 1995) (Juran, 1994) (Karlöf et Östblom, 1994) (Ohinata, 1994) (Spendolini, 1992) (Watson, 1992).

Parmi les types les plus souvent cités, on trouve ainsi :

- Le *benchmarking interne*, visant à comparer un produit, un service, une activité ou un processus à l'intérieur d'une même organisation.
- Le *benchmarking concurrentiel*, visant à comparer un produit ou un service avec celui de ses concurrents.
- Le *benchmarking fonctionnel*, visant à comparer une fonction, le plus souvent génératrice d'une valeur ajoutée, avec celle d'une autre organisation appartenant au même secteur d'activités et non nécessairement concurrente.
- Le *benchmarking générique*, visant à comparer un processus avec celui d'autres organisations appartenant à des secteurs d'activités différents.
- Le *benchmarking produit*, visant à comparer un produit avec d'autres entreprises qui, soit sont concurrentes, soit utilisent une technologie similaire et/ou s'adressent aux mêmes clients.
- Le *benchmarking processus*, visant à comparer un processus, le plus souvent critique, avec celui d'autres organisations reconnues comme leaders et non nécessairement concurrentes.
- Le *benchmarking stratégique*, visant à recueillir les meilleures pratiques des entreprises, le plus souvent concurrentes, avec la mise en évidence des objectifs stratégiques associés à ces pratiques.

L'analyse que nous avons faite de ces types de benchmarking est détaillée dans (72).

Le choix de tel ou tel type de benchmarking se fait bien évidemment en fonction de l'objectif recherché par l'entreprise, mais nous pensons que ce choix respecte également une chronologie très liée aux évolutions successives du benchmarking évoquées précédemment (Figure 1). **Cela nous a amené à proposer un nouveau type de benchmarking, le benchmarking coopératif, qui doit se situer selon nous comme l'ultime étape de cette chronologie.** Dans (72), nous listons l'ensemble des conditions à réunir pour mettre en œuvre ce type de benchmarking (en prenant par exemple le principe de la théorie des jeux) et les résultats à en attendre.

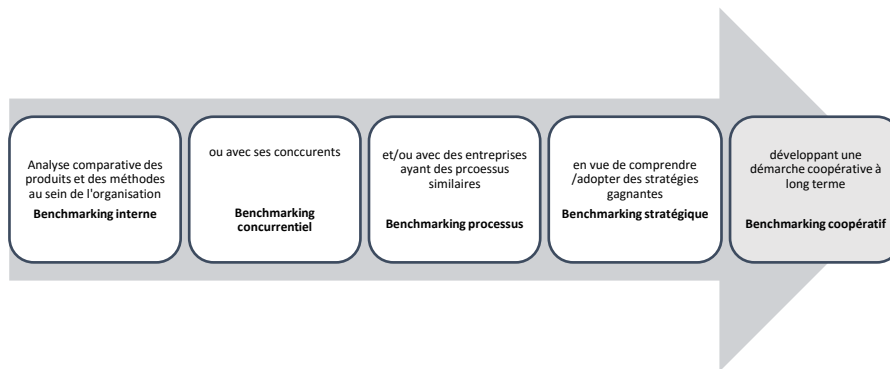


Figure 1. Vers un benchmarking de type coopératif

2.3. De nouveaux outils et méthodes pour le benchmarking

De nombreuses publications proposent des modèles décrivant les différentes étapes d'un processus de benchmarking (Bemowski, 1991) (Bogan, 1994) (Boxwell, 1994) (Ohinata, 1994) (Shetty, 1993). Ces modèles sont détaillés dans (72). Le nombre d'étapes et leurs portées respectives varient d'un modèle à l'autre mais nous avons relevé que ces modèles avaient en commun de décrire le benchmarking à travers un enchaînement de cinq phases principales :

- 1) Phase 1 : diagnostic interne de la performance de l'entreprise
- 2) Phase 2 : Choix du sujet à benchmarker et des partenaires à impliquer
- 3) Phase 3 : Mise en évidence des écarts de performance entre partenaires
- 4) Phase 4 : Définition des objectifs d'amélioration et mise en œuvre des plans d'actions atteignant le niveau de performance souhaité
- 5) Phase 5 : Suivi et ajustement des actions d'amélioration

Parmi ces outils et/ou méthodes, nous avons cité :

- Pour la phase 1 : méthodes et outils d'analyse de processus (logigramme, diagramme de circulation, ...), d'amélioration de la qualité (Pareto, Ishikawa, SPC, AMDEC, diagramme des Affinités, ...), d'évaluation économique (COQ, PC, VAD, ...), ou autres (Kepner Tregoe, 8D, MIC-MAC, ...).
- Pour la phase 2 : méthodes telles que QBD et AHP, outils graphiques de positionnement, méthodes de collecte de données (sources d'informations internes et externes à l'entreprise, questionnaires, ...), et méthodes à base de modèles de représentation des connaissances (KADS, modèles logiques, ontologies, ...).
- Pour la phase 3 : outils graphiques (diagramme de dispersion par exemple), méthodes d'estimation et de prévision des écarts de performance (méthode IM, diagramme de dispersion, courbe en « Z », ...).
- Pour la phase 4 : méthodes de conception de plans d'actions (PDPC, diagramme des alternatives, ...), de planification des actions (Gantt, CPM, PERT, ...), de mise en œuvre des actions (cercles de qualité, méthodes de gestion de projets, ...).

- Pour la phase 5 : méthodes d'accompagnement à la mise œuvre des actions (formation des opérateurs, campagnes d'affichage, ...), outils destinés à suivre les résultats de ces actions (tableaux de bord).

L'analyse de ces méthodes et outils m'avait conduit à relever que :

- Le processus de benchmarking est difficile à mettre en œuvre (d'après l'enquête de l'APQC, le benchmarking est lui-même l'un des processus les plus souvent benchmarkés)
- Si les outils et méthodes proposés dans la littérature sont nombreux pour la première phase et la dernière phase, l'aide se révèle en revanche beaucoup plus limitée pour les trois autres phases.
- L'hétérogénéité des outils et méthodes proposés empêche de les associer de façon cohérente et de façon simple pour couvrir le processus de benchmarking dans sa totalité.

A partir de là, **nous avons proposé un ensemble d'outils et de méthodes simples pour supporter de manière cohérente l'ensemble des phases d'un processus de benchmarking coopératif.** Je ne présenterai ici les outils/méthodes des 3 premières phases.

2.3.1. Méthode proposée pour la phase 1 : diagnostic de la performance de l'entreprise

Nous avons proposé d'utiliser la méthode de diagnostic développée par le LLP/CESALP (Maire, 1991), basée sur le modèle d'organisation OLYMPIOS (Braesch, 1989) qui modélise le fonctionnement d'une relation d'échange entre un utilisateur et un fournisseur, internes ou externes à l'entreprise (Figure 2).

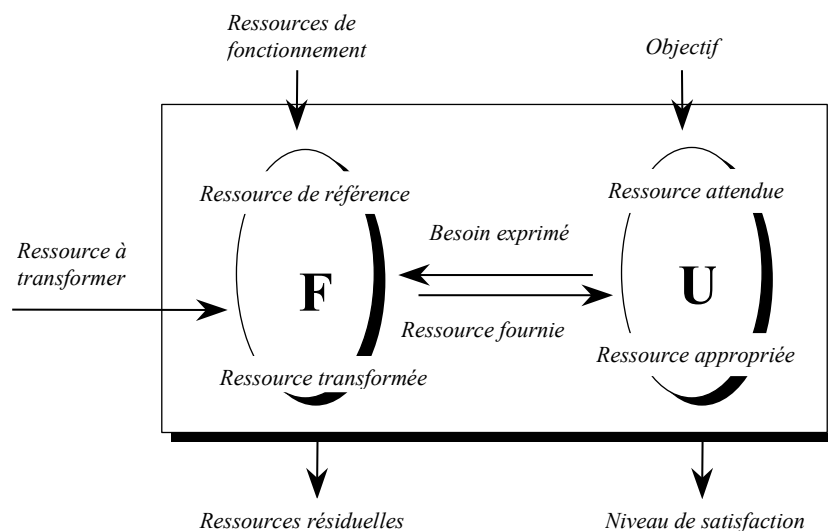
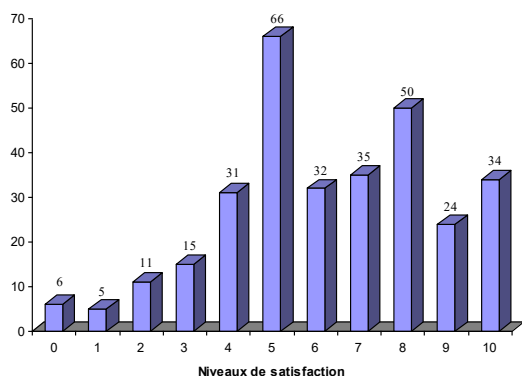


Figure 2. OLYMPIOS : Modélisation d'une relation d'échange

Le diagnostic consiste à repérer, puis caractériser l'ensemble des relations d'échange qui dysfonctionnent (les points à améliorer dans l'entreprise) ou celles qui donnent parfaitement satisfaction aux utilisateurs (les points à pérenniser dans l'entreprise). La méthode est détaillée dans (12).

Les données ainsi collectées peuvent ensuite être analysées de manière à identifier des similitudes ou des différences avec d'autres entreprises.

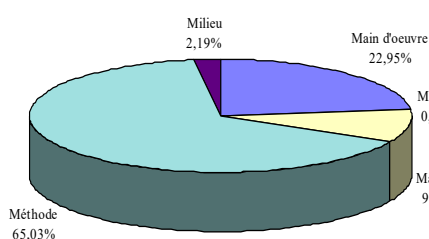
La méthode donne, dans un premier temps, une vue globale de la performance de l'entreprise. Celle-ci s'exprime par le diagramme décrivant la répartition des niveaux de satisfaction, et dont la Figure 3 (exemple tiré d'un diagnostic réalisé dans une PME de Haute Savoie). La forme du diagramme obtenu est à rapprocher d'une forme en " J " pouvant décrire une performance optimale (un nombre très élevé de 10 exprimant des besoins d'amélioration totalement satisfaits, mais également quelques niveaux à 0 exprimant de nouveaux besoins pour poursuivre l'amélioration).



Sur cet exemple, les ressources sont considérées de qualité moyenne par leurs utilisateurs puisque le niveau de satisfaction moyen est de 6,21 / 10. Cette valeur s'explique par un nombre élevé de niveaux de satisfaction égaux à 5 (66 apparitions). Les utilisateurs ne sont visiblement pas satisfaits des ressources qui sont mises à leur disposition.

Figure 3. Répartition des niveaux de satisfaction

La répartition des points d'amélioration par type d'anomalie, dont la Figure 4 donne un exemple, complète cette première analyse en proposant une première caractérisation de la performance de l'entreprise. Cette représentation est à rapprocher de celles des concurrents directs de l'entreprise.



Sur cet exemple, les anomalies les plus fréquentes sont de type "Méthodes", ce qui est généralement le cas. En revanche, ce qui est particulier ici, c'est la proportion très importante de la catégorie "Main d'œuvre" qui englobe à elle seule presque 1/4 des problèmes. Cette proportion est beaucoup plus élevée que celles habituellement rencontrées dans d'autres diagnostics.

Figure 4. Répartition par « M » des points d'amélioration

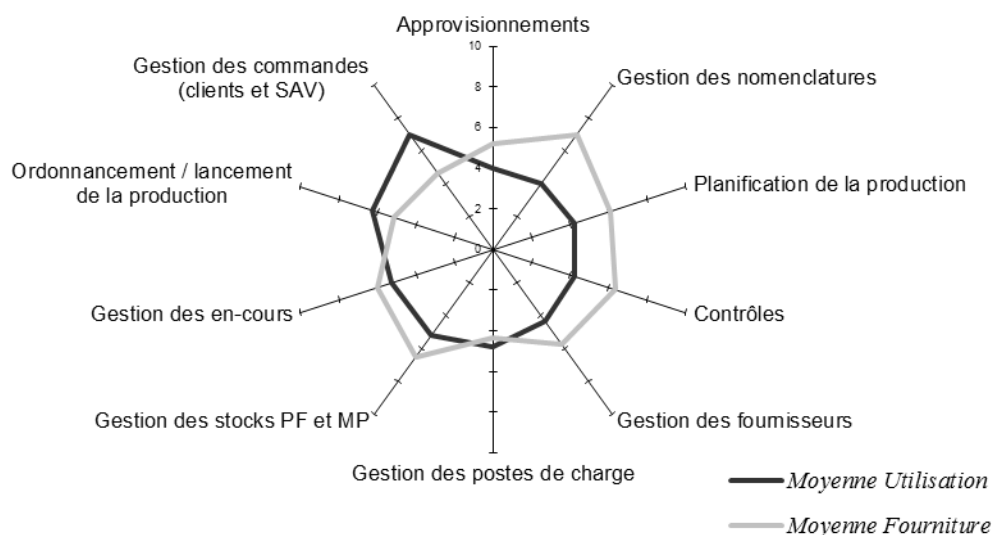
Une mise en évidence des domaines les plus critiques peut ensuite être obtenue par agrégation des points d'amélioration qui ont été relevés au cours du diagnostic. Les critères utilisés dépendent des objectifs recherchés par le diagnostic : agrégation par sous-paragraphes des modèles d'assurance qualité ISO 9000, par collaborateurs pour mettre en place des dynamiques d'amélioration continue, par domaines d'activités pour définir les domaines critiques où des efforts d'investissement et/ou de formation devront être importants, etc. Cette agrégation aboutit à la construction d'une liste d'axes d'amélioration dont la Table 2 donne un exemple. La criticité affectée à chaque axe est calculée à partir de la fréquence d'apparition, de la sévérité, et de l'indice de non-détection des points d'amélioration qui lui sont attachés.

AXES D'AMELIORATION GLOBAL	NOMBRE de	CRITICITE
Classement par criticité décroissante	POINTS D'AMELIORATION	(en %)
Communication interne insuffisante	42	99,98
Gestion des stocks MP et PF insuffisante	27	99,88
Suivi de production insatisfaisant	25	99,64
Informations sur produits insuffisantes	19	97,49
Mauvaise définition des besoins en informatique	13	94,31
Maîtrise de la qualité insuffisante	13	84,35
Planification de la production insatisfaisante	19	83,18
Manque d'ouverture sur de nouvelles méthodes	10	56,40
Gestion des moyens de production insuffisante	8	55,71
Données comptables non fiables	7	41,64

Sur cet exemple, les premiers axes d'amélioration sont des points très critiques pour cette entreprise. C'est le cas de la communication interne qui explique la forte proportion d'anomalies de type « Main d'œuvre » mise en évidence par la Figure 4.

Table 2. Liste des axes d'amélioration

D'autres résultats peuvent ensuite être obtenus pour affiner davantage le diagnostic. La Figure 5 montre par exemple le diagnostic réalisé sur les principales activités d'une gestion de production de l'entreprise. Le diagramme obtenu présente, pour chacune de ces activités, le niveau de satisfaction moyen attribué aux ressources utilisées et le niveau de satisfaction moyen attribué aux ressources fournies. Une autre analyse complémentaire peut être également menée concernant le rapport entre ces niveaux.



Sur cet exemple, la performance de la gestion de production est évaluée à 5/10. Des décalages importants sont constatés entre les niveaux de satisfaction donnés par les utilisateurs des ressources par rapport à ceux donnés par les fournisseurs de ces ressources. C'est le cas de l'ordonnancement/lancement (respectivement 6,27 et 5,15) et surtout de la gestion des commandes clients et SAV (respectivement 7 et 4,65).

Figure 5. Diagnostic des activités de gestion de production

Nous avons également décrit (12, 34, 35 et 66) comment d'autres méthodes d'analyse de données pouvaient être utilisées pour aboutir à une représentation plus détaillée de la performance de l'entreprise.

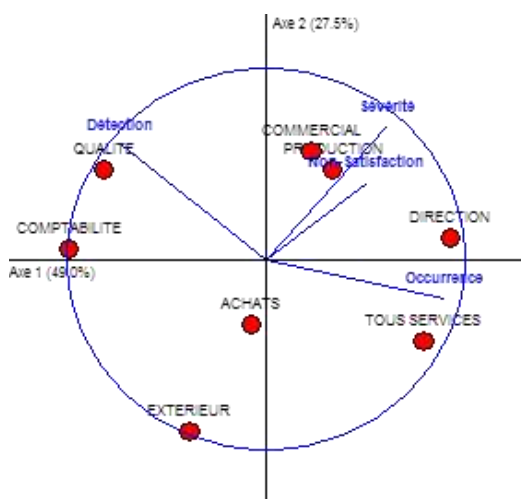
L'analyse lexicale révèle par exemple avec beaucoup de rapidité et d'efficacité les points faibles et points forts significatifs de l'entreprise. La Table 3 montre l'exemple d'un résultat obtenu à partir d'un lexique composé d'un ensemble de points d'amélioration.

Mot observé	Nombre d'occurrences	Niveau de Satisfaction
Formation	25	2.40
Contrôles	6	2.67
Prévision	10	2.80
Capacité	6	2.83
Qualité	13	3.00
Temps opératoire	19	3.26
Délai	6	3.33
Plan de production	7	3.86
Client	18	3.89

La formation, 25 fois cités, apparaît comme le point faible majeur de l'entreprise X avec un niveau de satisfaction moyen de 2.40 sur 10.

Table 3. Résultats d'une analyse lexicale

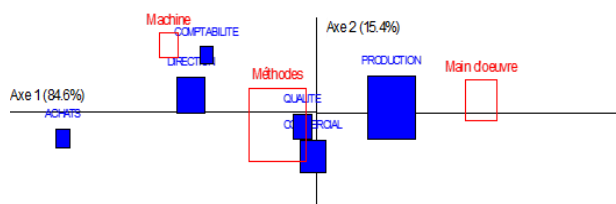
L'analyse en composantes principales peut également être utilisée pour caractériser la performance de l'entreprise en mettant en évidence certaines différences significatives. La Figure 6 montre un exemple de résultat de ce type d'analyse.



Les deux premières composantes principales représentent respectivement 49% et 27,5% de la variation des données. Les composantes “Sévérité” et “Non-satisfaction” sont corrélées positivement, “Détection ” et “Occurrence” sont corrélées négativement et “Sévérité” et “Détection ” ne sont pas corrélées. En ce qui concerne l'analyse des individus, la “Qualité ” se démarque des “Autres services”.

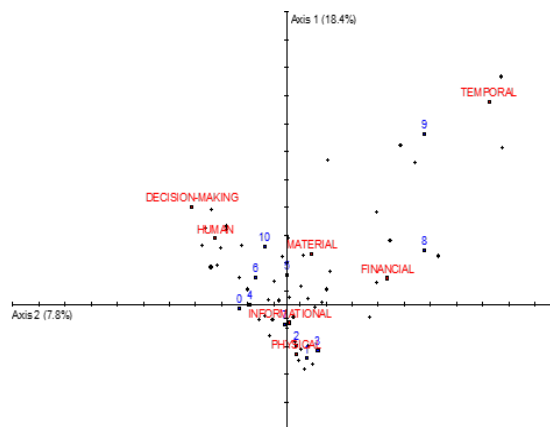
Figure 6. Un cercle de corrélation obtenu par ACP

De la même manière, l'analyse factorielle de correspondances peut également être réalisée sur les données collectées à partir de notre méthode de diagnostic. Les Figure 7 et Figure 8 montrent deux exemples de résultats obtenus avec ce type d'analyse.



On note une part équivalente des problèmes de type Méthodes dans chaque section, ainsi que la prédominance des problèmes de type Machine dans les sections Comptabilité et Direction.

Figure 7. AFC - Liaisons entre domaines d'activités et types de « M » des dysfonctionnements



Les ressources de type Temps sont peu représentatives des points à améliorer dans l'entreprise (éloignées du centre) avec un niveau de satisfaction élevé (moyenne à 8.40), au contraire des ressources de type Information (très proches du centre) avec un niveau de satisfaction faible (4.88).

Figure 8. AFC - Liaisons entre types de ressources et types de points d'amélioration

Les analyses détaillées se révèlent très utiles pour montrer les particularités de la performance d'une entreprise, et ainsi préparer la deuxième phase du benchmarking qui consiste à déterminer plus en détail le sujet et les partenaires possibles d'un benchmarking.

Mais pour que plusieurs entreprises puissent envisager de réaliser une analyse comparative de leurs performances, il est indispensable de disposer d'un même modèle de représentation de leurs performances.

Le modèle que nous avons développé s'inscrit dans la logique de déploiement de la performance en donnant la possibilité de rendre compte d'une évaluation de la performance d'un niveau global à un niveau local (et réciproquement) et ceci dans 4 directions (Figure 9).

Au final, et sur les trois niveaux, la représentation que nous proposons regroupe 14 vues différentes de la performance de l'entreprise, chacune donnant une image particulière de la performance de l'entreprise.

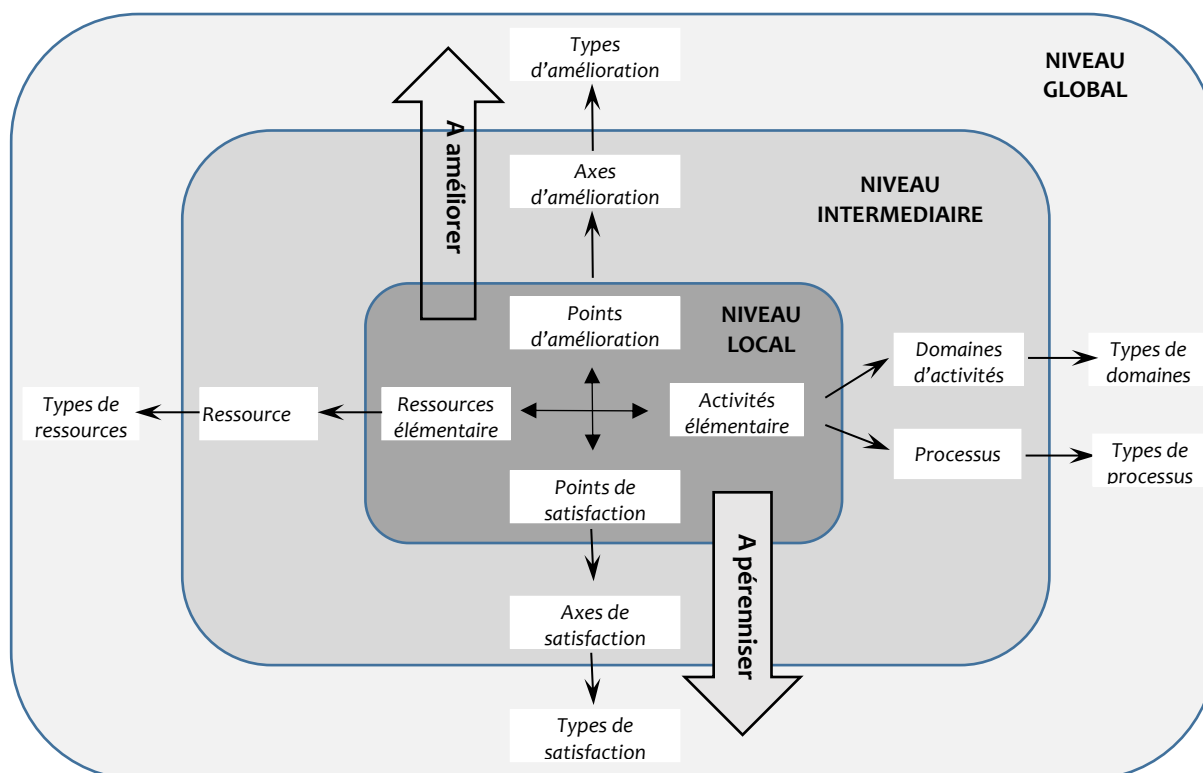


Figure 9 : Notre modèle de performance pour le benchmarking

Au niveau local

Les activités, ainsi que les ressources nécessaires à leur déroulement, sont les éléments de base de la représentation et constituent le niveau local. Ce sont sur ces activités et ressources que sont réalisées les premières évaluations de la performance. Comme évoqué précédemment, chaque utilisateur en charge d'une activité exprime un niveau de satisfaction (entre 0 et 10) sur chaque ressource élémentaire jugée par lui comme indispensable à son activité. Chaque niveau de satisfaction donne lieu, selon le cas, à un point à améliorer ou à un point à pérenniser. Une ressource pouvant avoir été déclarée comme nécessaire à plusieurs activités, sa performance est estimée à partir de l'ensemble des niveaux de satisfaction qui lui ont été attribués. Une activité produisant elle-même des ressources, sa performance est quant à elle estimée à partir de l'ensemble des niveaux de satisfaction exprimés par les utilisateurs de ces ressources.

Au niveau intermédiaire

Les ressources élémentaires peuvent ensuite être agrégées par ressource, chaque ressource correspondant à un regroupement physique ou logique de ces ressources élémentaires. Les activités peuvent être regroupées par processus et par domaines d'activités. Les points d'amélioration et points de satisfaction relevés au cours du diagnostic peuvent également être regroupés respectivement en axes d'amélioration et en axes de satisfaction sur lesquels une évaluation pourra également être réalisée. Plusieurs modes d'agrégation sont possibles en fonction de l'objectif recherché : par exemple, agrégation par sous-paragraphes des modèles d'assurance qualité ISO 9000, agrégation par collaborateur pour mettre en place des dynamiques d'amélioration continue, agrégation par domaines d'activités pour définir les domaines critiques où des efforts d'investissement, de formation, devront être importants, etc.

Au niveau global

Les ressources sont à leur tour agrégées par type de ressources (par exemple, ressources de type Matériel, Informationnel, Décisionnel, Humain, Financier ou Temps), les processus par types de processus (par exemple, les processus opérationnels, supports ou de management), les domaines d'activités par type de domaine (par exemple, domaines Commercial, Production, Qualité et Achats), les axes d'amélioration et de satisfaction sont regroupés par types (par exemple, types Main d'œuvre, Méthode, Machine, Matière ou Milieu).

Pour évaluer chacune des performances, nous avons proposé d'utiliser la méthode AHP (Analytic Hierarchic Process). La Figure 10 donne l'exemple de l'évaluation d'un type de processus T1 composé d'un ensemble de processus (P₁, P₂, ..., P₅), eux-mêmes composés d'activités élémentaires (A₁, A₂, ..., A₉) en lien avec des ressources élémentaires (R₁, R₂, ..., R₁₈).

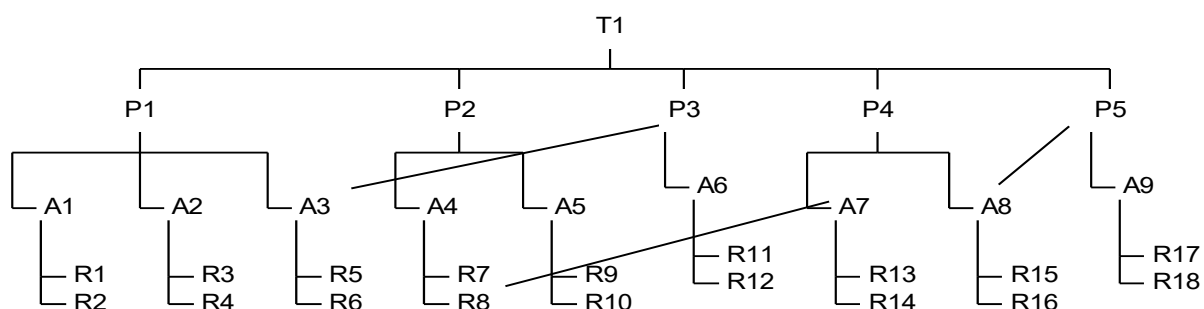


Figure 10. Modèle de performance pour le benchmarking

En utilisant l'échelle de mesure recommandée dans (Saaty, 1980), il est possible de positionner les éléments d'un même niveau les uns par rapport aux autres et relativement à l'élément dont ils dépendent (par exemple P₁, P₂, ..., P₅ par rapport à T₁). On en déduit ainsi une matrice de comparaison A = (a_{ij}) pour chaque niveau. Le poids relatif w_i de chaque élément est ensuite calculé comme suit :

- Faire la somme des valeurs de chaque colonne de la matrice A
- Normaliser la matrice en divisant chaque élément par la somme de sa colonne
- Estimer le poids w_i en calculant la moyenne des valeurs de la ligne de l'élément i

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n (b_{ij} * \sum_{j=1}^n a_{ij} / (\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^n a_{ij})))}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad \text{avec } b_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=1}^n a_{ij}$$

La Table 4 montre par exemple la matrice de comparaisons obtenue pour les processus P₁ à P₅ et la Table 5 le vecteur des poids relatifs calculés.

	P1	P2	P3	P4	P5
P1	1	5*	4	2	1
P2	0,2	1	0,33	0,2	0,2
P3	0,25	3	1	0,33	0,33
P4	0,5	5	3	1	1
P5	1	5	3	1	1

* Le processus P2 est 5 fois plus important que le processus P1

Table 4. Matrice de comparaison des processus

Processus	P1	P2	P3	P4	P5
Poids relatif w _i	0,314	0,047	0,119	0,254	0,266

Table 5. Vecteur des poids relatifs des processus

L'importance I d'un élément (par exemple la ressource R₁) par rapport à celui figurant au niveau o (le type de processus P₁) est ensuite calculée en effectuant une somme pondérée en parcourant les niveaux successifs du modèle.

L'étape de diagnostic a permis de collecter un niveau de satisfaction N_{ij} pour chaque ressource élémentaire R_j utilisée par une activité élémentaire A_i . Un niveau unique de satisfaction unique N_j est donc affecté à chaque ressource en faisant la moyenne de l'ensemble des niveaux de satisfaction exprimés sur cette ressource. La méthode se poursuit en affectant un niveau de satisfaction unique à chaque activité en calculant la moyenne des niveaux de satisfaction des ressources réalisées par cette activité. La démarche peut se poursuivre de la même manière pour les processus, puis les types de processus. Au final, un niveau de satisfaction est affecté à chaque élément du modèle.

En combinant les importances et les niveaux de satisfaction, il devient possible d'associer un niveau de performance P à chaque élément. Dans notre exemple, la performance d'une activité A_i est ainsi obtenue en effectuant une moyenne pondérée des niveaux de satisfaction attribués à l'ensemble des ressources R_j utilisées par l'activité A_i . Les niveaux de performance des activités étant calculés, il est ensuite possible d'en déduire ceux des processus dont ils dépendent. Le calcul peut ensuite se poursuivre jusqu'à atteindre le niveau le plus haut de la hiérarchie quantifiant ainsi le niveau de performance global du type de processus T_1 .

Ces calculs mettent en évidence les éléments caractéristiques de la performance de l'entreprise. Les éléments dont la performance est supérieure à un certain seuil (par exemple ≥ 8) caractérisent des points forts de l'entreprise à pérenniser. A l'inverse, les éléments sur lesquels des actions correctives doivent être menées sont, d'une part, ceux dont la performance est faible, et d'autre part, ceux dont l'importance est forte. Nous associons donc à chaque élément une mesure de sa criticité C avec :

$$C_i = (10 - P_i) * I_i$$

Les éléments dont la criticité est élevée (généralement supérieure à 80 % de la criticité maximale relevée à leur niveau) sont des points faibles de l'entreprise que le processus de benchmarking devra cibler en priorité dans les phases suivantes.

La Table 6 montre un exemple de résultat obtenu pour le type de processus T_1 .

Type Proc.	T1
Performance	5,277

Processus	P1	P2	P3	P4	P5
Importance	0,314	0,047	0,119	0,254	0,266
Performance	2,823	6,917	1,545	6,488	8,400
Criticité	2,256	0,144	1,005	0,892	0,426

Activités	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
Importance	0,199	0,031	0,160	0,039	0,019	0,032	0,212	0,255	0,053
Performance	3,000	5,333	1,500	8,000	1,500	1,667	5,786	10,000	2,000
Criticité	1,324	0,143	1,360	0,078	0,164	0,267	0,892	0,000	0,426

Ressources	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18
Importance	0,166	0,033	0,025	0,005	0,133	0,027	0,032	0,141	0,016	0,003	0,027	0,005	0,021	0,057	0,213	0,043	0,044	0,009
Performance	2,000	8,000	5,000	7,000	0,000	9,000	8,000	7,923	1,000	4,000	1,000	5,000	2,000	9,000	10,000	10,000	2,000	2,000
Criticité	1,328	0,066	0,127	0,015	1,333	0,027	0,065	0,292	0,145	0,019	0,240	0,027	0,164	0,057	0,000	0,000	0,355	0,071

 Point fort (performance élevée) à pérenniser
 Point faible (criticité forte – importance forte et performance faible) à améliorer

Table 6. Le modèle de représentation de la performance

2.3.2. Méthode proposée pour la phase 2 : choix de l'élément à benchmarker et du partenaire

La phase 2 consiste à déterminer les éléments pour lesquels un benchmarking est envisageable, et avec quelle(s) entreprise(s) il peut s'effectuer. Ce sont sur les points forts (à pérenniser) et les points faibles (à améliorer) qui sont retenus. Dans l'exemple précédent décrit dans la Table 6, l'analyse des écarts se limitera au processus P1, aux activités élémentaires A1 et A3, ainsi qu'aux ressources élémentaires R1 et R5.

Le problème se pose ensuite de savoir comment mesurer des écarts de performance sur ces éléments à partir des performances recueillis dans plusieurs entreprises sur des référentiels de mesures parfois très différents (par exemple, une mesure égale à 6 ne désigne pas une performance équivalente pour une entreprise X dont le niveau de performance globale est de 4 que pour une entreprise Y dont le niveau global est égal à 8). Pour limiter ces erreurs d'interprétation, nous avons fait le choix de ne pas réaliser des comparaisons sur des valeurs absolues de performance, mais sur des valeurs relatives de performance ajustées comme suit :

$$Pe'_i = \frac{Pe_i}{Pe_G} * Pe_i \quad \text{avec } Pe_G : \text{Performance globale}$$

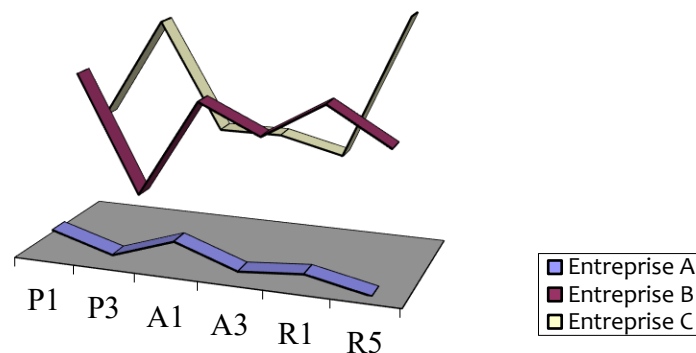
La Table 7 montre par exemple les nouvelles valeurs de performance pour les éléments considérés comme les points à améliorer de l'entreprise A.

Éléments	P1	P3	A1	A3	R1	R5
Performance ajustée Pe'_i	1,510 ^(a)	0,452	1,706	0,426	0,758	0,000

(a) $(2,823/5,277) * 2,823 = 1,510$

Table 7. Performance ajustée des éléments

A partir de ces nouvelles valeurs, une comparaison avec d'autres entreprises sur ces éléments peut être effectuée. La Figure 11 montre l'exemple d'une représentation obtenue.



Sur cet exemple, l'entreprise A a la possibilité de coopérer avec l'entreprise B pour P1 et avec l'entreprise C pour P3 et R5.

Figure 11. Comparaison inter-entreprises des points à améliorer

2.3.3. Méthode proposée pour la phase 3 : identification des écarts entre partenaires

La représentation précédente donne une idée de l'élément à benchmarker et de l'entreprise avec qui le faire, mais avec un point de vue qui se limite à celui de l'entreprise qui a servi de base à la comparaison. Il va de soi que si une entreprise A envisage de réaliser un benchmarking coopératif avec l'entreprise B, il faut également par ailleurs que l'entreprise B trouve également des

opportunités de coopération, directement ou indirectement, avec l'entreprise A. Cette coopération sera d'autant plus efficace si les apports des deux entreprises sont équilibrés.

Partant des points faibles de chaque entreprise, nous proposons de calculer les écarts de performance à partir de la formule suivante :

$$\delta_{AB_i} = (P'_{B_i} - P'_{A_i}) * w_{A_i}$$

avec δ_{AB_i} : Ecart de performance entre les entreprises A et B pour l'élément i

P'_{A_i} : Performance de l'élément i pour l'entreprise A

P'_{B_i} : Performance de l'élément i pour l'entreprise B

w_{A_i} : Poids de l'élément i pour l'entreprise A

La Table 8 montre par exemple les résultats obtenus à partir d'une comparaison effectuée sur l'ensemble des points à améliorer relevés dans trois entreprises A, B et C.

<i>Eléments</i>	<i>Poids</i>	<i>Performance</i>	<i>Ecart</i>	
Entreprise A	w_i	P'_{A_i}	δ_{AB_i}	δ_{AC_i}
P1	0,314	1,510	2,642	1,598
A1	0,199	1,706	1,418	0,910
R1	0,166	0,758	1,417	0,768
A3	0,160	0,426	1,070	0,937
R5	0,133	0,000	0,946	1,833
P3	0,119	0,452	0,294	1,444
Entreprise B	w_i	P'_{B_i}	δ_{BA_i}	δ_{BC_i}
P3	0,158	2,922	-0,390	1,527
P5	0,288	6,493	1,982	-1,017
A8	0,346	7,631	3,919	-0,468
R15	0,260	7,114	3,073	-1,623
A9	0,072	3,630	-0,207	0,191
A1	0,094	8,833	-0,671	-0,240
R1	0,075	9,292	-0,643	-0,294
R2	0,019	7,114	0,094	0,065
Entreprise C	w_i	P'_{C_i}	δ_{CA_i}	δ_{CB_i}
P2	0,407	1,484	3,085	2,395
A1	0,084	6,280	-0,382	0,213
R1	0,067	5,384	-0,309	0,261
R2	0,017	10,554	0,026	-0,058
A4	0,305	6,280	1,785	1,099
R8	0,235	0,862	2,653	2,566

Table 8. Un exemple de comparaison inter-entreprises des points à améliorer

La Table 9 synthétise les coopérations envisageables (apports respectifs équilibrés).

	<i>Entreprise A</i>	<i>Entreprise B</i>	<i>Entreprise C</i>
Entreprise A	/	P1 (2,642)	P3 (1,444)
Entreprise B	P5 (1,982)	/	P3 (1,527)
Entreprise C	P2 (3,085)	/	/

Table 9. Choix de l'élément à benchmarker et du partenaire à associer

2.4. Description et de comparaison des bonnes pratiques pour un benchmarking

Après que le sujet et que les partenaires du benchmarking aient été identifiés, la démarche suggère ensuite d'identifier puis d'adopter, en les adaptant au besoin, de bonnes pratiques. Si de nombreuses initiatives ont été lancées pour recenser, classifier et rendre accessibles de bonnes pratiques (www.apqc.com, www.bestpractices.com, etc.), beaucoup d'entreprises font état du

manque de méthodes permettant de s'approprier et tirer parti efficacement de ces bonnes pratiques pour améliorer leur performance. Cette difficulté est d'ailleurs confirmée par les enquêtes régulièrement effectuées par le Benchmarking Exchange qui montrent que le processus de benchmarking figure lui-même, et cela depuis quelques années, parmi les processus les plus benchmarkés. Nous avons évoqué deux difficultés importantes (61).

L'entreprise a d'abord une difficulté à définir clairement ce qu'est une bonne pratique, ou plus exactement, cerner le type d'informations ou de connaissances qu'il est pertinent pour elle de formaliser. Une pratique fait-elle référence à la façon de réaliser une activité ? Un processus ? À la manière de rendre celui-ci plus performant ? Sur quels critères se baser pour qualifier une pratique de "bonne" ? Ces critères doivent-ils faire référence à la capacité de cette pratique à générer des gains de performance significatifs ? A celle d'être applicable à une large variété de contextes d'utilisation ? **Cela nous a amené à nous interroger sur la manière de définir et de caractériser une bonne pratique** avant d'envisager comment la formaliser et la transférer.

L'entreprise a également des difficultés à identifier de bonnes pratiques. Et cela est vrai aussi bien pour l'entité (entreprise, site, service, etc.) souhaitant s'approprier ces bonnes pratiques, que pour l'entité susceptible de les lui fournir. D'un côté en effet, l'entité ne parvient pas à exprimer ses besoins en termes de pratiques, puisque l'objectif du benchmarking est précisément pour elle de découvrir de nouvelles pratiques radicalement différentes de ses pratiques habituelles. De l'autre côté, l'entité a souvent des difficultés à localiser, parmi ses pratiques habituelles, celles pouvant procurer des gains significatifs dans un contexte d'application différent du sien. A cela s'ajoute pour elle le problème de savoir quelles sont les pratiques qui ont un impact réel sur ses processus, l'effort ayant généralement été porté davantage sur l'identification des pratiques à l'origine des problèmes du processus plutôt que celles à l'origine de ses bonnes performances. **Nous avons donc cherché à définir les critères susceptibles d'aider à repérer, parmi un ensemble de pratiques existantes, les bonnes pratiques à gérer dans l'entreprise.** Ce travail a été réalisé en collaboration avec l'entreprise Tecumseh Europe qui effectuait des benchmarkings internes dans le but de faire partager certaines bonnes pratiques entre ses différents sites de production.

2.4.1. Proposition d'une définition d'une « Bonne pratique »

Il n'existe bien évidemment pas un seul type de pratiques. En rapprochant la classification des pratiques proposée par l'entreprise Chevron (O'Dell et al., 1998) de celle basée sur le niveau de l'organisation où ces pratiques apparaissent, nous distinguons (Figure 11) :

- *a Good Idea*, une pratique dont on sait intuitivement qu'elle a un impact positif sur la performance globale de l'entreprise et qui n'est donc pas associée à des données quantifiables pouvant contribuer à démontrer son efficacité.
- *a Good Practice*, une pratique implantée très localement dans l'entreprise, prenant la forme d'une technique, d'une méthode ou d'un processus et dont l'efficacité pour l'entreprise a été démontrée et réutilisable uniquement dans des contextes d'application très similaires.
- *a Local Best Practice*, une pratique qui est considérée comme la meilleure pour une grande partie de l'entreprise, dont l'efficacité a été démontrée quantitativement, et applicable à des contextes différents.
- *an Industry Best Practice*, une pratique qui a été jugée comme la meilleure par rapport à d'autres pratiques utilisées en interne ou en externe, dont l'efficacité a été prouvée quantitativement et adaptable à toutes autres entreprises.

Une pratique passe ainsi successivement de *Good Idea* à *Good Practice* dès lors que son efficacité est démontrée, à *Local Best Practice* lorsque sa réutilisation est envisagée dans d'autres secteurs de l'entreprise, et enfin, à l'état de *Industrial Best Practice* lorsqu'elle est standardisée au point d'être transférable à d'autres entreprises. Pour illustrer ces différents changements d'états, citons le cas d'une entreprise ayant l'idée de peindre en couleur jaune les éléments d'une machine nécessitant une maintenance préventive de premier niveau. Après quelques mois, les effets de

cette pratique peuvent être démontrés par la constatation effective d'une diminution des MTTR (Moyenne des Temps de Réparation), auxquels s'ajoutent des effets, là encore très visibles, sur l'aptitude des nouveaux opérateurs de maintenance à intervenir de manière autonome sur la machine. La pratique peut aisément être étendue à d'autres machines et, au final, s'intégrer complètement dans la culture de l'entreprise. La pratique est ainsi passée d'un état de *Good Idea* à un état de *Industrial Best Practice*.

Cette classification est parfois également couplée, comme l'illustre la Figure 12, à celle consistant à positionner les pratiques en fonction du niveau de l'organisation auquel elles se réfèrent. La maîtrise statistique des processus (MSP), l'utilisation des cartes de contrôles et la colorisation des points de maintenance de premier niveau peuvent, par exemple, être positionnées respectivement parmi des pratiques de niveau tactique, de niveau opérationnel et de niveau conduite. Sur chacun de ces niveaux peuvent également coexister des *Good Idea*, des *Best practices*, des *Local Best Practice* et des *Industrial Best Practice*.

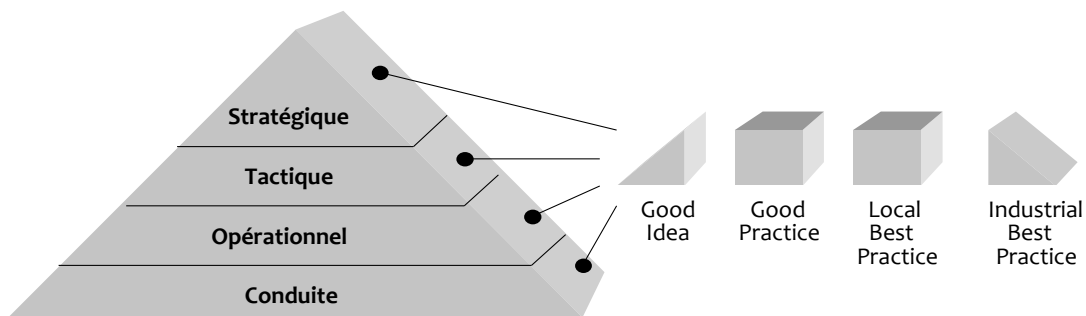


Figure 12. Une première classification des pratiques

Nous avons également positionné ces pratiques dans une espace à trois dimensions (Figure 13) :

- Une dimension *Performance* exprimant le niveau d'impact de la pratique sur la performance globale de l'entreprise,
- Une dimension *Partage* précisant si la pratique fait l'objet ou non d'une appropriation et/ou d'une utilisation collective dans l'entreprise
- Une dimension *Connaissance* matérialisant le niveau de formalisation de l'entreprise de cette pratique et de ses effets.

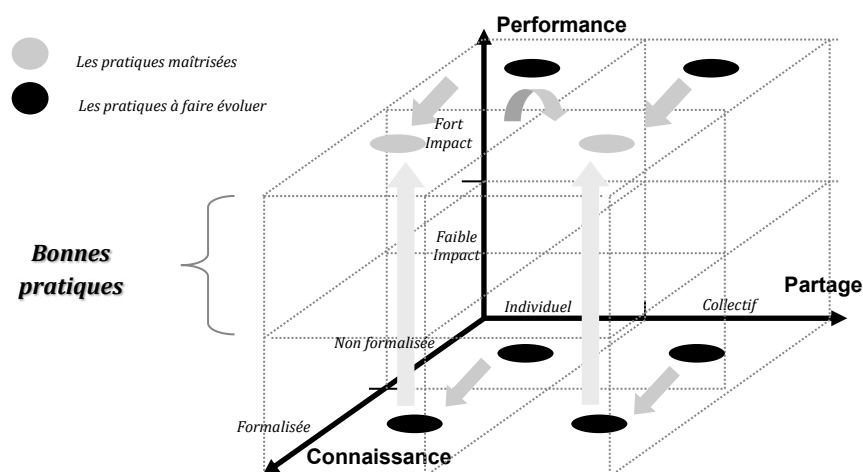


Figure 13. Une seconde classification des bonnes pratiques

Les bonnes pratiques d'un benchmarking concernent selon nous **les pratiques individuelles ou collectives, formalisées et ayant un impact significatif sur la performance de l'entreprise.**

Pour s'assurer que la pratique est une *bonne pratique*, nous utilisons ceux listés dans la Table 10.

Critères	Une bonne pratique, c'est :
Pertinence	l'adéquation des objectifs aux besoins exprimés par les clients du processus
Cohérence	la compatibilité des différents objectifs entre eux
Efficacité	la conformité des résultats par rapport aux objectifs définis
Efficiencia	le bon rapport entre résultats obtenus et moyens mis en œuvre
Robustesse	la capacité du processus à faire face aux aléas récurrents ou non
Pérennité	la capacité du processus à maintenir ses niveaux de performance

Table 10. Les caractéristiques d'une bonne pratique

Toute bonne pratique d'un processus doit donc pouvoir ainsi être caractérisée en fonction de sa contribution démontrée à améliorer un, et le plus souvent, plusieurs de ces critères. La Table 11 montre par exemple comment quelques bonnes pratiques génériques, bien que développées pour cibler un critère précis de performance d'un processus, peuvent agir également sur d'autres critères.

		Critères					
		Pertinence	Cohérence	Efficacité	Efficiencia	Robustesse	Pérennité
Exemples de bonnes pratiques	P1	Vérifier la performance par la mise en place d'un tableau de bord de suivi du processus	9	3	1	1	3
	P2	Renforcer la recherche de la performance globale avec une équipe pluridisciplinaire de pilotage d'un processus	3	9	1	1	3
	P3	Améliorer la qualité par la mise en place de l'autocontrôle			9	1	3
	P4	Réduire les temps d'exécution par la routinisation des tâches			3	9	1
	P5	Réduire la variabilité par la standardisation des tâches		3	3	1	9
	P6	Garantir l'irréversibilité par l'automatisation de la tâche			3	3	1
	P7	Développer l'habileté technique des opérateurs par des formations régulières sur leur propre métier	3	1	3	3	3

La pratique P7 peut être considérée comme une bonne pratique puisque ses effets sont visibles sur la quasi-totalité des critères.

Table 11. Exemples de bonnes pratiques

2.4.2. Proposition d'un modèle de description d'une « Bonne pratique »

Nous avons également proposé une matrice de description des pratiques associées à un processus, certaines de ces pratiques faisant référence à des éléments opérationnels (i.e. la manière dont le processus s'exécute), d'autres à des éléments organisationnels (i.e. la manière dont l'exécution du processus est pilotée). La Table 12 décrit la structure de cette matrice.

L'approche retenue se base sur un recensement des activités génériques qu'un processus doit, ou devrait, mettre en œuvre. Ces activités se répartissent dans deux parties complémentaires :

- une partie *Opération*, qui regroupe les activités contribuant à rendre le processus pertinent et cohérent. Ces activités sont réparties sur l'une des trois fonctions d'un processus (*Axe, Action* et *Assistance*), ces fonctions étant elles-mêmes divisées en deux types d'action (*Réaliser* et *Piloter*).
- une partie *Management*, qui regroupe les activités contribuant à rendre le processus efficient, robuste et pérenne. Ces activités sont réparties sur l'un des trois facteurs de management d'un processus (*Technique, Humain* et *Organisationnel*), ces facteurs étant eux-mêmes décomposés (*Matériel* et *Information* pour le facteur Technique, *Compétences Individuelles* et *Compétences collectives* pour le facteur Humain et *Structure* et *Système d'indicateurs* pour le facteur Organisation).

Un exemple complet de cette matrice utilisée pour l'entreprise TECUMSEH est donné dans (70). La matrice recensait l'ensemble des actions d'un processus 6Sigma utilisées sur l'un des sites de production, avec l'objectif de cibler celles à déployer sur les autres sites.

PARTIE OPERATIONNELLE																																				
AXE				ACTION				ASSISTANCE																												
Données d'entrée Activités Données de sortie	Réaliser			Piloter	Réaliser			Piloter	Réaliser			Piloter																								
	Pondérer et sélectionner les sujets critiques			Définir le problème, les besoins et exigences pour chaque sujet			Construire le planning des actions pour chaque sujet			Suivre la progression des sujets, réagir et valider l'atteinte des objectifs			Evaluer l'état initial de chaque sujet observé			Mesurer les performances des sujets et les résultats obtenus			Optimiser les moyens de fonctionnement des sujets observés			Suivre l'évolution des sujets et réagir en cas de dérive			Analyser le problème de la non performance des sujets			Construire le planning des interventions sur les sujets observés			Implanter les solutions planifiées sur les sujets			Suivre, réagir et valider les améliorations apportées		
PARTIE MANAGEMENT																																				
TECHNIQUE		HUMAIN		ORGANISATION																																
Informations	Matériels	Compétences collectives	Compétence individuelle	Système d'indicateurs de performances	Structure	Définir																														
						Budgéter																														
						Construire																														
						Suivre																														
						Former																														
						Responsabiliser																														
						Capitaliser																														
						Formaliser																														
						Adapter																														
						Standardiser																														
						Afficher																														
						Communiquer																														

Table 12. Matrice Partie Opération et Management d'un Processus

2.4.3. Proposition d'une méthode de comparaison des « Bonnes pratiques »

Les partenaires d'un benchmarking ayant décrit leurs pratiques à l'aide de la matrice décrite précédemment, la démarche consiste ensuite à comparer ces pratiques.

Une première méthode simple consiste à remplir les matrices obtenues à l'aide de valeurs égales à 1 ou à 0 selon que l'activité est réalisée ou non. Les colonnes et les lignes sont ensuite sommées pour obtenir un ordre d'importance entre actions de la partie Opération et un ordre d'importance entre actions de la partie Management. Le coefficient τ de corrélation entre les deux séries de valeurs, obtenu à l'aide du test de Kendall, montre les similitudes et les différences entre entreprises sur le choix des activités mises en œuvre.

Ces différences et similitudes peuvent ensuite être détaillées en positionnant les activités des deux entreprises selon les fonctions (Axe, Action et Assistance) de la partie Opération et selon les facteurs organisationnels (Organisation, Humain et Technique) de la partie Management.

Enfin, à un niveau plus détaillé, la comparaison peut ensuite être encore affinée activité par activité de manière à cibler les pratiques sur lesquelles les entreprises peuvent efficacement échanger.

La Figure 14 montre un exemple de cette comparaison réalisée entre les deux sites de l'entreprise Tecumseh Europe sur le processus Six Sigma.

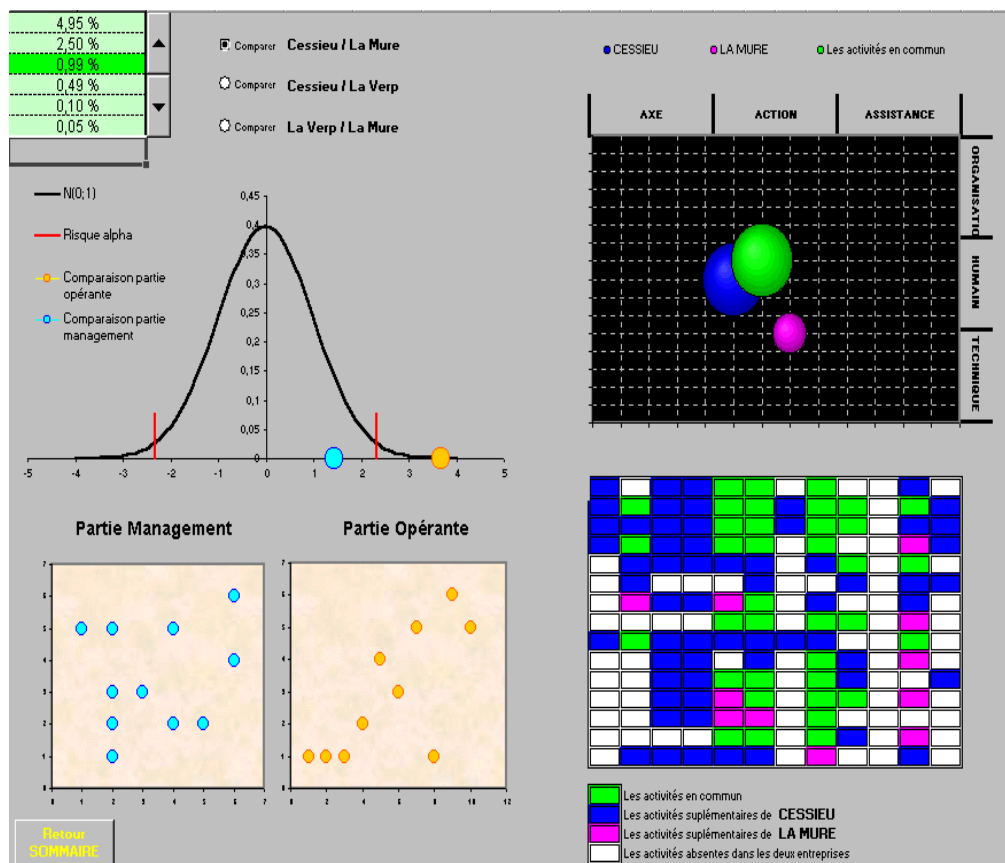


Figure 14. Un exemple de comparaison de bonnes pratiques

Sur cet exemple, la comparaison des deux sites montre une corrélation sur la partie Management du processus ($\tau = 1,2$). Le graphique des centres de gravité montre que l'un des sites insiste davantage sur le facteur humain dans le management du processus tandis que l'autre privilégie les moyens techniques aidant à les faire fonctionner. Enfin, le tableau des différences identifie les activités manquantes sur chaque site et cible les pratiques sur lesquelles les deux sites peuvent échanger.

3. Bilan de mes travaux sur le benchmarking

Au démarrage de ma recherche, les publications sur le benchmarking étaient peu nombreuses en France. Avec la publication de nos travaux entre 1996 et 2005, nos compétences dans le benchmarking sont aujourd'hui connues. Nos publications ont été, et sont encore aujourd'hui, régulièrement cités (Figure 15).

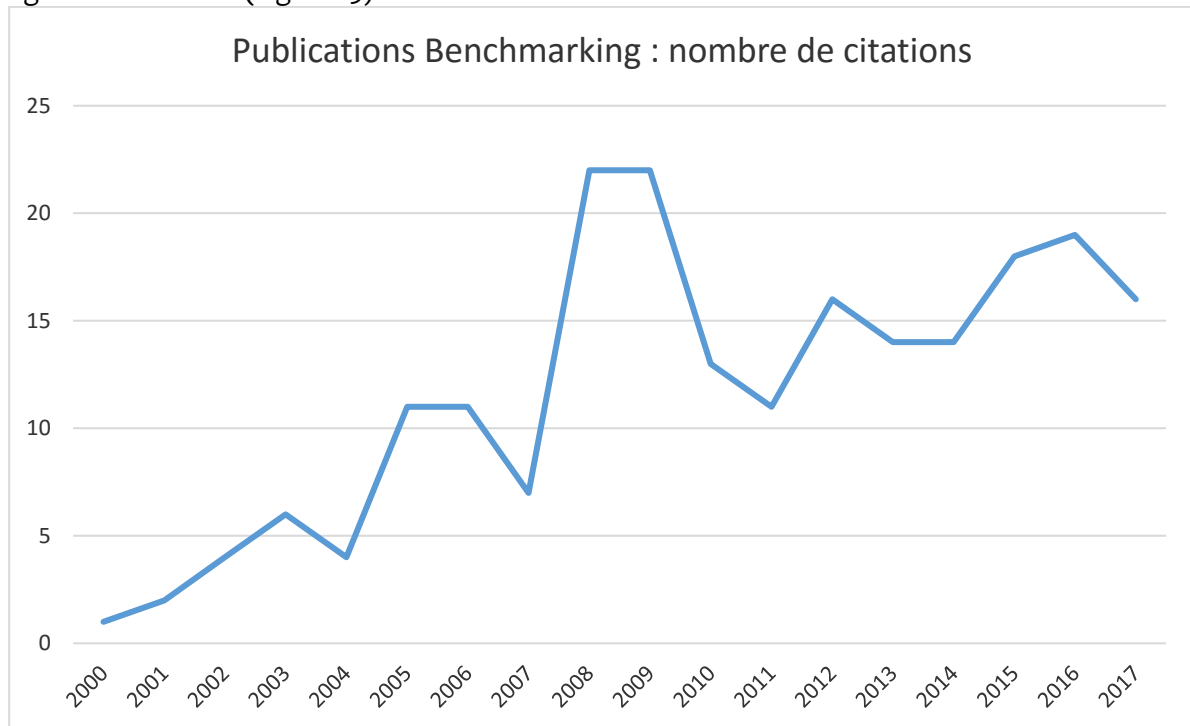


Figure 15. Nombre de citations de nos publications sur le benchmarking (source Google Scholar au 25/11/17)

Notre article “A typology of best practices for a benchmarking process”, publiée en 2005, a par exemple été citée 101 fois. L'article décrit la manière d'identifier et de modéliser de bonnes pratiques en vue de les transférer. Principalement cité dans la revue *Benchmarking : An International Journal* (21 citations) dédiée totalement au benchmarking, il l'est également d'autres revues en tant que cadre d'application possible de la démarche : *International Journal of Operations & Production Management*, *Journal of Business Ethics*, *Computers & Industrial Engineering*, *Journal of Business & Industrial Marketing*, *Logistics Research*, *European Journal of Scientific Research*, *The TQJ Journal*, *Journal of Accounting, Business & Management*, *Supply Management Research*, *Industrial and Commercial Training*, *International Journal of Process Management and Benchmarking*, *Journal of Organisational Transformation & Social Change* et *Science Journal of Business and Management*.

Références

- Balm G.J., 1994. Evaluer et améliorer ses performances - Le Benchmarking, Ed. Afnor Gestion Qualité, Paris.
- Bemowski K., 1991. The Benchmarking Bandwagon, *Quality Progress* 24 (1), pp. 19-24.
- Bogan C.E., English M.J., 1994. Benchmarking for Best Practices: Winning through Innovative Adaptation, McGraw-Hill Inc., New York.
- Boxwell R.J., 1994. Benchmarking for Competitive Advantage, McGraw-Hill Inc., New York, 224 p.
- Braesch C., 1989. Approche de modélisation du système de production de l'entreprise manufacturière, Thèse de Doctorat en Informatique, Université Franche-Comté, Besançon.
- Camp R.C., 1989. Benchmarking: The Search for Industry Best Practices that Lead to Superior Performance, Quality Press/ASQC, Milwaukee, Wisconsin.
- Camp R.C., 1995. Business Process Benchmarking- Finding and Implementing Best Practices, ASQC Quality Press.
- Harrington H.J., Harrington J.S. 1996. High Performance Benchmarking: 20 Steps to Success, McGraw-Hill, New York.
- Juran J.M., 1994. Benchmarking for world class leadership, Participant guide, Juran Institute, New York, 1994.
- Kärlöf B., Östblom S., 1995. Le Benchmarking : un indicateur d'excellence en maîtrise de qualité et de productivité, *Travail et Méthodes*, 48 (519), pp. 3-17.
- Kearns D., 1986. Quality improvement begins at the top, Jerry Bowles Ed. *World* 20 (5).

- O'Dell S.C., Jackson G.C., Essaides N., 1998. *If Only We Knew What We Know: The Transfer of Internal Knowledge and Best Practice*, New York: Free Press.
- Ohinata Y., 1994. Benchmarking: The Japanese Experience, *Long Range Planning*, 27 (4), pp. 48-53.
- Shetty Y.K., 1993. Aiming high: competitive benchmarking for superior performance, *Long Range Planning* 26 (1), pp. 39-44.
- Spendoloni M.J., 1992. *The Benchmarking Book*, The American Management Association (AMACOM), New York.
- Watson G.H., 1992. *The Benchmarking Workbook: Adapting Best Practices for Performance Improvement*, Productivity Press Inc., Cambridge.

IV. RESULTATS DE RECHERCHE SUR LE CONTROLE VISUEL

1. A l'origine de mes travaux

Ces dernières années, les entreprises ont fait beaucoup d'efforts pour améliorer la qualité d'aspect de leurs produits. C'est le cas de l'entreprise Patek Philippe, située à Genève, avec laquelle j'ai travaillé au début de nos travaux sur le contrôle visuel en 2002. Dans cette entreprise, chaque pièce est contrôlée visuellement à plusieurs étapes de sa fabrication pour, si nécessaire, être retouchée ou écartée si une anomalie est détectée.

Malgré la qualité de la formation des contrôleurs, l'entreprise notait une variabilité importante dans les résultats de ses contrôles. La Table 13 montre par exemple les résultats d'un test R&R effectué à l'époque sur un échantillon de 30 pièces. Dans ce test, chaque pièce avait été contrôlée par trois opérateurs et les résultats avaient été comparés à ceux fournis par un groupe d'experts.

Numéro Pièce	Experts	Contrôleur A		Contrôleur B		Contrôleur C	
		#1	#2	#1	#2	#1	#2
1	C	C	C	NC	NC	NC	NC
2	C	C	NC	NC	C	C	C
3	C	C	NC	C	NC	C	NC
4	C	C	NC	C	C	C	C
5	C	C	NC	NC	NC	NC	C
6	C	C	NC	C	C	NC	C
7	C	C	C	C	NC	C	NC
8	C	C	C	NC	NC	C	C
9	C	C	NC	C	C	NC	C
10	C	C	C	NC	C	C	C
11	C	C	C	C	C	NC	C
12	NC	NC	NC	C	C	NC	C
13	C	C	C	C	C	C	C
14	C	C	C	NC	NC	C	C
15	C	NC	NC	C	C	C	C
16	C	C	C	NC	NC	C	C
17	C	NC	NC	NC	C	C	C
18	C	C	C	C	C	C	C
19	C	NC	NC	NC	NC	C	C
20	C	NC	NC	C	NC	NC	NC
21	C	C	NC	NC	NC	NC	C
22	C	C	C	C	C	C	C
23	C	NC	NC	C	C	C	C
24	C	C	C	C	C	NC	C
25	C	C	C	NC	NC	NC	C
26	C	C	NC	C	C	NC	C
27	NC	C	C	NC	NC	NC	C
28	C	C	NC	NC	NC	C	C
29	C	NC	NC	C	C	C	C
30	C	NC	NC	C	C	C	NC

* C: Conforme – NC: Non Conforme

Table 13. Exemple de données d'un Test R&R

Le test montrait d'abord le manque de répétabilité et de reproductibilité des mesures pour les contrôleurs. Mais il montrait surtout le désaccord entre contrôleurs et experts (résultats différents pour 28 pièces sur 30 !).

C'est le constat de ce problème et la nécessité de réduire la variabilité du contrôle visuel qui a été le point de départ de mes travaux dans ce domaine avec d'abord le co-encadrement de la thèse de Anne Sophie Guerra (69), puis de la thèse de Nathalie Baudet (68) dans le cadre du programme franco-suisse INTEREG IV DASuVA.

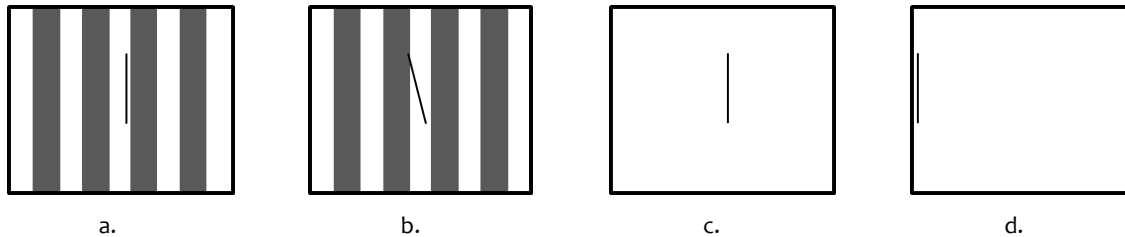
Ces travaux ont donné lieu à 5 publications dans des revues internationales (2 à 5 et 7), 1 publication dans une revue nationale (13), 9 communications dans des congrès internationaux (25 à 33), 7 communications dans des congrès francophones (41, 43, 45, 47 à 50).

Nous résumons ici les principaux résultats de ces travaux.

2. Présentation des résultats

2.1. Problématique du contrôle visuel

Un contrôle visuel avec un objectif fonctionnel et un contrôle visuel avec un objectif esthétique ne font pas nécessairement appel aux mêmes méthodes. Dans le cas fonctionnel par exemple, ces méthodes s'appuient le plus souvent sur une définition préalable de tolérances au-delà et en deçà desquelles le produit doit être refusé. Dans le cas esthétique, la définition de ces tolérances est plus délicate, particulièrement dans le cas d'une surface intégrant des décors très variés. La Figure 16 montre par exemple que la présence d'une rayure parfaitement identique (même profondeur, largeur et longueur) pourra conduire à une décision de contrôle différente selon sa localisation sur la pièce ou selon le décor dans lequel elle apparaît.



Sur cet exemple, la même rayure sera considérée comme acceptable dans les situations a et d, inacceptable dans les situations b et c.

Figure 16. Différents résultats de contrôle pour une même anomalie

Les résultats d'un contrôle visuel ont souvent, nous l'avons dit, une variabilité élevée. De nombreuses publications ont étudié les différents facteurs ayant un impact sur les résultats d'un contrôle visuel et pouvant être à l'origine de cette variabilité. L'influence de différentes techniques d'entraînement des contrôleurs est par exemple décrite dans (Rao et al., 2006) (Chabukswar et al., 2003) (Gramopadhye et al., 1997), celle de l'utilisation de différents types de grossissement dans (Lee et Chan, 2009), du temps du contrôle dans (Garaas et Pomplun, 2008), du rythme du contrôle dans (Garrett et al., 2001), du bruit dans (Taylor et al., 2004), de la méthode d'inspection dans (Melloy et al., 2006) (Wang et al., 1997) (Nickles III et al., 2003).

Toutes ces études ont été réalisées dans domaines variés de l'industrie, comme l'aviation (Gramopadhye et al., 1997) (Vora et al., 2002), l'électronique (Schütte et al., 1999) ou encore l'optique (Rebsamen et al., 2010) (Jebaraj et al., 1999). Ces études se situent le plus souvent dans le contexte d'un contrôle visuel dont l'objectif est d'abord fonctionnel (par exemple, en aéronautique, détecter les signes d'une soudure mal effectuée pouvant entraîner à terme une déformation de la pièce). Dans d'autres cas, l'objectif fonctionnel est complété par un objectif esthétique (par exemple, en optique, détecter une très légère rayure sur un verre pouvant gêner l'utilisateur et/ou altérer l'aspect du verre).

Pour réduire la variabilité des résultats du contrôle, notre premier travail (69) avec Anne Sophie Guerra a été de **formaliser le contrôle visuel et d'en distinguer les étapes**.

Le contrôle visuel requiert deux expertises :

- une expertise d'exploration, que le contrôleur doit acquérir pour détecter l'ensemble des anomalies pouvant être présentes sur la surface du produit.
- une expertise d'évaluation, requise pour que le contrôleur puisse estimer la criticité de ces anomalies et décider de la conformité du produit.

Ces deux expertises sont distinctes et, nous l'avons constaté sur le terrain, sont très variables d'un contrôleur à l'autre. Certains d'entre eux possèdent par exemple une capacité reconnue et avérée dans la détection des anomalies et, à l'inverse, se révèlent parfois inaptes pour leur évaluation. La réunion des deux expertises est parfois à l'origine de résultats de contrôle erronés ou insatisfaisants (par exemple, le contrôleur ne détecte que ce qu'il sait évaluer).

Pour prendre en compte cette distinction claire entre ces deux expertises, nous avons proposé de structurer le processus de contrôle visuel des produits en trois étapes distinctes : *Exploration*, *Evaluation* et *Décision* (Figure 17).

Ces étapes, composées chacune de plusieurs actions, s'enchaînent pour délivrer au final, comme résultat de ce processus, une décision concernant l'acceptabilité ou non du produit.

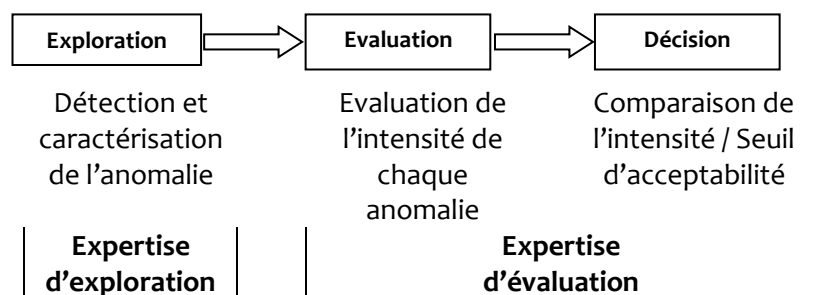


Figure 17. Le processus de contrôle visuel

Un contrôle visuel à but esthétique doit être réalisé en respectant l'enchaînement de ces trois étapes et, surtout, en les exécutant de manière distincte. J'avais relevé dans l'entreprise Patek Philippe que certains contrôleurs réduisaient l'étape d'exploration aux seules anomalies concernées par leurs pratiques d'évaluation. Le standard d'évaluation étant insuffisamment partagé, de nombreuses anomalies échappaient ainsi à la détection, et donc au contrôle.

Notre idée a donc été de proposer à l'entreprise d'établir, non plus un standard, mais deux standards bien distincts. Le standard d'exploration aide le contrôleur à détecter, décrire et caractériser l'ensemble des anomalies susceptibles d'être présentes sur un produit (standard d'exploration) et le standard d'évaluation l'aide à évaluer correctement ces anomalies et à juger la conformité du produit.

Sur ce modèle, nos propositions, qui visaient à réduire la variabilité du contrôle visuel, ont été déclinées en 3 axes (que nous détaillerons ci-après) :

- **Réaliser un outil de mesure de variabilité suffisamment précis pour cibler les actions correctives à mener**
- **Proposer une méthode d'exploration pour détecter l'ensemble des anomalies, les décrire et les caractériser de manière répétable et reproductible**
- **Proposer une méthode d'évaluation d'une anomalie pour être en situation de décider de la conformité d'un produit.**

2.2. Un test R^2E^2 pour mesurer la variabilité des résultats d'un contrôle visuel

Le test R&R est classiquement utilisé pour rendre compte de la variabilité des mesures à travers leur répétabilité et leur reproductibilité. La Table 14 montre les résultats obtenus de l'application de ce test pour les données de l'exemple de la Table 13.

	Contrôleur A	Contrôleur B	Contrôleur C
Nombre de pièces inspectées	30	30	30
Problèmes Répétabilité	9	6	13
Problèmes vs experts	8	10	2
Plus sévère	7	9	2
Moins sévère	1	1	0
Total Problèmes	17	16	15
Moyenne %	43.33%	46.67%	50.00%
Resultats	Pas adapté	Pas adapté	Pas adapté

Table 14. Exemple de l'application du test R&R sur les résultats d'un contrôle visuel

Nous avons d'abord proposé de compléter (3), comme suggéré dans AIAG (2010), les résultats du test R&R avec celui du test Kappa de Fleiss (1971) qui donne une mesure de la concordance entre plusieurs opérateurs et experts pour les mesures où la répétabilité est vérifiée (le test Kappa initial de Cohen en 1960 ne s'appliquant qu'à deux opérateurs).

Le coefficient Kappa de Fleiss κ est donné par la formule :

$$\kappa = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e}$$

avec P_0 = proportion d'accord observée

P_e = proportion d'accord aléatoire

Soit N le nombre de pièces évaluées, n le nombre de contrôleurs et d'experts, n_{ij} le nombre d'évaluations où la i ème pièce est classée dans la j ème catégorie ($j=0$ pour non conforme ou $j=1$ pour conforme),

La proportion de pièces p_j dans la j ème catégorie est : $p_j = \frac{1}{Nn} \left(\sum_{i=1}^N n_{ij} \right)$

La proportion d'accord observé est : $P_e = \sum_{j=0}^1 p_j^2$

La proportion d'accord aléatoire : $P_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i$ avec $P_i = \frac{1}{n(n-1)} \left(\sum_{j=0}^1 n_{ij}^2 - n \right)$

L'erreur standard du coefficient κ est : $SE(\kappa) = \sqrt{\frac{P_0(1-P_0)}{n(1-P_e)^2}}$

Une valeur de κ proche de 1 indique un accord parfait, une valeur proche de 0 un accord identique à celui obtenu de manière aléatoire, une valeur proche de -1 une absence totale d'accord.

La Table 15 donne les valeurs obtenues par le Test Kappa de Fleiss pour les données l'exemple donné dans la Table 13.

Numéro de Pièce	Experts	Contrôleur A	Contrôleur B	Contrôleur C	P_i
		#1 et #2	#1 et #2	#1 et #2	
1	1	1	0	0	0,33
8	1	1	0	1	0,5
13	1	1	1	1	1
14	1	1	0	1	0,5
15	1	0	1	1	0,5
16	1	1	0	1	0,5
18	1	1	1	1	1
19	1	0	0	1	0,33
22	1	1	1	1	1
23	1	0	1	1	0,5
29	1	0	1	1	0,5
$P_e = \sum_{j=0}^1 p_j^2 = 0,23^2 + 0,77^2 = 0,65$		$P_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i = 0,61$			
$\kappa = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e} = -0,11$		Accord entre contrôleurs et experts faible (proche de celui qui aurait été obtenu de manière aléatoire)			

Kappa Fleiss κ	Contrôleur A	Contrôleur B	Contrôleur C
Contrôleur A	1.000		
Contrôleur B	-0,33	1.000	
Contrôleur C	-0,29	0,10	1.000
Très peu de concordance dans les jugements			

Table 15. Exemple de l'application du test Kappa de Fleiss sur les résultats d'un contrôle visuel

L'association du test R&R et du test Kappa de Fleiss donne des indications claires sur le niveau de variabilité des résultats d'un contrôle visuel.

En revanche, lorsqu'une variabilité est relevée, ces deux tests ne donnent pas d'indications suffisamment précises sur les actions à mener pour la réduire. La variabilité résulte-t-elle d'un problème de détection des anomalies ? D'un problème d'évaluation des anomalies ? Par exemple, dans l'exemple de la Table 13, lorsque le contrôleur A juge la pièce 2 conforme puis non conforme, est-ce parce qu'il n'a pas détecté l'anomalie lors de sa première évaluation et l'a détecté durant la seconde ? Ou est-ce parce qu'il a détecté l'anomalie durant les deux évaluations mais l'a jugé d'abord comme conforme puis non conforme ? De la même manière, lorsque les contrôleurs A et B donnent des résultats différents pour la pièce 8, est-ce parce que le contrôleur A a détecté l'anomalie et que le contrôleur B ne l'a pas détecté ? Ou est-ce parce que le contrôleur B a détecté l'anomalie mais l'a jugé acceptable ?

En d'autres termes, une variabilité, lorsqu'elle est constatée, résulte-t-elle d'un problème de détection des anomalies ou d'un problème d'évaluation des anomalies ?

C'est pour être en mesure d'apporter des réponses à ce type de questions que nous avons développé le **test R^2E^2 qui met en relation, d'une part la Répétabilité et la Reproductibilité (R^2) du contrôle, et d'autre part, l'Exploration et l'Evaluation des anomalies (E^2)**. Ce test est détaillé dans (4).

La réalisation d'un test R^2E^2 nécessite des données supplémentaires. La Table 16 montre les données supplémentaires utilisées pour l'exemple de la Table 12. Une valeur égale à 0 indique que le contrôleur n'a détecté aucune anomalie, une valeur égale à 1 indique qu'il a détecté une anomalie et l'a jugé conforme et une valeur égale à 2 indique qu'il a détecté une anomalie et qu'il l'a jugé non conforme.

Pièce	True Value	Contrôleur A		Contrôleur B		Contrôleur C	
		#1	#2	#1	#2	#1	#2
1	1	0	0	2	2	2	2
2	1	1	2	2	1	0	1
3	1	1	2	1	2	0	2
4	0	1	2	0	1	1	1
5	0	1	2	2	2	2	1
6	1	0	2	1	1	2	1
7	1	0	0	0	2	0	2
8	0	0	1	2	2	1	0
9	1	1	2	1	0	2	1
10	0	0	1	2	0	0	0
11	0	0	0	0	0	1	1
12	2	2	2	1	0	2	0
13	0	1	0	1	0	2	1
14	1	1	0	2	2	1	1
15	1	2	2	0	0	1	1
16	0	0	1	2	2	0	1
17	0	2	2	2	1	1	1
18	1	0	0	1	0	0	0
19	1	2	2	2	2	0	0
20	0	2	2	1	2	2	2
21	0	0	2	2	2	2	0
22	1	1	1	1	0	0	1
23	1	2	2	0	0	0	1
24	0	1	0	1	1	2	1
25	0	0	1	2	2	2	1
26	1	1	2	1	1	2	0
27	2	0	1	2	2	2	0
28	1	1	2	2	2	1	0
29	0	2	2	0	0	0	0
30	0	2	2	0	1	0	2

Table 16. Exemple de données d'un Test R^2E^2

La Table 17 et la Table 18 montrent respectivement l'ensemble des mesures que nous proposons lors de l'exécution d'un test R²&E² et pouvant être calculées pour chaque contrôleur sur l'exploration des anomalies, puis sur leur évaluation.

Répétabilité de l'exploration (en %)	$\frac{NP_Repeat_Ex}{NP_Insp}$	NP_Repeat_ Ex : nombre de pièces où le contrôleur a détecté deux fois une même anomalie NP_ Insp: Nombre de pièces inspectées
Reproductibilité de l'exploration (en %)	$\frac{NP_Repro_Ex}{NP_Repeat}$	NP_Repro_ Ex : nombre de pièces où le contrôleur a détecté, comme les experts, deux fois la même anomalie
Taux global d'exploration	$\frac{NP_Repro_Ex}{NP_Insp}$	
Nombre de fausses alarmes	$\frac{NP_FA}{2}$	NP_FA : nombre d'anomalies détectées par le contrôleur et non détectées par les experts
Nombre d'omissions	$\frac{NP_Om}{2}$	NP_Om : nombre d'anomalies détectées par les experts mais non détectées par le contrôleur

Table 17. Mesures Exploration d'un Test R²&E²

Répétabilité de l'évaluation (en %)	$\frac{NP_Repeat_Ev}{NP_Insp_A}$	NP_Repeat_ Ev : nombre de pièces où le contrôleur a évalué une anomalie deux fois de la même manière
Reproductibilité de l'évaluation (en %)	$\frac{NP_Repro_Ev}{NP_Repeat_Ev}$	NP_Repro_ Ev : nombre de pièces où le contrôleur a évalué une anomalie deux fois une anomalie de la même manière que les experts
Taux global d'évaluation	$\frac{NP_Repro_Ev}{NP_Insp_A}$	
Nombre de + sévères	$\frac{NP_MS}{2}$	NP_MS : nombre de pièces où une anomalie a été jugée comme non acceptable par le contrôleur et jugée acceptable par les experts
Nombre de - sévères	$\frac{NP_LS}{2}$	NP_LS : nombre de pièces où une anomalie a été jugée comme acceptable par le contrôleur et jugée non acceptable par les experts
Concordance	$\frac{Nb_A + Nb_NA + Nb_A_ND}{2 * Nb_Insp}$	Nb_A : nombre de pièces où une anomalie a été jugée comme acceptable par le contrôleur et par les experts Nb_NA : nombre de pièces où une anomalie a été jugée comme non acceptable par le contrôleur et par les experts Nb_A_ND : nombre de pièces où une anomalie a été jugée comme acceptable par le contrôleur et non détectés par les experts et réciproquement

Table 18. Mesures Evaluation d'un Test R²&E²

La Table 19 donne à titre d'exemple les valeurs obtenues pour le Test R²&E² appliqué aux données de la Table 13.

	Contrôleur A	Contrôleur B	Contrôleur C
Répétabilité de l'exploration (en %)	67%	70%	57%
Reproductibilité de l'exploration (en %)	55%	52%	41%
Taux global d'exploration	37%	37%	23%
Nombre de fausses alarmes	9.5	10	10
Nombre d'omissions	4.5	4.5	6.5
Répétabilité de l'évaluation (en %)	56%	76%	54%
Reproductibilité de l'évaluation (en %)	22%	23%	28%
Taux global d'évaluation	12%	18%	15%
Nombre de + sévères	6	5.5	3.5
Nombre de - sévères	0.5	0.5	0
Concordance	43%	43%	41%

Table 19. Mesures du test R²&E²

Les mesures fournies par le Test R²&E² aide à faire le choix des actions correctives à mener pour réduire la variabilité des résultats du contrôle. Dans la Table 19 par exemple, le test montre que les actions doivent plus particulièrement cibler l'amélioration de la reproductibilité de l'évaluation des contrôleurs (respectivement 22%, 23% et 28% pour les 3 contrôleurs).

2.3. Méthode d'exploration des anomalies

2.3.1. Classification des anomalies d'aspect

Le terme de *défaut* est utilisé fréquemment dans les publications décrivant ce qu'un contrôle visuel est amené à détecter. Pour l'AFNOR, un défaut désigne « une déviation d'une caractéristique visuelle par rapport à son niveau ou état visé (généralement spécifié), suffisamment importante pour entraîner la non satisfaction d'une exigence ». La définition se fonde sur le principe qu'un état attendu existe et a été prédéfini pour la caractéristique visuelle examinée.

Le plus souvent, les contrôleurs disposent d'une liste codifiée de types de défauts possibles pouvant être détectés sur un produit. La Table 19 montre par exemple la liste utilisée par l'entreprise Patek Philippe (17 codes pour codifier une centaine de types de défauts ou de causes de défauts possibles).

Code	Défauts
A	Dimension Fonction Usinage Diamant Etat surface, filet, etc.
B	Blessures, Fentes, Coups, Raies, Fraies
C	Terminaison/polissage/avivage, sablage, satinage, perlage, tube etc.
D	Bavures/dentelles, cran, réhaut, bords coupants, arrête vive
E	Colle ou joint qui déborde, bulle, poil, point noir/cran, poussière
F	Problème assemblage sertissage soudure ajustage
G	Rhodiage, tâches, flammes, couleur, adhérence
H	Etampage. Doublure, rejet, déformation, Défaut matière porosité, paille
I	Dureté, recuit, peau d'orange
J	Etanchéité, boîtes, couron., poussoirs, correct.tube etc.
K	Inclusion, bulles, points noirs ou blancs, voile
L	Saphir ou pierres précieuses égrissées, vibration, piqûres, ondulation
M	Métallisation, couleur, régularité, adhérence
N	Divers, réglage, propreté, manipulation, conditionnement
O	Ø hauteur de chasse, dépoli, angles sous brosse, sus poli
P	Moulage, traces d'éjecteurs, retassure, grainage etc.
Q	N° consécutif, gravages, poinçons C.M.P, titre

Table 20. Un exemple de classification des défauts visuels

Cette classification est généralement couplée à une défauthèque listant et/ou illustrant l'ensemble des défauts pouvant être présents sur la surface d'un produit.

De nombreuses entreprises (c'était le cas de l'ensemble des partenaires du projet DASuVA) considèrent qu'une détection efficace implique que la défauthèque mise à la disposition des contrôleurs soit la plus complète possible et puisse être continuellement enrichie lorsque de nouveaux défauts sont détectés. Dans ces conditions, la détection se révèle inévitablement compliquée pour le contrôleur qui doit parvenir à assimiler la totalité des défauts susceptibles d'être détectés.

Pour réduire cette difficulté, nous avons établi une distinction entre *anomalie* et *défaut*. Nous pensons que, durant la phase d'exploration, le contrôleur doit détecter, non plus des défauts, mais des anomalies (ce n'est que durant l'étape suivante, l'étape d'évaluation, qu'une anomalie passera, ou non, à l'état de défaut).

Une anomalie est liée à la présence d'un écart de couleur, de relief, de forme et/ou de contraste. Nous avons ainsi considéré que trois types d'écarts pouvaient être détectés :

- un écart local (par exemple, la présence d'une rayure, d'une tache, etc.)
- un écart par rapport à une référence (par exemple, une différence de couleur, de texture ou de contraste par rapport à ce qui est attendu et qui a été préalablement défini)
- un écart par rapport aux intentions du concepteur (par exemple, une différence de couleur d'un composant par rapport aux autres composants adjacents).

Dans nos travaux, nous avons choisi de nous limiter aux anomalies résultant d'un écart local et non évolutives. Notre proposition a été de déterminer des types d'anomalies génériques susceptibles de regrouper l'ensemble des anomalies pouvant être détectées sur la surface d'un produit.

Nous avons proposé (68 et 69) **une classification des anomalies d'une surface en quatre types** :

- **Marque** : tout ce qui abîme la surface, une rupture dans la forme (un coup, une rayure, une griffure, une piqûre, etc.)
- **Hétérogénéité** : tout ce qui fait perdre à la surface son homogénéité (une tâche, une différence de couleur, etc.)
- **Pollution** : tout ce qui s'est ajouté à une surface et qui n'est pas souhaitable (un poil, une salissure, un point noir, etc.)
- **Déformation** : tout ce qui modifie la forme de la surface (une surface exagérément polie, une ligne de lumière non régulière, etc.)

Toute anomalie détectée est ainsi décrite avec l'un de ces quatre types d'anomalies. Cette classification présente l'avantage d'être utilisable pour tout type de produits. L'utilisation d'un nombre réduit de descripteurs diminue également la connaissance que les contrôleurs doivent acquérir et maîtriser pour effectuer leurs contrôles. Enfin, elle contribue à améliorer de manière significative la détection des anomalies et réduit nécessairement la variabilité des résultats de leurs contrôles.

2.3.2. Formalisation de la méthode d'exploration

Une partie de nos activités a été de proposer à nos partenaires industriels de nouvelles pratiques pour la détection des anomalies. La Figure 19 montre par exemple celle qui a été proposée à l'entreprise Patek Philippe, dans le cadre du travail de thèse de Anne Sophie Guerra (70), pour assister les contrôleurs dans la détection des anomalies présentes sur les boîtes de montre.

2. Procédure de visitage d'une boîte
Prendre la boîte dans les mains en respectant toutes les précautions de manipulation définies auparavant

N°	Description de l'opération	Outils	Remarques/Observations
1	Observer de manière générale la boîte	Oeil	Ceci pour observer différents éléments : document, n° consécutif, plan de joint, la couleur de tous les composants, la symétrie des cornes...
Contrôler le dessous de la boîte			
2	le fond (plein ou saphir)	Oeil	En cas de fond satiné faire attention à son homogénéité
3	Les dessous des cornes	Oeil	
4	Présence des poinçons	Oeil	
5	L'intérieur corne	Oeil	
En cas de fond saphir			
6	Le cran de glace	Loupe 2,5	
7	La glace	Loupe 2,5	
Contrôler les côtés de la boîte			
8	La bande de carrure	Loupe 2,5	
9	La couronne	Loupe 2,5	Vérifier le fonctionnement
10	Les poussoirs	Loupe 2,5	Vérifier le fonctionnement
11	Les correcteurs	Loupe 2,5	Vérifier le fonctionnement
12	L'extérieur corne	Loupe 2,5	
13	L'entre corne	Loupe 2,5	
Contrôler le dessus de la boîte			
14	Le cran de glace du dessus	Loupe 2,5	
15	La glace	Loupe 2,5	Chassage à plot, antireflet, réhaut, composants à l'intérieur
16	La lunette	Loupe 2,5	Vérifier l'alignement du satinage
17	La carrure	Loupe 2,5	
18	Les dessus de corne	Loupe 2,5	
19	Faire une vue d'ensemble de la boîte : dessus, côtés et dessous	Oeil	
20	Mettre la pièce dans la protection qui lui est adaptée et dans son plateau		

Figure 18. Procédure de détection des boîtes de montre pour Patek Philippe

Dans cette procédure, l'accent a été mis sur l'indication de l'ensemble des zones à explorer, ainsi que sur les moyens de contrôle à utiliser, pour détecter toutes les anomalies pouvant être présentes sur le produit.

En observant les pratiques de nos partenaires industriels du projet DASuVA, nous avons remarqué que les procédures mises à disposition des contrôleurs n'évoquaient que très partiellement la stratégie d'exploration des anomalies. Les modifications que nous avons apportées à leurs procédures visaient à y intégrer les éléments d'une stratégie systématique des produits, celle-ci produisant, comme l'ont montré (Arani et al., 1984) et (Wang et al., 1997), de meilleurs résultats dans la détection des anomalies qu'une stratégie aléatoire. Les Figures 19 et 20 montrent un extrait des procédures que nous avons mises en place respectivement chez Eudica et chez St Dupont dans le but de décrire au contrôleur le parcours des yeux qu'il doit effectuer lors de l'exploration du produit.

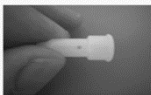
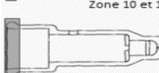
 Orientation de la pièce : face extérieure pièce face opérateur Moyen de contrôle : Binoculaire Réglage : Molette latérale indice 2 (équivalent à grossissement X 20)			
Zone	Critère	Code	Condition d'acceptation
 Zone 8	Point d'injection		0,02 mm maxi
 Zone 1	Toile verticale		0,02 mm maxi
 Zone 2	Toile horizontale		0,05 mm maxi
 Zone 10 et 11	Coups Manque matière Décalage Plan de joint		ø10.00 - 0,05/0

Figure 19. Extrait d'une procédure d'exploration des anomalies pour Eudica

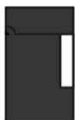
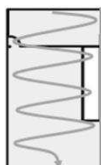
Importance of the area	Instructions	Anomalies to detect
4. CONTRÔLE FACE AVANT		
		Briques laque et orfèvre : Mark Distortion Heterogeneity Pollution
		Mark Distortion Heterogeneity Pollution

Figure 20. Extrait d'une procédure d'exploration des anomalies pour ST Dupont

2.3.3. Caractérisation d'une anomalie

Après qu'une anomalie ait été détectée par le contrôleur et décrite comme étant de type *Marque*, *Hétérogénéité*, *Pollution* ou *Déformation*, elle doit ensuite être caractérisée. **La Table 21 montre l'ensemble des attributs que nous avons proposé pour effectuer cette caractérisation.** Ces attributs sont répartis en trois groupes, chacun d'eux se référant à la manière dont le contrôleur explore le produit. Le contrôleur focalise d'abord son attention sur l'anomalie elle-même (*Description factuelle*), analyse les conditions dans lesquelles cette anomalie est perçue (*Conditions d'observation*) et considère enfin l'environnement, d'abord local puis global, de cette anomalie (*Perspective*).

	Attribut	qui caractérise...
Description factuelle	Taille	la taille de l'anomalie (par exemple, longueur)
	Forme	la forme de l'anomalie (par exemple, forme ovale et régulière)
Conditions d'observation	Distance	la distance en dessous de laquelle l'anomalie est visible (par exemple, visible à moins de 30 cm)
	Orientation	les angles d'observation où l'anomalie est visible (par exemple, visible sous tous les angles)
	Eclairage	l'intensité lumineuse nécessaire pour voir l'anomalie (par exemple, visible à moins de 200 lx)
	Durée	le temps nécessaire pour voir l'anomalie (par exemple, visible immédiatement dès le début de l'exploration)
	Direction	la direction dans laquelle l'anomalie est visible (par exemple, visible lorsque le produit est orienté verticalement)
Perspective	Impact local	l'impact de l'anomalie dans son environnement proche (par exemple, impact faible car forme de l'anomalie en cohérence avec le décor)
	Impact global	l'impact de la position de l'anomalie sur le produit en terme de perception globale (par exemple, l'anomalie est facilement visible parce qu'elle se trouve sur une partie visible du produit).

Table 21. Les attributs de caractérisation d'une anomalie

Pour chacun de ces attributs, le contrôleur donne ensuite une intensité. Pour y parvenir, il doit disposer d'un standard détaillant l'ensemble des valeurs possibles de chaque attribut et leurs significations respectives. La Table 22 montre un extrait du standard que nous avons défini (68), pour l'entreprise ST Dupont pour caractériser toute anomalie relevée lors d'un contrôle sur la surface d'un briquet pour les attributs *Orientation*, *Forme* et *Taille*.

Attribut	Niveau	Valeur	
Orientation	Visible sous un angle d'observation	2	
	Visible sous plusieurs angles d'observation	3	
	Visible sous tous les angles d'observation	4	
Forme	Ronde	1	
	Allongée	2	
Taille	Ø < 0,2 (ronde)	Longueur < 1,5 et fine (allongée)	0
	Ø > 0,2 and Ø < 0,3 (ronde)	Longueur > 1,5 et fine (allongée)	1
	Ø > 0,2 and Ø < 0,35 (ronde)	Longueur < 1,5 et large (allongée)	2
	Ø > 0.35 (ronde)	Longueur < 1,5 et large (allongée)	3

Table 22. Un extrait du standard de caractérisation d'une anomalie (ST Dupont)

Concernant les attributs *Impact local* et *Impact global*, nous avons montré, comme l'illustre la Table 23, que **les lois de Gestalt (*Similarité*, *Proximité*, *Continuité* et *Fermeture*)** contribuaient à mieux rendre compte la mise en perspective de l'anomalie sur la surface de la pièce.

LOI DE SIMILARITE Lorsque les objets possèdent des caractéristiques identiques (forme, taille ou orientation), l'observateur les perçoit comme un groupe au lieu de percevoir les percevoir séparément.	
Impact local élevé lorsque l'anomalie (le grand rond) est située à proximité d'objets similaires et qu'elle est différente de ces objets	
Impact local faible lorsque l'anomalie (le grand rond) est située à proximité d'objets non similaires	
LOI DE PROXIMITE Lorsque les objets sont proches les uns des autres, l'observateur les perçoit comme un groupe au lieu de les percevoir séparément.	
Impact local élevé lorsque l'anomalie (le rond noir) est éloignée des groupes d'objets proches les uns des autres.	
Impact local faible lorsque l'anomalie (le rond noir) est proche d'un groupe d'objets proches les uns des autres.	
LOI DE CONTINUITE Lorsque les objets sont situés sur une même ligne, l'observateur les perçoit comme un groupe au lieu de les percevoir séparément.	
Impact local élevé lorsque l'anomalie (le rond noir) est éloignée d'un groupes d'objets situés sur une même ligne.	
Impact local faible lorsque l'anomalie (le rond noir) est sur la même ligne que celle formé par le groupe d'objets.	
LOI DE FERMETURE Lorsqu'une forme géométrique n'est pas complète, l'observateur la perçoit comme fermée.	
Impact local faible lorsque l'anomalie correspond à une forme géométrique non fermée.	

Table 23. Impact local d'une anomalie / Lois de Gestalt

En fonction de l'application des lois de Gestalt, le contrôleur est en situation de donner une valeur à l'attribut *Impact local* d'une anomalie. La Table 24 montre un exemple de standard qui peut être mis à sa disposition du contrôleur, en complément de celui donné dans la Table 20.

Valeur Attribut « Impact »	LOIS DE GESTALT		
	Similarité et Proximité	Continuité	Fermeture
1 (Très faible)	Anomalie très similaire aux objets qui l'environnent et très proche de ces objets		
2 (Faible)	Anomalie similaire aux objets qui l'environnent et assez proche de ces objets		Anomalie parfaitement située dans la continuité d'une ligne
3 (Assez important)	Anomalie similaire aux objets qui l'environnent et assez éloignée de ces objets		Anomalie en partie située dans la continuité d'une ligne
4 (important)	Anomalie non similaire aux objets qui l'environnent et proche de ces objets		Anomalie non située dans la continuité d'une ligne
5 (très important)	Anomalie non similaire aux objets qui l'environnent et éloignée de ces objets		

Table 24. Valeurs de l'attribut Impact local / Lois de Gestalt

2.4. Méthode d'évaluation des anomalies

2.4.1. Cas d'une relation linéaire entre les attributs de l'anomalie et le résultat du contrôle

Après avoir été caractérisé l'anomalie selon plusieurs attributs, le contrôleur doit ensuite calculer une intensité globale à cette anomalie. La valeur obtenue lui permettra, à l'issue du contrôle, de déterminer si la pièce est conforme ou non conforme. Le calcul de cette intensité est réalisé en effectuant une somme pondérée des valeurs d'attributs. La Table 25 montre par exemple la grille d'évaluation que nous avons proposée (68) et qui a été mise en place dans l'entreprise Fournier.

Valeur initiale	Conditions d'observation			Perspective		DECISION
	Distance	Orientation	Orientation	Impact local	Impact global	
3	Anomalie visible à 30 cm	Anomalie visible sous certains angles (+0)	Anomalie dans le sens du décor ou de la ligne de la forme (-1)	Anomalie de même couleur que la pièce (+0)	Anomalie non visible avec aménagement monté, fermé et/ou ouvert (-1)	<=5 Conforme
4	Visible à 1 m		Anomalie dans un décor uni (+0)		Anomalie visible seulement avec aménagement monté et ouvert (+0)	
5	Visible à 3 m	Anomalie visible sous tous les angles (+1)	Anomalie dans le sens oppose au décor (+0)	Anomalie causant un contraste de couleur (+1)	Anomalie visible avec aménagement monté et fermé (+1)	>5 Non Conforme

Exemple : Une anomalie visible à 1m, sous tous les angles, dans un décor uni, causant un contraste de couleur et visible sur aménagement monté et fermé aura une intensité égale à 7 (4+1+0+1+1) et sera jugée non conforme

Table 25. Un exemple de grille d'évaluation d'une anomalie (entreprise Fournier)

2.4.2. Cas d'une relation non linéaire entre les attributs de l'anomalie et le résultat du contrôle

J'avais noté cependant que la construction d'une grille d'évaluation pouvant poser des problèmes, en particulier lorsqu'aucune relation linéaire ne pouvait explicitement être établie entre les valeurs des attributs de description de l'anomalie et la valeur finale d'intensité. C'était le cas par exemple de l'entreprise ST Dupont avec laquelle nous avons collaboré. Pour pallier ce problème, nous avons utilisé un réseau de neurones (2).

Ce réseau est composé d'une couche d'entrée composé de n_e neurones (les e attributs de l'anomalie), d'une couche de sortie composé d'un unique neurone (la décision de contrôle) et plusieurs couches intermédiaires. L'apprentissage du réseau est effectué à partir d'un ensemble de N_k exemples d'anomalies $\{(x_1, o_1), (x_2, o_2), \dots, (x_k, o_k)\}$ avec :

x_k : vecteur des n_e valeurs des attributs de la $k^{\text{ième}}$ anomalie

t_k : valeur de sortie attendue, fournie par les experts, pour la $k^{\text{ième}}$ anomalie

o_k : valeur de sortie calculée, calculée par le réseau, pour la $k^{\text{ième}}$ anomalie

Chaque neurone j est connecté à chaque neurone i de la couche suivante. La valeur d'entrée du neurone i correspond à une somme pondérée des sorties o_j et la valeur de sortie du neurone i correspond au résultat d'une fonction d'activation f (dans notre cas, une fonction sigmoïde non linéaire) :

$$o_i = f(\sum_j w_{ij} o_j - \theta_i)$$

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

Pour tous les N_k exemples, l'erreur Q est calculée :

$$Q = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^K (o_i - t_i)^2$$

Les poids sont calculés à l'aide de la technique de retro propagation du gradient (Rojas, 1996) qui vise à minimiser l'erreur Q à chaque pas. La Table 26 montre un exemple de ce calcul réalisé à partir de 25 exemples fournis par les experts.

Pièce	X _k						t _k Decision (*)
	Dist.	Orient.	Taille	Forme	Impact Local	Impact Global	
1	2	2	1	1	1	2	0
2	1	3	2	2	2	1	1
3	3	1	2	1	1	2	0
4	2	2	1	1	3	2	0
5	2	3	2	3	1	2	0
6	2	1	2	3	2	1	1
7	3	3	1	2	2	2	0
8	2	1	2	1	3	1	0
9	2	1	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	2	1	1
11	2	2	2	2	2	2	0
12	1	1	2	3	1	1	1
13	1	2	2	1	1	1	1
14	2	3	1	1	3	2	0
15	3	2	1	1	3	2	0
16	2	1	1	1	1	1	1
17	3	3	2	1	1	2	0
18	3	2	2	2	2	1	0
19	1	2	2	1	3	2	0
20	1	2	2	3	2	1	1
21	3	1	1	3	1	2	0
22	2	1	2	1	2	2	0
23	1	2	1	3	3	1	0
24	3	2	2	2	2	1	0
25	3	1	2	1	1	2	0

Poids W		
Couches 1 - 2	Couches 2 - 3	Couches 3 - 4
1,25113235	2,008033717	-4,81957938
1,83713356	-5,149549294	-8,13818758
2,42694381	-3,115685671	10,165202
-2,69548058	3,136690584	
3,12036503	-7,370603341	
2,59629298	-5,187267852	
4,93888783	-2,953619328	
-0,32579087	7,087173253	
-5,44919622	3,150288612	
-8,75730951		
2,03187057		
-6,78438159		
-1,77325739		
-1,9505911		
-2,9977124		
3,53868988		
-3,66206131		
-2,60379453		

* (0: part judged as not acceptable, 1: part judged as acceptable)

Table 26. Un exemple d'utilisation d'un réseau de neurones pour le contrôle visuel

Ce réseau a ensuite été utilisé à partir des données d'entrée des 30 pièces de la Table 13 pour calculer de manière automatique les sorties (Conforme ou non Conforme). Ces sorties calculées ont ensuite été comparées à celles fournies par les experts. Les pièces 12 et 27 ont été jugées par le réseau comme non conformes (comme les experts) et 3 pièces seulement sur les 27 restantes ont été jugées différemment.

Le réseau ainsi construit permet également de décider de façon automatisée de la conformité ou non de toute pièce. La Table 27 montre par exemple ce que le réseau délivre comme résultat pour une anomalie donnée (parmi les 324 caractérisations possibles), non présente parmi les 25 exemples fournis lors de l'apprentissage du réseau.

Pièce	D : Dist. (1 à 3)	O : Orient (1 à 3).	T : Taille (1 à 3)	F : Forme (1 à 3)	IL : Impact Local (1 à 3)	IG : Impact Global (1 à 3)	Decision (O: NC, 1: C)
1	1	2	2	1	1	2	1

Table 27. Un exemple de résultat de contrôle obtenu par calcul neuronal

Avec cette méthode, le contrôleur est en situation de pouvoir donner, de manière répétable et reproductible, une valeur à l'anomalie en fonction des valeurs d'attributs.

2.4.3. Formalisation de l'expertise d'évaluation

L'utilisation d'une grille d'évaluation et d'un réseau de neurones améliore de manière significative le contrôle visuel des produits. Une autre amélioration est obtenue en rendant explicite la connaissance du réseau de neurones qui établit le lien entre les attributs d'entrée et les sorties. L'objectif est de rendre cette connaissance partageable par l'ensemble des contrôleurs.

Certaines méthodes, comme SUBSET (Toxel et al., 1993), RuleNet (MacMillan et al., 1992), N-of-M (Towel et al., 1993), REAL (Craven et al., 1994), VIA (Thrun, 1995) ou RULENEG (Pop et al., 1994) extraient les règles à partir d'un réseau de neurones. Sur le même principe que ces outils, nous avons implémenté un algorithme (2) s'exécutant selon le modèle donné dans la Table 28.

1. Générer les résultats pour toutes les combinaisons possibles d'attributs
2. Pour chaque combinaison :
 - a. Extraire la règle
 - b. Vérifier si cette règle figure parmi celles existantes et sinon l'ajouter
 - c. Vérifier si cette règle est en accord avec les règles déjà existantes
3. Réduire le nombre de règles en généralisant lorsque cela est possible

Table 28. Algorithme d'extraction de règles à partir du réseau de neurones

Pour l'exemple de la Table 26, cela donne :

1. Les résultats sont obtenus via le réseau de neurones pour les 324 combinaisons possibles
 - 2a. Pour la combinaison d'attributs donnée dans la Table 27, la règle suivante est extraite :
 $IF (D=1 \text{ AND } O=2 \text{ AND } T=2 \text{ AND } F=1 \text{ AND } IL=1 \text{ AND } IG=2) \text{ THEN } Decision='C'$
 - 2b. Si la base de règles contenait déjà la règle suivante :
 $IF (D=1 \text{ AND } O=2 \text{ AND } T=2 \text{ AND } F=1 \text{ AND } IL=2 \text{ AND } IG=2) \text{ THEN } Decision='C'$
 Alors les 2 règles sont regroupées au sein de la même règle :
 $IF (D=1 \text{ AND } O=2 \text{ AND } T=2 \text{ AND } F=1 \text{ AND } (IL=1 \text{ OR } IL=2) \text{ AND } IG=2) \text{ THEN } Decision='C'$
 3. Si la base de règles contenait la règle suivante :
 $IF (D=1 \text{ AND } O=2 \text{ AND } T=3 \text{ AND } F=1 \text{ AND } (IL=3 \text{ AND } IL=2 \text{ AND } IL=3) \text{ AND } IG=2) \text{ THEN } Decision='C'$
 Alors la règle devient :
 $IF (D=1 \text{ AND } O=2 \text{ AND } T=3 \text{ AND } F=1 \text{ AND } IG=2) \text{ THEN } Decision='C'$
- Si la base de règles contenait les règles suivantes :
- $IF (D=1 \text{ AND } O=1 \text{ AND } T=3 \text{ AND } F=1) \text{ THEN } Decision='C'$
- $IF (D=1 \text{ AND } O=2 \text{ AND } T=3 \text{ AND } F=1) \text{ THEN } Decision='C'$
- $IF (D=1 \text{ AND } O=3 \text{ AND } T=3 \text{ AND } F=1) \text{ THEN } Decision='C'$
- Alors les 3 règles sont généralisées à l'aide de la règle :
- $IF (D=1 \text{ AND } T=3 \text{ AND } F=1) \text{ THEN } Decision='C'$

La Table 29 montre la formalisation sous forme de règles obtenues pour l'ensemble des 324 combinaisons.

<i>IF (distance=1) AND (local impact=1 OR impact local=2) AND (impact global=1) THEN Decision = 'C'</i>
<i>IF (impact global=2) THEN Decision = 'NC'</i>
<i>IF (impact local=3) THEN Decision='NC'</i>
<i>IF (distance=2) AND (taille=1 OR taille=2) AND (local impact=1 OR local impact=2) AND (impact global=1) THEN Decision = 'C'</i>
<i>IF (distance=2 OR distance=3) AND (size=3) THEN Decision = 'NC'</i>
<i>IF (distance=3) THEN Decision = 'NC'</i>

Table 29. Formalisation de l'expertise d'évaluation sous forme de règles

Dans le cas où les experts ne sont pas en mesure d'explicitier leur expertise d'évaluation aux contrôleurs, alors la méthode que nous avons proposée (réseau de neurones + algorithme d'extraction de règles) les aide à la formaliser sous la forme d'un ensemble réduit de règles (seulement 6 règles pour l'exemple précédent).

3. Bilan de mes travaux sur le contrôle visuel

Les pratiques que nous avons proposées pour l'exploration, l'évaluation et la caractérisation des anomalies lors d'un contrôle visuel sont aujourd'hui utilisées dans de nombreuses entreprises. C'est le cas chez notre partenaire initial (Patek Philippe), chez les partenaires du projet DASuVA (Fournier, ST Dupont, Eudica, Audemars Piguet, NTN SNR), mais ces pratiques ont également été adoptées par d'autres entreprises (de nombreuses autres entreprises horlogères genevoises, Tefal, etc.).

Les travaux menés dans le cadre du projet DASuVA, puis du projet MesUrA, ont abouti, d'abord à la réalisation d'un prototype, puis d'un dispositif industriel de détection des anomalies d'aspect d'un produit (sans manipulation), de simulation en temps réel de l'évolution de cet aspect en fonction de la configuration d'éclairage choisi, et d'évaluation des anomalies pour décider de la conformité ou non du produit. Le dispositif réalisé intègre un grand nombre de nos résultats sur la formalisation du processus de contrôle visuel humain sur les étapes de détection et d'évaluation des anomalies.

Mes travaux se poursuivent avec une implication dans le projet SPOT (Tolérancement de la PerceptiOn de Surface) qui a débuté en 2015 et qui réunit le laboratoire SYMME, les centres techniques CTDEC et CETEHOR. Ce projet vise à mettre en œuvre une nouvelle façon de définir des critères d'acceptation d'une surface, en intégrant, au-delà de la couleur, l'ensemble des informations qui forment la complexité de la perception sensorielle (par exemple, celles liées à la texture, à la micro géométrie des surfaces ou encore à l'interaction surface/environnement lumineux). L'enjeu est de mieux définir la relation clients/fournisseurs dans la définition des attendues d'une surface en terme de perception, mais aussi de créer si cela est possible un nouveau standard international. Un lien entre ce projet SPOT et le projet FeLiCiTy (voir plus loin) a été également réalisé avec l'objectif d'étudier comment le dispositif actuel de détection des anomalies pourrait, uniquement par vision, détecter des anomalies tactiles (« voir sans toucher »).

Références

- AIAG, 2010. Measurement Systems Analysis (MSA). Reference Manual. 4th Edition, Chrysler, Ford, GM.
- AFNOR BPX 10-042, 2006. Référentiel de bonnes pratiques - caractérisation sensorielle des matériaux - recommandations pratiques pour l'analyse visuelle de la matière première au produit fini. Saint Denis, AFNOR.
- Chabukswar S., Gramopadhye A.K., Melloy, B.J., Grimes L.W., 2003. Use of aiding and feedback in improving visual search performance for an inspection task. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing 13(2), pp. 115-136.
- Craven, M.W. and Shavlik, J.W., 1994. Using sampling and queries to extract rules from trained neural networks, ICML'1994: Proceedings of the 11th International Conference on Machine Learning, New Brunswick, NJ, Morgan Kaufmann, pp.37-45.
- Cohen, J., 1960, A coefficient of agreement for nominal scales, Educational and Psychological Measurement Vol.20, No.1, pp. 37-46.
- Fleiss, J. L., 1971. Measuring nominal scale agreement among many raters. Psychological Bulletin (76), pp. 378-382.

- Garaas T.W., Pomplun M., 2008. Inspection time and visual-perceptual processing. *Vision Research* 48, pp. 523-537.
- Garret S.K., Melloy B.J., Gramopadhye A.K., 2001. The effects of per-lot and per-item pacing on inspection performance. *International Journal of Industrial Ergonomics* 27, pp. 291-302.
- Gramopadhye A.K., Melloy B.J., Gopinath M., Budgavi M., 1997. An evaluation of economic and performance feedback in an inspection task with explicit economic consequences, *International Journal of Industrial Ergonomics* 20(4), pp. 327-337.
- Jebaraj D., Tyrrell R.A., Gramopadhye A.K., 1999. Industrial inspection performance depends on both viewing distance and oculomotor characteristics. *Applied Ergonomics* 30, pp. 223-228.
- Lee F.C.H., Chann A.H.S., 2009. Effects of magnification methods and magnifier shapes on visual inspection. *Applied Ergonomics* 40, pp. 410-418.
- McMillan, C., Mozer, M.C. and Smolensky, P., 1992. Rule induction through integrated symbolic and subsymbolic processing, in Moody, J.E., Hanson, S.J. and Lippmann, R.P., 1991. *Advances in Neural Information Processing Systems* 4, Morgan Kaufmann, San Mateo, CA.
- Melloy B.J., Das S., Gramopadhye A.K. and Duchowski A.T., 2006. A model of extended, semisystematic visual search. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 48(3), pp. 540-554.
- Nickles III G.M., Melloy B.J., Gramopadhye A.K., 2003. A comparison of three levels of training designed to promote systematic search behavior on visual inspection. *International Journal of Industrial Ergonomics* 32, pp. 331-339.
- Pop, E., Hayward, R. and Diederich, J., 1994. RULENEG: Extracting Rules from a Trained ANN by Stepwise Negation, QUT NRC Technical report.
- Rao P., Bowling S.R., Khasawneh M.T., Gramopadhye A.K., Melloy B.J., 2006. Impact of training standard complexity on inspection performance. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing* 16(2), pp. 109-132.
- Rebsamen M., Boucheix J.M., Fayol M., 2010. Quality control in the optical industry: From a work analysis of lens inspection to a training program, an experimental case study. *Applied Ergonomics* 41, pp. 150-160.
- Rojas R., 1996. *Neural networks – A systematical introduction*, Springer Verlag, Berlin.
- Schütte M., Dettmer U., Klatte H., Lauring W., 1999. Comparison of different layouts of inspection instruction for the production department of a company in the electronic industry. *International Journal of Industrial Ergonomics* 23, pp. 439-450.
- Taylor W., Melloy B.J., Dharwada P., Gramopadhye A., Toler J., 2004. The effects of static multiple sources of noise on the visual search component of human inspection. *International journal of industrial ergonomics* 34(3), pp. 195-207.
- Thrun, S., 1995. Extracting rules from artificial neural networks with distributed representations, in Tesauro, G., Touretzky, D. and Leen, T., 1995. *Advances in Neural Information Processing Systems* 7, MIT Press, Cambridge, MA.
- Towell, G. and Shavlik, J. 1993. Extracting refined rules from knowledge-based neural networks, *Machine Learning* 13 (1), pp.71-101.
- Vora J., Nair S., Gramopadhye A.K., Duchowski A.T., Melloy B.J., Kanki B., 2002. Using virtual reality technology for aircraft visual inspection training: presence and comparison studies. *Applied Ergonomics* 33(6), pp. 559-570.
- Wang M.J.J., Lin S.C., Drury C.G., 1997. Training for strategy in visual search, *International Journal of Industrial Ergonomics* 20, 101-108.

V. RESULTATS DE RECHERCHE SUR LE CONTROLE HAPTIQUE

1. A l'origine de mes travaux

A partir de 2015, j'ai souhaité étendre mes travaux menés sur le contrôle visuel au contrôle haptique des produits. Mon idée était de voir comment nos pratiques sur le contrôle visuel pouvaient être utilisées et appliquées à des contrôles utilisant d'autres sens, et en particulier le sens du toucher (le contrôle tactile est aujourd'hui de plus en plus présent dans les entreprises).

J'ai pour cela établi une collaboration avec l'entreprise INEVA, spécialisée dans la validation de produits mécatroniques et la réalisation de logiciels embarqués mais qui développe également des solutions dans le domaine de la caractérisation de la qualité perçue. Cette collaboration s'inscrit dans le cadre du projet FeLiCiTy avec la CIFRE de Bruno Albert que je co-encadre sur la période 2015-2018.

Comme pour le contrôle visuel, j'ai souhaité que nous démarrions nos travaux à partir d'un cas réel d'entreprise. La collaboration avec l'entreprise PIAGET, qui a démarré mi 2016, visait à aboutir à la création d'un standard de contrôle tactile des produits. Une première étude a été réalisée sur la manière dont les contrôles tactiles sont réalisés par les experts et les contrôleurs sur le bracelet d'une montre.

Plus précisément, cette étude avait pour but de lister l'ensemble des mots utilisés par les contrôleurs pour rendre compte de leurs sensations tactiles perçues, d'examiner les modes d'exploration utilisés, et enfin, de réaliser un test R^2 & R^2 (4) sur les résultats des contrôles effectués sur un échantillon de produits.

Cette analyse a d'abord montré que les contrôleurs utilisaient des termes parfois complètement différents pour décrire des sensations perçues sur des produits pourtant identiques. En majorité, les termes utilisés s'attachaient plutôt à décrire le type d'opération à l'origine de la sensation (*creusé, gratté, ...*) ou à décrire une perception hédonique du produit (*mauvais, satisfaisant, ...*). Les autres termes décrivaient effectivement la sensation perçue mais parfois de manière trop globale (*doux, large, ...*) ou trop imprécise (*agressif, viril*). On notait en tout cas l'absence d'un vocabulaire précis, connu et partagé par les contrôleurs, pour décrire leurs sensations tactiles.

L'étude a également mis en évidence des modes d'exploration très différents d'un contrôleur à l'autre. Par exemple, c'était majoritairement l'index qui était utilisé pour l'exploration mais d'autres contrôleurs utilisaient le pouce, l'ongle ou encore l'avant-bras. Les mouvements d'exploration étaient également différents, rectilignes pour certains et circulaires pour d'autres. Enfin, les contrôleurs ne partageaient pas la même vision de la qualité attendue pour le produit.

Comme dans le cas du contrôle visuel, le test R^2 & R^2 a révélé une grande variabilité des résultats du contrôle (répétabilité et reproductibilité de l'évaluation respectivement à 40% et à 22%).

A partir de constat, l'objectif de nos travaux a été d'abord, en lien avec les objectifs fixés dans le projet FeLiCiTy, de **proposer une méthode pour décrire des sensations au toucher d'un produit**. Il a été également de **lister l'ensemble des modes d'exploration possibles d'un contrôle haptique** et de les associer aux différentes sensations contrôlées. Notre objectif est également de **structurer l'ensemble des données obtenues au sein d'ontologies spécifiquement dédiées au contrôle haptique des produits**, et à terme, dédiées à l'ensemble des contrôles sensoriels. Ces résultats s'intègrent dans la définition d'un standard de contrôle tactile pour l'entreprise.

Les premiers résultats de ces travaux ont été présentés dans 1 revue internationale (1) et 3 congrès internationaux (22, 23 et 24).

2. Présentation des résultats

2.1. De sensation(s) à perception

Dans le domaine du visuel, j'avais plutôt axé ma recherche en direction de la notion d'anomalie esthétique, en regardant plus précisément comment la détecter plus efficacement et comment l'évaluer pour lui attribuer ou non le statut de défaut.

Dans le domaine de l'haptique qui est une combinaison des domaines tactile et kinesthésique, j'ai décidé d'aller plus en amont dans le processus de contrôle en m'interrogeant avec Bruno Albert sur ce qu'est une sensation haptique élémentaire, comment la détecter et comment la décrire. L'association de plusieurs sensations élémentaires donne lieu à la construction d'une perception sensorielle haptique du produit à partir de laquelle des anomalies peuvent être éventuellement identifiées. Chaque anomalie peut ensuite être traitée d'une manière analogue à celle que nous avons proposée pour traiter une anomalie esthétique.

La Figure 21 illustre le processus de création d'une perception haptique. Une sensation se définit comme la stimulation de la peau par des stimuli thermiques, mécaniques, chimiques ou électriques. Lorsqu'un stimulus est détecté, nos systèmes sensoriels s'activent et transforment l'énergie reçue en une énergie électrique par un changement de potentiel électrique neuronal (transduction). Ces informations ainsi codées sont ensuite traitées par certaines parties de notre système nerveux pour produire une sensation.

Notre cerveau interprète ensuite les différentes sensations qui lui parviennent, leur donne un sens, les contextualise, les complète au besoin par des images ou des expériences et génère au final une perception.

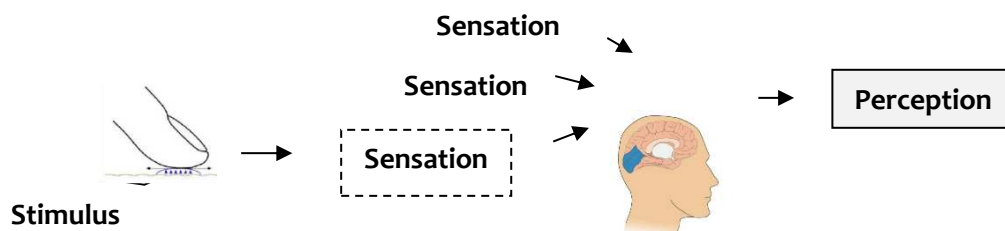


Figure 21. Processus de perception

Si la perception est le plus souvent considérée comme le résultat d'une interprétation « intelligente » de la sensation, il y a parfois une confusion dans l'utilisation du terme *sensation*. Dès lors que notre expérience, l'anticipation, le raisonnement, etc., interviennent pour élaborer une sensation, celle-ci fait place à la perception. Le passage d'une sensation à une perception est donc vite franchi.

En ce qui nous concerne, nous avons fait le choix de réserver le terme de **perception** pour désigner la mise en commun d'une ou plusieurs **sensations élémentaires** et leur interprétation.

Nous considérons donc une sensation élémentaire (l'adhérence par exemple) comme le résultat immédiat de la stimulation de nos récepteurs sensoriels et comme l'une des entrées brutes utilisées par notre cerveau pour élaborer, en y associant éventuellement des connaissances supplémentaires, notre perception tactile de l'objet.

Notre premier travail a donc été de lister ce que pourraient être les sensations élémentaires tactiles et kinesthésiques produites, détectables lors d'un contrôle par toucher de la surface d'un objet et, combinées entre elles, à l'origine de la perception du contrôleur.

2.2. Une liste des sensations élémentaires et de leurs descripteurs

Pour réaliser cette liste, nous avons commencé par établir une liste des descripteurs tactiles cités dans la littérature.

Nous nous sommes d'abord rapidement rendus compte que ces descripteurs étaient généralement très liés au produit examiné, au langage utilisé, ainsi qu'à la culture des contrôleurs. Dans (Issa et al., 2005) par exemple, ce sont six descripteurs invariants et communs à la langue anglaise et française qui sont proposés pour décrire les sensations tactiles perçues sur une étoffe : *Souple/Rigide, Tombant, Fin/Epais, Doux, Froissable et Nerveux*. Pour le papier, Summers et al. (2007) ne retiennent que deux descripteurs (*rugueux et rigide*). Le référentiel Sensotact (Crochemore et al., 2003) proposé par Renault liste quant à lui dix descripteurs pour rendre compte des perceptions tactiles sur des matériaux d'habitable automobile (tableaux de bord, tissu d'habillage, ...) : *dureté, nervosité, effet mémoire, collant, fibreux, relief, râpeux, bloquant, glissant et thermique*. Pour un emballage, Dumenil-Lefebvre (2006) suggère d'utiliser deux groupes de descripteurs, le premier s'adressant au verre dépoli (*granuleux, glissant, collant, rugueux, et gras*) et le second s'adressant à tout type de matériaux comme le carton ou le plastique (*frais, granuleux, collant, adhérent, glissant et rayable*).

Comme le remarque (Sola, 2007), certains descripteurs sont communs à plusieurs matériaux comme le descripteur *doux* utilisé par exemple pour la céramique, le cuir le bois ou le tissu. D'autres descripteurs sont au contraire très spécifiques au type de matériau comme, par exemple, le descripteur *rond* utilisé dans le toucher du cuir pour indiquer que la matière est perçue avec davantage d'épaisseur en son centre qu'à ses bords.

Enfin, un même descripteur peut parfois désigner une sensation tactile très différente selon le matériau considéré. Par exemple, le terme *gras* pour le bois exprime une sensation de liquide huileux laissée sur les doigts alors qu'il exprime une sensation d'épaisseur pour un tissu.

La Table 28 montre la première liste de descripteurs tactiles (tous matériaux confondus et en langue anglaise) que nous avons établie à partir de (Crochemore et al., 2003) (Duchamp et al., 2002) (Dumenil-Lefebvre, 2006) (Giboreau et al., 2007) (Issa et al., 2005) (Philippe et al., 2004) (Picard et al., 2003) (Sola, 2007) et (Summers et al., 2007).

<i>abrasive ; active ; adaptable ; adherent ; adhesive ; adjustable ; aggressive ; agreeable ; angled ; arched ; arid ; asperous ; attaching ; baby skin ; bendable ; bending ; bent ; blocking ; blunt ; bold ; bonding ; bristly ; brittle ; brushed ; bulgy ; bumpy ; burning ; chilly ; choppy ; circular ; clean ; clinging ; clumpy ; coarse ; coherent ; cold ; compact ; compliant ; consistent ; constrained ; continuous ; cool ; cottony ; creamy ; creasable ; crooked ; curved ; curvilinear ; damp ; dense ; downy ; dry ; dull ; dusty ; elastic ; enjoyable ; even ; falling ; feathery ; fibroid ; fibrous ; firm ; flat ; flexible ; floppy ; flossy ; flowing ; fluffy ; foamy ; formable ; fragile ; freezing ; fresh ; frosty ; furry ; fuzzy ; gelatinous ; glacial ; glistening ; glossy ; gluey ; glutinous ; grainy ; granular ; grasping ; greasy ; gripping ; gritty ; hairy ; hanging ; hard ; harsh ; hateful ; heavy ; hot ; humid ; humpy ; icy ; leathery ; light ; lightweight ; limp ; liquid ; loose ; lukewarm ; lumpy ; lustrous ; lying down ; malleable ; markable ; mellow ; membrane ; memory effect ; moist ; natural ; nervous ; obstructing ; offensive ; oily ; papery ; peach skin ; pellicle ; persistent ; pilous ; planar ; plastic ; pleasant ; pliable ; pointed ; polished ; protruding ; puffy ; pulpy ; reactive ; rebounding ; reduced ; reflecting ; regular ; replying ; resilient ; resistant ; responsive ; resting ; ribbed ; rigid ; robust ; rough ; round ; rubbery ; rude ; rugged ; sandy ; satin ; scarred ; scratchable ; scratchy ; shaggy ; sharp ; shiny ; silky ; sinuous ; skin ; sleek ; slender ; slick ; slimy ; slippery ; smooth ; soaking ; soapy ; soft ; solid ; sparse ; spiky ; spiny ; spongy ; springy ; sticky ; stiff ; straight ; stretchable ; strong ; superficial ; supple ; swollen ; tacky ; temperate ; tender ; thick ; thin ; tight ; topping ; tough ; twisted ; uniform ; veined ; velvety ; versatile ; viscous ; warm ; waxy ; wet ; wiry</i>

Table 28. Une liste de descripteurs tactiles

La question qui se pose est d'identifier parmi ces descripteurs haptiques ceux qui pourraient être considérés comme génériques, c'est-à-dire couvrant tout type de sensation et utilisable pour tout type de matériau.

Un travail de ce type a été réalisé par le laboratoire CPNI de l'ENSAM, en collaboration avec l'Institut de Métrologie Sensorielle (IMS) et avait abouti à la construction d'une sélection de 13 descripteurs génériques tactiles et/ou visuels (*accrochant, adhérent, brillant, chaud, dur, gras, lisse, opaque, plastique, râpeux, réchauffable, reflétant et relief*), liste qui a été ensuite réduite à 10 descripteurs (Table 30).

Descripteur	Type	Définition
Accrochant	T	Qui retient le doigt lors d'un mouvement parallèle à la surface
Adhérent	T	Qui retient le doigt lors d'un mouvement perpendiculaire à la surface suite à mise en pression
Chaud	T	Qui transmet la chaleur immédiatement au contact du doigt
Dur	T	Qui résiste à la pression du doigt
Gras	T	Qui laisse une trace grasse sur la surface après le passage du doigt
Talonnant	T	Qui après avoir cédé à la pression du doigt lui résiste brusquement
Pelliculé	T/V	Qui est recouvert d'une pellicule
Marquable	T/V	Surface qui reste marquée par les empreintes du doigt et/ou de l'ongle
Couchant	T	Surface dont les fibres restent couchées après le passage du doigt
Relief	T/V	Surface qui possède de petites aspérités

T : Tactile – T/V : Tactile/Visuel

Table 30. Une liste de descripteurs génériques tactiles et/ou visuels (Bassereau, 1995)

De manière analogue, une étude menée par le laboratoire NTT de Kyoto (Watanabe, 2014) a permis d'identifier quatre catégories de sensations tactiles (*Hardness/Softness, Dryness/Wetness* et *Roughness/Smoothness*) et représentait les relations entre ces catégories en positionnant les onomatopées tactiles.

Nous avons souhaité mener une étude similaire (en allant plus loin dans l'étude du vocabulaire et en s'intéressant notamment au domaine de l'analyse sémantique de données de masse) afin de déterminer ce que pourraient être les sensations élémentaires perçues par un contrôleur lors d'un contrôle haptique. Nous avons d'abord classé les descripteurs obtenus (Table 28) en les positionnant sur l'un des trois axes de perception proposés par Davie (1997) : l'axe « Source », l'axe « Effet » et l'axe « Propriétés physiques ». L'axe « Source » renvoie à un objet référence utilisée pour décrire la sensation (par exemple *oily* en référence à *oil*). L'axe « Effet » renvoie à l'effet produit par le toucher et à la perception qui en résulte (par exemple *agressive*). L'axe « Propriétés physiques » renvoie aux spécificités matérielles du matériau (par exemple, *markable*).

A partir de cette première classification, notre approche a ensuite consisté à utiliser les relations sémantiques entre descripteurs avec l'outil Gephi¹⁴ et la méthode OpenOrd (Martin et al., 2011) pour mettre en évidence des relations significatives entre eux. Celles-ci incluent des relations sémantiques de correspondance (synonymie, antonymie, méronymie, holonymie, hypernymie, hyponymie) mais aussi des relations de proximité dans l'analyse textuelle d'étude du domaine. Elles ont été obtenues à partir des bases de données lexicales Wordnet¹⁵ et Thesaurus¹⁶, ainsi qu'à partir du dictionnaire du sensoriel de Bassereau (2011). La Figure 22 montre la représentation obtenue après filtrage sémantique pour ne conserver que des descripteurs pertinents, précis, indépendants et discriminants (les descripteurs hédoniques sont également écartés). La représentation met en évidence les différentes catégories de sensation obtenues.

¹⁴ <https://gephi.org/>

¹⁵ <https://wordnet.princeton.edu/>

¹⁶ <http://www.thesaurus.com/>

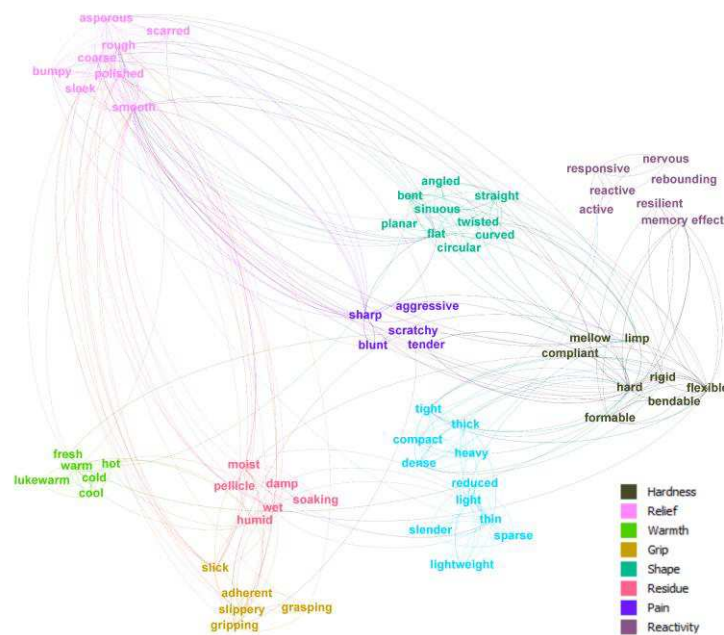


Figure 22. Les groupes de sensations tactiles constitués selon la distance sémantique

Dans cette représentation, les poids des relations sont obtenus selon la confiance donnée à la source à l'origine de ces relations (le poids d'une relation est plus élevé si celle-ci est issue d'un dictionnaire que si elle est le résultat d'une analyse textuelle). Les différentes relations sont par contre traitées de la même manière car elles représentent toutes une idée de proximité sémantique ou thématique entre mots (y compris lorsqu'il s'agit d'antonymes). L'hypothèse retenue est que les descripteurs les plus reliés entre eux font référence à la même catégorie de sensations. **La méthode met ainsi en évidence neuf groupes de descripteurs que nous avons définis (21) comme les sensations haptiques élémentaires et génériques du toucher : Grip, Relief, Shape, Hardness, Responsiveness, Residue, Warmth, Weight et Shape** (nous ne retenons pas le groupe des descripteurs hédoniques).

Le nom donné à chaque sensation élémentaire a été choisi de manière à refléter du mieux possible l'ensemble des descripteurs qui lui sont associés et à rendre possible ensuite une quantification de la sensation. Par exemple, la sensation *warmth* englobe les descripteurs *hot*, *cold*, *fresh*, *warm* et désigne une sensation neutre et non liée à un niveau d'intensité. La Table 31 liste l'ensemble des définitions que nous avons proposées pour les neuf sensations tactiles élémentaires.

	Sensation of...
Grip	stretching or holding back of the skin when touching the surface of an object
Relief	vibration or sub-centimetric shape when touching the surface of an object
Hardness	resistance of the surface of an object when pushing on it
Reactivity	residual deformation or interaction with the surface of an object after pushing on it.
Residue	matter remaining on the skin after touching the surface of the object
Warmth	thermal transfer between the surface of the object and its edges in particular
Pain	Damaging of the skin when touching a surface of an object
Weight	mass of the object in relation to its size
Shape	global shape of the surface of the object and its edges

Table 31. Les sensations élémentaires tactiles

Les descripteurs peuvent être utilisés pour quantifier l'intensité d'une sensation. La Table 32 montre par exemple les principaux descripteurs associés à chacune des sensations élémentaires et leurs niveaux d'intensités correspondants (de 1 à 5 pour désigner une sensation allant d'une faible intensité à une forte intensité). Certaines sensations élémentaires relèvent d'une sensation locale (*Grip*, *Relief*, *Hardness*, *Responsiveness*, *Residue*, *Warmth* et *Pain*), d'autres relèvent d'une sensation plus globale (*Weight* et *Shape*).

	Intensité	1	2	3	4	5
Sensations Locales	Grip (Adhérence)	<i>slippery</i>	<i>slick</i>	<i>adherent</i>	<i>grasping</i>	<i>blocking sticky</i>
	Relief (Relief)	<i>polished sleek</i>	<i>smooth</i>	<i>gritty scarred</i>	<i>rough humpy</i>	<i>rude</i>
	Hardness (Dureté)	<i>limp mellow</i>	<i>flexible</i>	<i>bendable formable</i>	<i>resistant firme</i>	<i>hard rigid</i>
	Responsiveness (Réactivité)	<i>memory effect</i>	<i>supple</i>	<i>relying resilient</i>	<i>responsive active</i>	<i>reactive nervous</i>
	Residue (Trace)	<i>dry arid</i>	<i>damp humid</i>	<i>moist viscous</i>	<i>slimy wet</i>	<i>soaking</i>
	Warmth (Chaleur)	<i>cold</i>	<i>cool fresh</i>	<i>temperate lukewarm</i>	<i>warm</i>	<i>hot</i>
	Pain (Douleur)	<i>tender</i>	<i>blunt</i>	<i>scratchy</i>	<i>pointed</i>	<i>sharp</i>
Sensations Globales	Weight (Poids)	<i>light thin</i>	<i>reduced slender</i>	<i>sparse</i>	<i>thick puffy</i>	<i>heavy dense</i>
	Shape (Forme)	<i>straight flat</i>	<i>curved</i>	<i>bent</i>	<i>twisted</i>	<i>round circular</i>

Table 32. Grille de description des sensations tactiles et exemples de descripteurs pour chaque sensation

N'étant pas liées à un type matériau, les sensations haptiques élémentaires que nous avons proposées peuvent être utilisées pour tout type de produit à contrôler. Lors d'un contrôle, la sensation perçue par le contrôleur est décrite à l'aide d'une ou plusieurs sensations élémentaires, l'intensité de la sensation étant quant à elle décrite à l'aide d'un ou plusieurs descripteurs.

Même si certains descripteurs usuels peuvent être associés aux sensations élémentaires, il s'agit également d'être capable de faire de même pour l'ensemble des autres descripteurs et mots que l'on peut rencontrer dans le domaine du toucher (nous en avons recensé près de 2800).

Une méthode consisterait à obtenir des experts du domaine un consensus sur le lien entre chaque descripteur et un valeur d'intensité (ou plage de valeurs) d'une sensation élémentaire. La méthode semble cependant difficile à mettre en œuvre compte tenu du nombre très important de descripteurs et de produits à réunir pour couvrir l'ensemble des domaines d'application possibles d'un contrôle par toucher. Nous avons donc opté pour une méthode de construction semi-automatisée de ces liens en utilisant plusieurs approches successives.

2.2.1. Une approche utilisant les liens entre stimuli et descripteurs

A partir de la connaissance des types de stimuli associés aux sensations élémentaires (étirement pour *Grip*, vibration pour *Relief*, pression pour *Hardness* et *Reactivity*, persistance pour *Residue*, transfert thermique pour *Warmth*, blessure for *Pain*, masse et taille pour *Weight* et localisation spatiale pour *Shape*), il nous a été possible d'établir des relations entre certains descripteurs et les sensations. Par exemple, le descripteur *Smooth* est relié à la sensation *Relief* parce qu'ils ont en commun la vibration comme type de stimuli. Un exemple de relations entre descripteurs et sensations est donné dans la Figure 23.

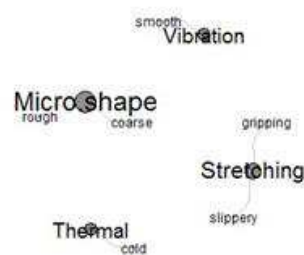


Figure 23. Lien entre stimuli et descripteurs tactiles

2.2.2. Une approche utilisant les relations sémantiques entre descripteurs

Pour construire la représentation de la Figure 22, nous avons sélectionné des descripteurs (65 en anglais) qui n'étaient reliés qu'à une sensation élémentaire (par exemple, le descripteur *Slippery* à la sensation *Grip*, le descripteur *Cold* à la sensation *Warmth*, etc.). Ce n'est évidemment pas le cas de tous les descripteurs du toucher qui peuvent être parfois reliés à plusieurs sensations. A partir d'une analyse sémantique effectuée sur les descripteurs initiaux, nous avons ajouté à notre liste d'autres descripteurs et construit leurs relations avec les sensations. C'est le cas par exemple du descripteur *Ice*, synonyme des descripteurs *Slippery* et *Cold*, qui est relié respectivement aux sensations *Grip* et *Warmth* (Figure 23b)

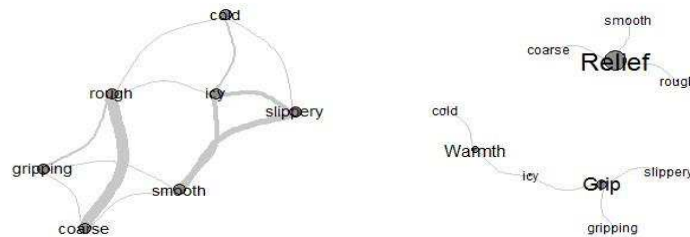


Figure 24. Liens sémantiques entre descripteurs et sensations tactiles

2.2.3. Une approche utilisant la logique floue

Avec l'approche précédente, nous avons considéré que les descripteurs pouvaient avoir des relations avec plusieurs sensations, mais sans exprimer que ces relations pouvaient être plus ou moins fortes. Avec la logique floue, la fonction associant un descripteur à une sensation peut prendre des valeurs comprises entre 0 (pas de lien) et 1 (lien exclusif), donnant ainsi la possibilité de quantifier l'importance de chaque relation. La Figure 25 montre par exemple le résultat de l'utilisation de cette approche pour le descripteur *Raw* relié à plusieurs sensations (*Relief*, *Hardness*, *Warmth* et *Pain*), avec une relation forte avec *Relief* (0,38) et faible avec *Pain* (0,04). La valeur est calculée en considérant que, plus un descripteur a de synonymes parmi les descripteurs associés à cette sensation, plus sa relation avec la sensation est forte.

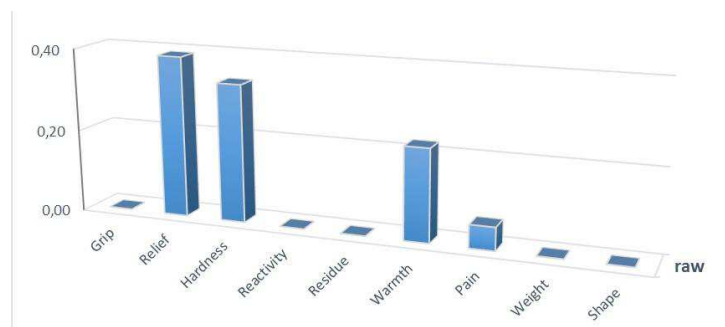


Figure 25. Quantification des relations entre descripteurs et sensations

Au final, nous disposons d'une liste de neuf sensations élémentaires, de leurs descripteurs et d'une quantification de leurs relations. Notre objectif est de parvenir à une liste qui puisse être utilisée pour tout type de produits. La Figure 26 montre la distribution des 2800 descripteurs recensés à ce jour pour trois domaines d'application du contrôle tactile.



Figure 26. Quantification des relations entre descripteurs et sensations

Dans notre modèle, la distribution des descripteurs est relativement uniforme avec 300 descripteurs en moyenne par sensation (partie extérieure de la représentation). Cela reste globalement le cas dans les trois domaines d'application étudiés (même si certaines sensations sont parfois plus représentées que d'autres).

Le modèle a également été utilisé dans l'entreprise Piaget et a permis, sur la base du recensement de l'ensemble des descripteurs utilisés par les contrôleurs, de définir *Grip* et *Relief* comme les deux sensations élémentaires à contrôler auxquelles sont désormais associées respectivement 3 et 5 descripteurs.

2.3. Modes d'exploration des sensations élémentaires

Nous avons ensuite cherché à établir le lien entre les sensations élémentaires et les différents récepteurs sensoriels, et cela de manière à en déduire ensuite, pour chaque sensation tactile, la zone de détection et le mode d'exploration à privilégier lors d'un contrôle.

2.3.1. Récepteurs sensoriels tactiles

Les récepteurs sensoriels sont généralement classés en fonction du type de stimulus auxquels ils répondent. Parmi les récepteurs somesthésiques présents sur la peau ou sur l'épiderme de la peau, on distingue ainsi :

- les thermorécepteurs, sensibles aux variations de température (chaud ou froid)
- les nocicepteurs, sensibles à la douleur (piqûre, pincement, températures extrêmes inférieurs à 20° ou supérieures à 43°, ...)
- les mécanorécepteurs, sensibles aux déformations mécaniques (vibration, étirement, pression, ...).

Les mécanorécepteurs prennent la forme de terminaisons nerveuses encapsulées comme les corpuscules de Meissner situées à la base de l'épiderme, de Ruffini situés dans le derme, de Pacini situés dans le derme profond et l'hypoderme, ou prennent la forme de terminaisons nerveuses libres comme celles associées aux cellules de Merkel.

Les mécanorécepteurs se distinguent par leur localisation (extrémité du doigt, paume intérieure ou paume extérieure), la taille de leur zone de sensibilité (de très localisée à étendue) et leur vitesse d'adaptation aux stimuli (de lente à rapide).

Les cellules de Merkel et les corpuscules de Meissner ont des zones de sensibilité très étroites (à peine 2 à 4 mm²) et bien délimitées, tandis que les corpuscules de Ruffini et de Pacini couvrent des zones plus étendues (le doigt entier et la moitié de la paume) dont les limites sont floues.

Les corpuscules de Meissner et les cellules de Merkel répondent rapidement à des variations d'intensité d'un stimulus (déformation cutanée de la peau) et, à l'inverse, les corpuscules de Merkel

et les corpuscules de Ruffini répondent lentement à un stimulus mais leur réponse se maintient jusqu'à la fin de la stimulation.

Nous avons retenu que les mécanorécepteurs réagissaient à trois types de sensibilités :

- La pression, mise en jeu par un appui important sur le revêtement cutané
- La vibration, qui correspond à des variations de pression
- La vitesse (parfois désignée par tact), qui résulte d'un contact léger avec la peau.

Les récepteurs à adaptation lente (Merkel et Ruffini) sont des récepteurs de pression. Ils sont actifs dès le début de la pression exercée et le restent jusqu'à la fin de celle-ci. Ils renseignent donc sur l'intensité et la durée de la pression. Les corpuscules de Ruffini répondent également à des étirements de la peau et renseignent également sur la direction dans laquelle la pression est exercée.

Les corpuscules de Pacini sont sensibles à la vibration. Ils répondent à des variations rapides d'intensité de pression (réponse optimale pour une fréquence de 300 Hz, mais pouvant couvrir également une fréquence variant de 30 à 1 500 Hz).

Les corpuscules de Meissner sont sensibles à la vitesse. Ils détectent les variations de contact léger des objets avec la peau et sont sensibles aux vibrations pour des fréquences comprises entre 5 Hz et 200 Hz.

2.3.2. Modes d'exploration tactile

Une sensation tactile résulte également d'un mouvement exploratoire particulier de la main ou d'un doigt en contact avec le produit. Le référentiel Sensotact développé par Renault distingue par exemple trois modes d'exploration pour rendre compte des sensations tactiles (exploration dynamique orthogonale à la surface de contact, exploration dynamique tangentielle et exploration statique) auxquels sont associés dix descripteurs (Table 32).

	Méthodes d'exploration		
	Dynamique orthogonale	Dynamique tangentielle	Statique
Descripteurs	Dureté Nervosité Effet mémoire Collant	Fibreux Relief Râpeux Bloquant Glissant	Thermique

Table 32. Les modes d'exploration du référentiel Sensotact

Lederman et Klatzky (1987) recensent quant à eux six modes d'exploration captant six types de sensations (Table 33). Chaque mode est défini à l'aide de quatre paramètres (Klatzky et Lederman, 1993) : le mouvement de l'effecteur final (statique ou dynamique), la direction dans laquelle l'effecteur exerce une force sur la surface de l'objet, (normale ou tangentielle), la région de l'objet qui intéresse l'effecteur (surface, aux angles ou à la surface et aux angles, l'espace de travail de l'objet (contraint ou non). Par exemple, la pression se caractérise par un mouvement dynamique, une direction normale, un contrôle de la surface et un espace de travail non contraint.

Mode exploratoire	Mouvement latéral	Soulèvement	Pression	Enveloppement	Contact statique	Suivi de contour
Descripteur	Texture	Poids	Dureté	Forme globale Volume	Température	Forme

Table 33. Les modes d'exploration du référentiel Sensotact

2.3.3. Liens entre sensations élémentaires, récepteurs sensoriels, modes et zones d'exploration

La Table 34 montre, pour chaque sensation élémentaire, le mode d'exploration à utiliser pour l'obtenir, le récepteur sensoriel le mettant en évidence et la zone d'exploration concernée. Ce

tableau résulte d'une étude que nous avons menée à partir de celles décrites par (Lederman et Klatzky, 2009) (DeBoissieu, 2010) (Bensmaïa et Hollins, 2005) (Jones et Lederman, 2006) (Crochemore et al., 2003).

Sensations élémentaire	Modes d'exploration	Récepteurs sensoriels	Zones d'exploration
Grip (Adhérence)	Dynamique Tangentielle	Majoritairement Pacini (adaptation rapide, répondent à des variations rapides d'intensité de pression) + Ruffini	
Relief (Relief)	Dynamique Tangentielle	Majoritairement Merkel (réponses à des dépressions minimales de la peau lors de mouvements légers en surface, sensibles aux pointes, courbes et angles) + Pacini Ou Meisner si contact statique	
Hardness (Dureté)	Dynamique Orthogonale	Majoritairement Merkel (adaptation lente pour rendre compte de l'intensité du stimulus) + Ruffini	
Responsiveness (Réactivité)	Dynamique Orthogonale	Meissner (adaptation rapide, permettant de reconnaître des stimuli différents et très rapprochés les uns des autres) + Ruffini et Merkel + Propriocepteurs	
Residue (Résidu)	Dynamique Orthogonale + Dynamique Tangentielle	Pacini (adaptation rapide et discrimination de stimuli, sensation étendue) + Merkel	
Warmth (Chaleur)	Contact statique	Thermorécepteur (terminaisons nerveuses libres et Ruffini)	Doigt, Paume
Pain (Douleur)	Dynamique Orthogonale et Dynamique Tangentielle	Nocicepteur (terminaisons nerveuses libres) + Merkel et Ruffini	Doigt, Paume
Weight (Poids)	Soulèvement	Propriocepteurs + Merkel et Ruffini	Main, bras (+doigt)
Shape (Forme)	Enveloppement	Majoritairement Ruffini (réponse persistante, sensation globale avec l'objet, donnant des informations sur l'intensité du stimulus) + Propriocepteurs	

Table 34. Sensations tactiles élémentaires, zones et modes d'exploration

Le travail qui suivra dans les prochains mois consistera à établir un lien entre les capteurs haptiques (existants ou à développer) avec les sensations élémentaires génériques.

2.4. Représentation par ontologies

Le contrôle qualité haptique est le plus souvent un contrôle humain. Comme nous l'avons fait pour le contrôle visuel, notre recherche vise également à proposer des solutions allant vers une automatisation partielle ou totale de ce contrôle. Cela nécessite que les informations du domaine haptique (descripteurs, sensations, modes d'exploration, perception, etc.), ainsi que les relations entre elles, puissent être mémorisées par un système automatisé intégrant, si possible, des mécanismes de raisonnement sur ces connaissances.

Nous nous sommes donc intéressés aux ontologies qui donnent une représentation structurée et sémantique des connaissances. Définie comme une spécification d'une conceptualisation partagée (Grüber, 1993), une ontologie de domaine décrit les connaissances d'un domaine particulier et donne la possibilité de raisonner sur ces connaissances. Le vocabulaire conceptuel utilisé est ainsi structuré en un ensemble de concepts, représentant les objets du domaine, ainsi qu'un ensemble de relations entre ces concepts. La sémantique du domaine est quant à elle exprimée à l'aide d'axiomes qui spécifient la manière dont les concepts et les relations peuvent être utilisés.

Pour le domaine du contrôle haptique, nous utilisons la méthode KREM (Figure 23) développée par le laboratoire ICube et décrit dans (Zanni-Merk, 2015), qui fournit un cadre de développement des modèles ontologiques. L'un des avantages de cette méthode est de prendre en compte l'expérience et l'expertise des experts du domaine, ainsi que le contexte d'application des connaissances, afin d'enrichir les modèles de connaissances et les adapter à leur environnement d'utilisation.



Figure 23. L'architecture du modèle d'ontologie KREM (Zanni-Merk, 2015)

Le modèle KREM intègre quatre types de composants inter reliés :

- Le composant *Knowledge* qui contient l'ensemble des ontologies du domaine
- Le composant *Rules* qui inclut plusieurs mécanismes de raisonnement sur ces connaissances
- Le composant *Experience* qui capitalise certaines connaissances en vue de leur réutilisation
- Le composant *MetaKnowledge* qui contient des connaissances sur les trois autres composants en indiquant, par exemple, quelles sont les règles (parmi celles venant de l'ensemble initial du composant *Knowledge* ou celles du composant *Experience*) qui peuvent être utilisées en fonction du contexte considéré.

Dans la littérature, la seule ontologie dans le domaine de la perception humaine que nous avons trouvée est celle proposée dans (Myrgioti et al., 2013) et qui utilisée pour le développement de logiciels utilisant des interfaces haptiques.

Nous décrivons ici le modèle à base d'ontologies que nous proposons pour la perception haptique appliquée au contrôle qualité (avec l'idée, ensuite, de généraliser ce modèle au domaine plus large de la perception sensorielle).

Parmi les ontologies de haut niveau, nous avons opté pour l'ontologie SSN (Semantic Sensor Network) proposée dans (Compton et al., 2012) et soutenue par le World Web Consortium, qui est utilisée pour décrire un capteur sensoriel. C'est une *core ontology*, c'est-à-dire une ontologie composée d'un ensemble minimal de concepts requis pour le domaine. Elle est reliée à l'ontologie de haut niveau DOLCE+DnS Ultralite (DUL) qui fournit l'ensemble des concepts génériques de haut niveau. La Figure 24 donne un extrait de l'ontologie SSN.

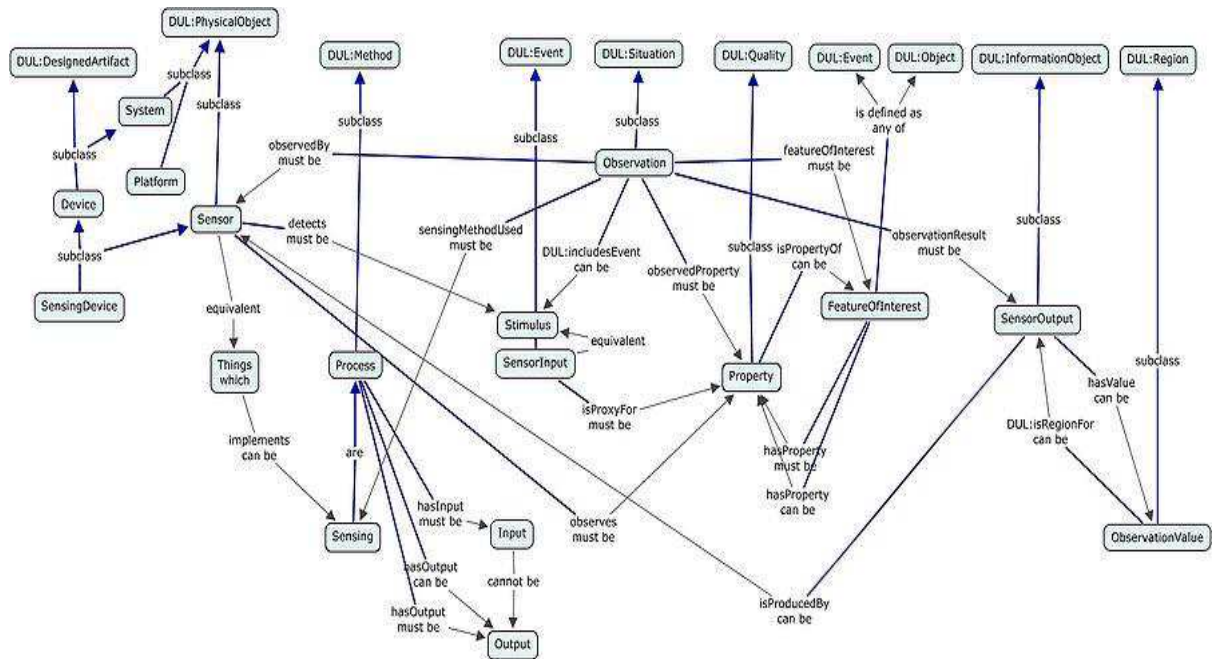


Figure 24. Le lien entre les ontologies DUL et SSN¹⁷

Le contrôle sensoriel regroupe plusieurs domaines pour lesquels nous avons défini des ontologies, toutes reliées à l'ontologie SSN : ontologies *Application Context*, *Sensing* et *Sensory Perception* (Figure 25). Le processus de contrôle est également représenté par une ontologie *Control process*.

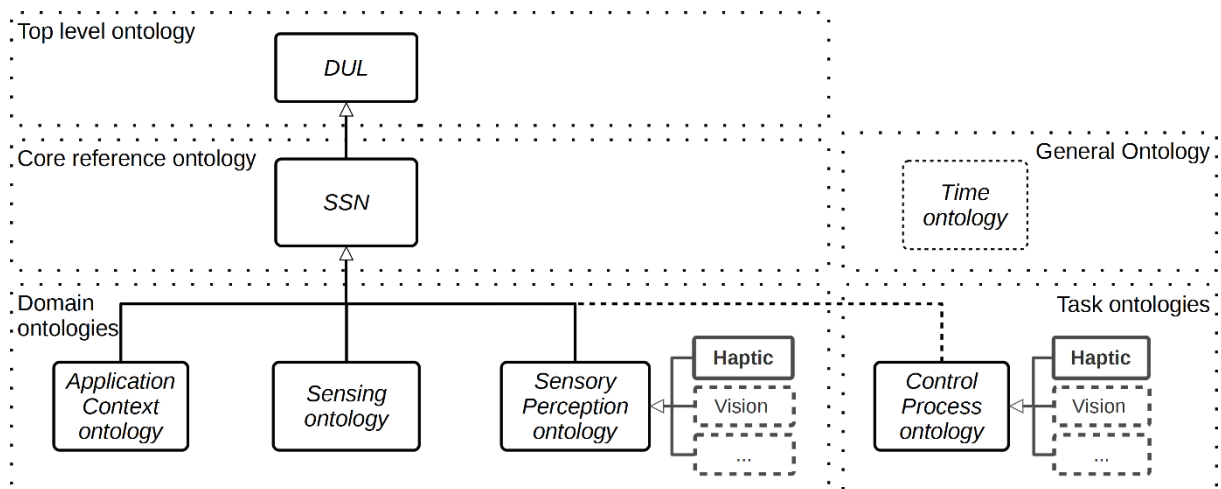


Figure 25. Proposition d'ontologies de domaine Contrôle Haptique Qualité

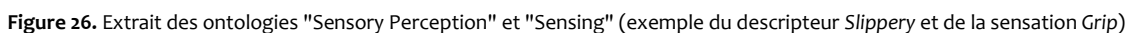
L'ontologie *Sensor* rassemble les informations sur les capteurs sensoriels pour mesurer l'intensité des sensations élémentaires. L'ontologie *Application Context* regroupe les informations sur les produits à contrôler. L'ontologie *Control Process* rassemble les informations sur les procédures et tâches à réaliser pour effectuer le contrôle.

Sur la base des différentes informations d'un contrôle haptique, la branche *Haptic* de l'ontologie *Sensory Perception* que nous avons construite inclut les concepts :

- *Sensation* qui est une description formalisée d'une sensation élémentaire (Grip, Relief, Hardness, Responsiveness, Residue, Warmth, Pain, Weight, Shape).

¹⁷ <https://www.w3.org/2005/Incubator/ssn/XGR-ssn-20110628/>

- La Figure 26 montre un extrait de cette ontologie (quelques informations associées à la sensation élémentaire Grip), ainsi que son alignement avec des éléments de l'ontologie de plus haut niveau SSN.



Le domaine de la qualité sensorielle haptique est un thème de recherche récent pour moi et pour la laboratoire SYMME (démarrage de nos travaux en 2015), mais l'intérêt que montrent les industriels sur ce sujet, ainsi que les premiers résultats publiés, laissent entrevoir des pistes intéressantes à renforcer et à développer dans les années à venir.

Mes travaux pourront également se poursuivre, avec Bruno Albert, par l'identification des capteurs, existants ou à développer, mesurant chacune des neuf sensations haptiques élémentaires. Le but que nous nous sommes fixés est de développer un capteur haptique (la plupart des capteurs existants sont des capteurs tactiles) capable, idéalement, de mesurer plusieurs sensations (et non plus dédié, comme c'est souvent le cas, à une seule sensation). A partir des données collectées par ces capteurs (l'ensemble des sensations avec leurs valeurs d'intensité), nous souhaitons également, à plus long terme, développer un système capable de délivrer une perception à partir des sensations collectées.

La combinaison des contrôles liés aux différents sens est également une perspective de ces travaux qui pourraient finalement mener à une meilleure définition des standards de contrôle et plus généralement de la qualité perçue des produits vis-à-vis de plusieurs sens différents (par exemple, vue et toucher).

Références

- Bassereau, J. F., 2011. Dictionnaire des mots sensoriels. Editions TEC&DOC. Lavoisier.
- Bassereau, J. F., 1995. Cahier des charges qualitatif design, élaboration par le mécanisme des sens. École nationale supérieure d'arts et métiers. Extrait de from <https://books.google.fr/books?id=2K3QMgEACAAJ>
- Bensmaïa, S., Hollins, M., 2005. Pacinian representations of fine surface texture. *Perception & psychophysics*, 67(5), pp 842–854.
- Crochemore, S., Vergneault, C., Nesa, D., 2003. A new reference frame for tactile perceptions: Sensotact. 5th Rose Mary Pangborn, Boston MA, USA, pp. 20–24.
- De Boissieu, F., 2010. Toucher artificiel à base d'un microcapteur d'effort : traitement du signal et des informations associées. PhD thesis, Université de Grenoble.
- Duchamp, R., Bassereau, J.-F., Dubois, P., Luong, T. H. L., 2002. Procédé et dispositif de contrôle sensoriel de la surface extérieure d'un objet. France.
- Dumenil-Lefebvre, A., 2006. Integration Des Aspects Sensoriels Dans La Conception Des Emballages En Verre : Mise Au Point D'Un Instrument Methodologique À Partir Des Techniques D'Evaluation Sensorielle. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers. Extrait de <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00001774/fr/>
- Giboreau, A., Dacremont, C., Egoroff, C., Guerrand, S., Urdapilleta, I., Candel, D., Dubois, D., 2007. Defining sensory descriptors: Towards writing guidelines based on terminology. *Food Quality and Preference*, 18(2), pp. 265–274. <http://doi.org/10.1016/j.foodqual.2005.12.003>
- Issa, M., Schacher, L., & Adolphe, D. C., 2005. Invariant attributes in the tactile characterization of fabrics. In *Proceeding, Fiber Society Spring Conference*.
- Jones, L. A., Lederman, S. J., 2006. Human hand function. Oxford University Press.
- Klatzky, R.L., Lederman, S.J., 1993. Spatial and non-spatial avenues to object recognition by the human haptic system. In N. Eilan, R. McCarthy, & B. Brewer Eds., *Spatial representation: Problems in philosophy and psychology*, Basil Blackwell: Cambridge, England, pp. 191–205.
- Lederman, S., Klatzky, R. L., 2009. Haptic perception: A tutorial. *Attention, perception & psychophysics*, 71(3), pp 1439–1459.
- Lederman, S.J., Klatzky, R.L., 1987. Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive Psychology*, 19(3), pp. 342–368.
- Martin, S., Brown, W. M., Klavans, R., Boyack, K. W., 2011. OpenOrd: an open-source toolbox for large graph layout. *Proc. SPIE*, 7868, January 2011, 786806–786811. <http://doi.org/10.1117/12.871402>
- Philippe, F., Schacher, L., Adolphe, D. C., Dacremont, C., 2004. Tactile feeling: Sensory analysis applied to textile goods. *Textile Research Journal*, 74(12), 1066–1072. <http://doi.org/10.1177/004051750407401207>
- Picard, D., Dacremont, C., Valentin, D., Giboreau, A., 2003. Perceptual dimensions of tactile textures. *Acta Psychologica*, 114(2), 165–184. <http://doi.org/10.1016/j.actpsy.2003.08.001>
- Sola, C., 2007. Y a pas de mots pour le dire, il faut sentir : Décrire et dénommer les happerceptions professionnelles. *Terrain*, 49.
- Summers, I. R., Irwin, R. J., Brady, A. C., 2007. Haptic discrimination of paper. In *Human Haptic Perception: Basics and Applications*, pp. 525–535. Basel: Birkhäuser Basel. http://doi.org/10.1007/978-3-7643-7612-3_44
- Watanabe, J., Kano, A. Sakamoto, M., 2014. Trend Visualization of Emotional Judgments on Materials in Contact Using Distribution Map of Japanese Onomatopoeic Words, *Transactions of Japan Society of Kansei Engineering* 13 (2), pp. 353–359.
- Zanni-Merk, C., 2015. Krem: A generic knowledge-based framework for problem solving in engineering – proposal and case studies. In *INSTICC*, editor, 7th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and KnowledgeManagement, pages 381–388..

VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Mes perspectives de recherche s'inscrivent dans deux directions :

- Poursuite des activités du Benchmarking avec un accent porté sur le partage des pratiques et des connaissances associées à ces pratiques
- Poursuite des activités sur le contrôle haptique et extension du travail vers la mesure de la Qualité Sensorielle

1. Formalisation des bonnes pratiques pour le benchmarking

1.1. Un nouvel état des lieux du benchmarking à réaliser

Nos derniers résultats sur le benchmarking remontent à 2008. Cependant, le constat que je fais aujourd'hui reste globalement le même. Selon l'enquête de Bain & Company réalisée en 2015 auprès de plus de 1000 entreprises de 10 pays, le benchmarking se classe globalement au 2^{ème} rang des 25 outils de management les plus utilisés (Table 35).

	Global	N. America	EMEA	APAC	L. America
Customer Relationship Management	1	4	1 (t)	2 (t)	4
Benchmarking	2 (t)	2 (t)	1 (t)	14	2
Employee Engagement Surveys	2 (t)	1	5	8	9 (t)
Strategic Planning	2 (t)	2 (t)	9	5 (t)	1
Outsourcing	5	6	3 (t)	5 (t)	9 (t)
Balanced Scorecard	6 (t)	7 (t)	3 (t)	15 (t)	3
Mission and Vision Statements	6 (t)	5	8	18	5
Supply Chain Management	8	7 (t)	10	2 (t)	13 (t)
Change Management Programs	9	9	6 (t)	21	9 (t)
Customer Segmentation	10	14 (t)	6 (t)	12 (t)	7
Core Competencies	11 (t)	10	—	7	—
Big Data Analytics	11 (t)	—	—	1	—
Total Quality Management	11 (t)	—	—	4	—
Satisfaction and Loyalty Management	16	—	—	9	—
Digital Transformation	19 (t)	—	—	10	—
Business Process Reengineering	15	—	—	—	6
Strategic Alliances	17	—	—	—	8

North America (US, Canada); EMEA (France, Germany, Spain and the UK); APC (China and India) and L. America (Mexico and Brazil).

Table 35. Classement des outils de management les plus utilisés dans 10 pays (source Bain & Company, 2014) ¹⁸

Cette enquête fait suite à d'autres et confirme également que le benchmarking s'est maintenu comme l'un des outils les plus utilisés ces 15 dernières années (Table 36).

Rang	2000	2006	2010	2012	2014
1	Strategic Planning	Strategic Planning	Benchmarking	Strategic Planning	CRM
2	Mission & Vision Statements	CRM	Strategic Planning	CRM	Benchmarking
3	Benchmarking	Customer Segmentation	Mission & Vision Statements	Employee Engagement Survey	Employee Engagement Survey
4	Outsourcing	Benchmarking	CRM	Benchmarking	Strategic Planning
5	Customer Satisfaction	Mission & Vision Statements	Outsourcing	Balance Scorecard	Outsourcing
6	Growth strategies	Core Competencies	Balance Scorecard	Core Competencies	Balance Scorecard
7	Strategic Alliances	Outsourcing	Change Management Programs	Outsourcing	Mission & Vision Statements
8	Pay-for-Performance	Business Process Reengineering	Core Competencies	Change Management	Supply Chain Management
9	Customer Segmentation	Scenarion & Contingency Planning	Strategic Alliances	Supply Chain Management	Change Management
10	Core Competencies	Knowledge Management	Customer Segmentation	Mission & Vision Statements	Customer Segmentation

Table 36. Evolution du classement des outils de management les plus utilisés (source Bain & Company, 2014)

¹⁸ <http://www.bain.com/publications/articles/management-tools-and-trends-2015.aspx>

Les entreprises interrogées, tous secteurs confondus, indiquent utiliser le benchmarking pour :

- Améliorer leur performance (le benchmarking est vu comme un moyen d'identifier les méthodes à l'origine d'une amélioration de la conception et production)
- Se positionner en termes de coûts par rapports à d'autres entités (le benchmarking est vu comme le moyen de découvrir des opportunités de réduction de coûts)
- Obtenir une avance stratégique (le benchmarking est vu comme un moyen de cibler les ressources critiques susceptibles de procurer un avantage)
- Augmenter le niveau de connaissance (le benchmarking est vu comme un moyen d'apporter et de partager de nouvelles idées dans une organisation apprenante).

La Figure 27 montre quant à elle le niveau de satisfaction des entreprises par rapport à l'ensemble des outils, le benchmarking se situant dans la moyenne.

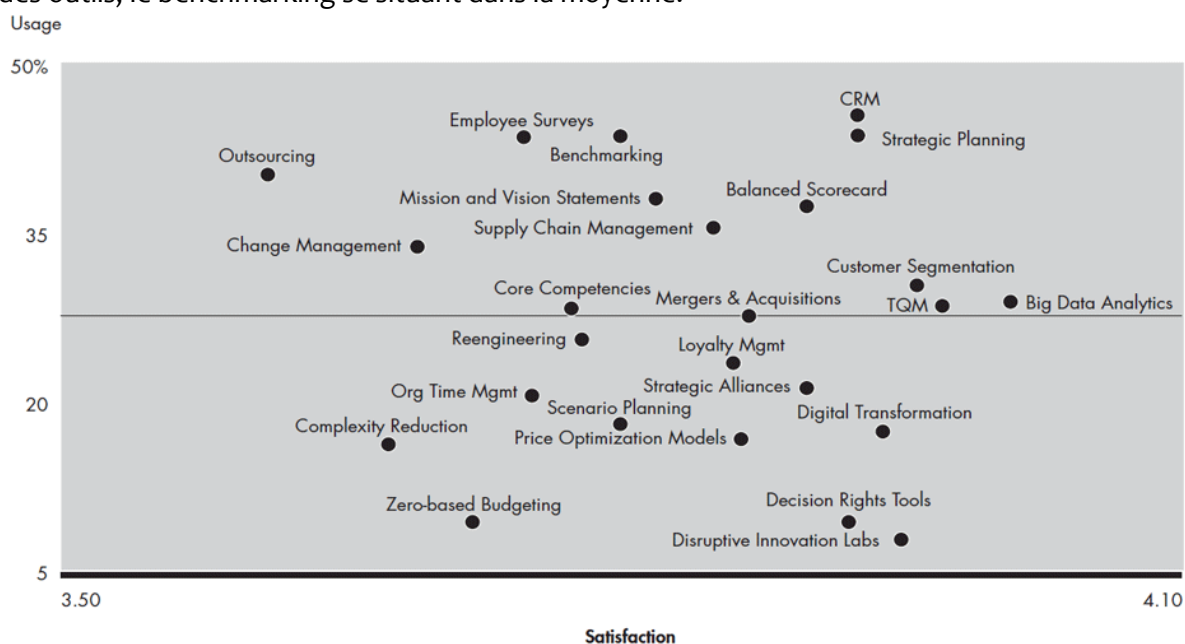


Figure 27. Usage et satisfaction des outils de management (source Bain & Company, 2014)

Si la démarche ne fait plus autant parler d'elle que dans les années 2000, elle reste cependant une réalité industrielle. Le nombre de publications dans ce domaine est toujours aussi important (1570 publications dont le titre contient le mot « Benchmarking » publiées depuis 2016, source Google Scholar), mais celles-ci sont très majoritairement axées sur les résultats de l'application de la démarche dans des secteurs d'activités très différents (santé, éducation, industrie, etc.). Cela explique peut-être pourquoi nos articles visant à proposer des solutions pour instrumenter la démarche, publiés pourtant il y a plus de 10 ans, sont encore cités (par exemple, "A typology of best practices for a benchmarking process", publié en 2005 et 21 fois cités depuis 2015).

Mon objectif est de poursuivre les activités dans ce domaine. Cela débutera prochainement par la réalisation d'un nouvel état de l'existant destiné à mettre en évidence les principales évolutions de cette démarche (nouveaux types de benchmarking, modèles, méthodes et outils, etc.). Mon idée est bien évidemment de retravailler sur la méthode que nous avons proposée pour accompagner les 5 phases de la démarche, mais elle est aussi de la compléter en nous appuyant sur les compétences présentes dans le laboratoire SYMME (par exemple, outils collaboratifs dans l'identification des best practices, application des principes et outils Lean dans la démarche, systèmes de recommandation pour valider des pratiques, utilisation des ontologies pour décrire les connaissances et le contexte associés aux best practices, etc.). Cela constitue en tout cas un sujet de thèse intéressant à développer dans un futur proche.

1.2. Les ontologies pour formaliser une bonne pratique

Un article¹⁹ de Xavier Perrin donne un point de vue intéressant qui me conforte dans la direction que je souhaite donner à mes recherches. Il rappelle que si les bonnes pratiques sont aujourd'hui très bien documentées dans certaines organisations (par exemple, l'APICS, l'ISM, l'Institut Lean France ou encore, l'ARDI Performance Rhône Alpes), elles sont très peu appliquées. Pour lui, ce sont davantage les « pires pratiques » qui prédominent dans les entreprises, les chantiers d'amélioration en cours visant plutôt à limiter les impacts de ces pratiques plutôt qu'à mettre en place de bonnes pratiques. Il cite l'exemple de plusieurs pratiques utilisées en gestion industrielle comme la non maîtrise des données, la défaillance des PIC et PDP, le non-respect de certaines règles dans l'utilisation du Kanban ou encore la priorisation parfois insatisfaisante des OF. Il se pose la question de savoir (y compris dans les entreprises qui en connaissent l'existence) pourquoi les bonnes pratiques ne sont pas davantage appliquées. Avec lui, je partage l'idée que la cause première n'est pas celle de la connaissance des bonnes pratiques (elles existent et sont connues), mais plutôt celle de l'absence d'un support à leur déploiement.

Un déploiement efficace passe par une formalisation des pratiques qui va bien au-delà de leur simple énoncé (comme cela est souvent le cas). Le recours aux ontologies me semble être une piste intéressante à explorer, avec la possibilité de structurer des connaissances associées à une pratique et/ou entre pratiques, de les enrichir et de déduire au besoin de nouvelles connaissances. Des ontologies appliquées à des pratiques industrielles existent déjà (par exemple, les ontologies appliquées à la sécurité industrielle proposées par Amjad Abou Assali à l'Ineris), mais l'enjeu serait d'aller vers la définition d'une ontologie (core ontologie) utilisable pour tout type de pratiques. La collaboration actuelle avec Cécilia Zanni-Merck (du laboratoire ICube) dans le cadre du projet FeLiCiTy sera probablement prolongée pour développer sur cette piste. Une collaboration avec l'ARDI, dans le cadre des ateliers de l'Industrie du Futur, serait également à développer sur ce sujet. Il me semble en tout cas pertinent de travailler à la fois sur **une méthode de déploiement d'une bonne pratique** (couvrant les étapes de planification, développement, suivi et standardisation), mais également **une méthode de formalisation d'une pratique** (suffisamment générique de manière à être adaptable à tout type de pratique).

1.3. Les outils collaboratifs au service du benchmarking

Les outils collaboratifs orientés sur la gestion des connaissances (KM) sont de plus en plus présents dans l'entreprise. Ils intègrent aujourd'hui aussi bien des fonctionnalités de production de connaissances que des fonctionnalités de traitement ou de recherche de contenu. La figure 28 montre par exemple le résultat d'une enquête²⁰ menée en 2017 par le cabinet Lecko sur les outils collaboratifs actuellement utilisés.

Ces outils se déclinent en trois types d'usage : le partage d'information éphémère (A), une gestion des connaissances "sociale structurée" (B), et une gestion des connaissances "structurée et administrée" (C).

¹⁹<http://www.consulting-xp.com/telechargement-pdf/14.pdf>

²⁰<http://www.journaldunet.com/solutions/reseau-social-d-entreprise/1171937-comparatif-des-outils-de-team-collaboration-la-matrice-de-lecko/>

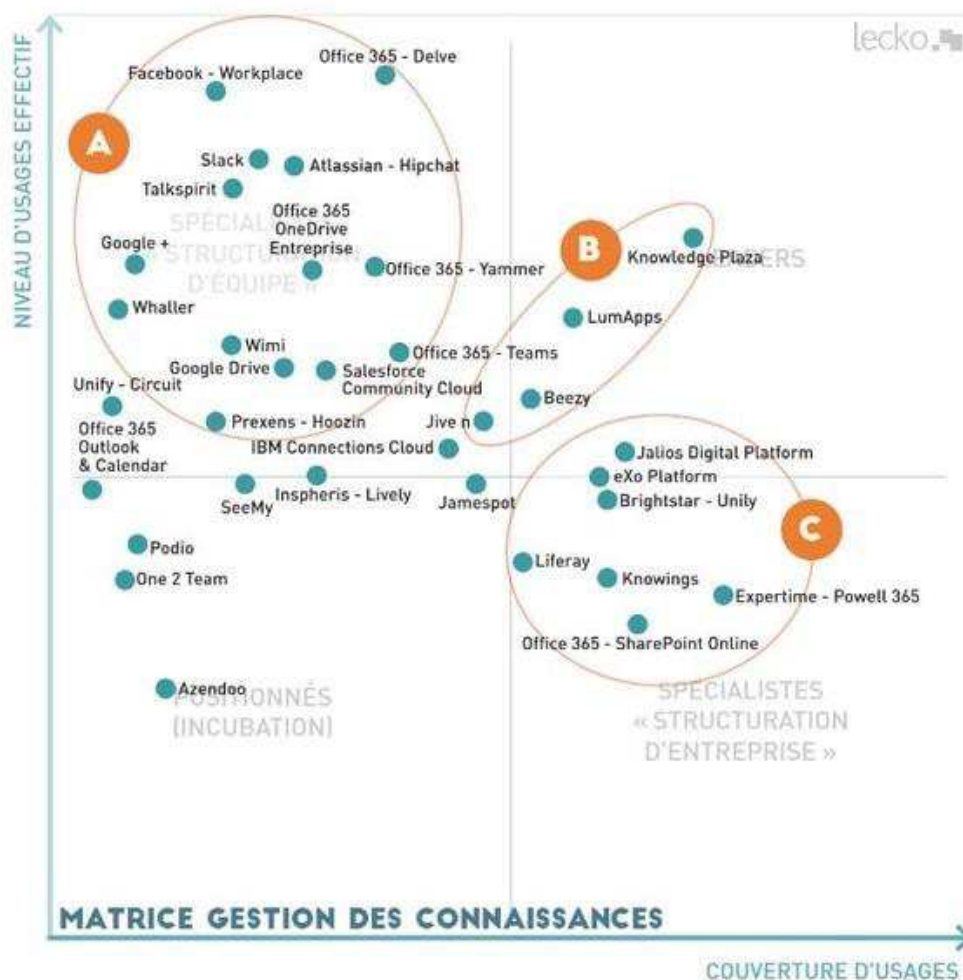


Figure 28. Analyse comparative des outils collaboratifs orientés KM (source Cabinet Lecko, 2017)

J'avais lancé, en collaboration avec les centres techniques suisses (CIMTEC Valais et CIMTEC Genève), un benchmarking entre plusieurs entreprises suisses et françaises. Les échanges entre ces entreprises avaient révélé des différences significatives dans les pratiques utilisées dans chaque pays et l'intérêt de partager ces pratiques. En tirant parti du travail que nous menons actuellement sur les pratiques en gestion de l'information (projet ADEQUATe), il me semble pertinent de démarrer de nouveaux benchmarkings entre les deux pays ciblant plus particulièrement ce sujet. L'objectif serait de montrer **comment utiliser les outils collaboratifs (orientés KM) comme supports à la représentation et l'échange de bonnes pratiques en vue d'un benchmarking** (interne et/ou collaboratif).

2. Une orientation des recherches sur la Qualité Sensorielle

En 2015, j'ai souhaité démarré des recherches sur les pratiques utilisées et/ou à développer dans le domaine du contrôle haptique. Après le contrôle visuel, travailler sur ce sujet nous amène à faire un pas de plus en direction de la thématique de la **Qualité Sensorielle**. C'est cette thématique de recherche que je compte développer dans les années à venir d'abord avec la fin du projet FeLicitY et, dans son prolongement, le démarrage de nouveaux projets et l'encadrement de nouveaux doctorants.

2.1. Suite Contrôle haptique

Nous avons travaillé sur la manière pour une entreprise de construire des standards du contrôle visuel de ses produits, l'un dédié à l'exploration et l'autre à l'évaluation, et intégrant les bonnes pratiques du domaine. Notre objectif est actuellement de faire un travail analogue pour le contrôle haptique. A une échéance assez proche (à la fin du projet FeLicitY), il s'agira pour nous de **développer un système capable de fournir à une entreprise l'ensemble des éléments à intégrer dans la définition des standards de contrôle haptique** (choix des sensations élémentaires à qualifier en fonction des caractéristiques du produit à contrôler, construction d'une perception à partir des sensations élémentaires suivies, définition et sélection des modes d'exploration, construction des procédures de détection et d'évaluation des anomalies haptiques, etc.). Ce travail se situe dans la continuité de celui réalisé par Lederman & Klatzky qui établissaient le lien entre les modes d'exploration tactiles possibles (mouvement latéral, pression, suivi de contours, enveloppement et contact statique) et les propriétés d'un objet à contrôler (rugosité, dureté, température, poids, taille et forme) dans le but d'améliorer la classification ou la discrimination d'objets.

2.2. Lien visuel / haptique

Le travail que nous menons actuellement aborde le contrôle haptique indépendamment d'un contrôle visuel qui est évidemment parfois réalisé simultanément. L'analyse de la combinaison des types de contrôles dans le but d'améliorer la qualité d'un contrôle s'inscrit dans une seconde phase de mon travail. De nombreuses publications étudient l'interaction entre la perception visuelle et la perception haptique, la plupart de ces articles s'attachant à montrer que la main et les yeux peuvent coopérer de manière efficace pour améliorer notre perception sensorielle. Pour Lederman et al. (1986) par exemple, la texture d'une surface est à la fois perçue par notre vision qui évalue la densité spatiale des éléments qui composent cette texture et par notre toucher qui évalue la rugosité de la surface, les deux perceptions se combinant pour délivrer une perception globale de la texture. Il s'agira donc d'abord pour nous d'examiner comment les deux explorations s'exécutent (en parallèle ou en séquence, et dans ce cas dans quel ordre) pour délivrer une sensation tactile optimale. Il sera ensuite de voir comment les standards que nous avons définis indépendamment pour le contrôle haptique et pour le contrôle visuel peuvent être réunis. Il s'agira enfin **d'identifier les bonnes pratiques d'un contrôle combinant une perception visuelle et une perception haptique**.

2.3. Vision pour le toucher

Une autre piste de recherche envisagée concerne le remplacement du contrôle tactile par un contrôle uniquement visuel. Il s'agira en particulier d'étudier si, et le cas échéant comment, un système automatisé de contrôle par vision pourrait remplacer, totalement ou en partie, un contrôle haptique (« toucher en voyant »). S'il est parfois admis que le système haptique a des capacités spécifiques qui lui donne une supériorité par rapport au système visuel humain (par exemple quand il s'agit de percevoir la rugosité d'une surface, sa dureté, sa rigidité, sa granularité, son élasticité, sa température ou encore l'homogénéité en dessous de la surface), la question que nous nous posons est de savoir si un système de vision automatisé serait en mesure de distinguer certaines anomalies tactiles, et cela sans qu'il y ait de contact avec l'objet. Le système de vision élaboré dans le

laboratoire SYMME dans le cadre du projet SPOT distingue actuellement de nombreuses anomalies non perceptibles à l'œil (parfois parfaitement visibles mais complètement invisibles sous certains angles ou éclairages). Pour l'instant, la détection portait sur des anomalies visuelles (coups, rayures, tâches, défaut de contrastes...). Nous envisageons de réaliser des **tests sur la capacité du dispositif à détecter certaines anomalies tactiles** (texture par exemple, mais aussi adhérence) a priori non détectables sans toucher.

2.4. Vers une mesure de qualité sensorielle

Mes objectifs de recherche convergent vers la nécessité de définir de bonnes pratiques pour le contrôle sensoriel des produits. Pour l'instant, ces pratiques concernent le contrôle visuel, le contrôle haptique et le contrôle à la fois visuel et haptique, mais elles pourront également à l'avenir concerner d'autres types de contrôles sensoriels. Les bonnes pratiques les plus couramment citées se réfèrent généralement à des pratiques utilisées en analyse sensorielle pour la conception de nouveaux produits, rarement à des pratiques pour la contrôle qualité des produits. L'enjeu sera de **définir ces pratiques, les formaliser et les réunir dans un standard de contrôle, et cela en lien direct avec l'objectif de pouvoir mesurer la qualité sensorielle des produits**. L'idée qu'un contrôleur puisse quantifier des sensations et soit capable, à partir de ces sensations, de quantifier une perception constitue pour moi un verrou de recherche à lever.

ANNEXES

ANNEXES

3 publications illustrant mes activités de recherche :

Sur le benchmarking

Maire, J.L., Bronet, V., Pillet, M., 2008. Benchmarking: methods and tools for SME. Benchmarking: An International Journal 15 (6), 765–781.

Sur le contrôle visuel des produits

Maire, J.L., Pillet, M., Baudet, N., 2016. Toward a better visual inspection of products. The TQM Journal 28 (3), 411–430.

Sur le contrôle haptique des produits

Albert, B., Maire, J.L., Pillet, M., Zanni-Merk, C., de Bertrand de Beuvron, F., Knecht, C., Charrier, J., 2016. Generic and structured description of tactile sensory perceptions, in. 6th Kansei Engineering and Emotion Research, KEER'2016, August 31-September 2nd, Leeds, United Kingdom.

Benchmarking: Methods and tools for SME

Jean-Luc Maire

*Laboratoire de Systèmes et Matériaux pour la Mécatronique (SYMME), Université de Savoie ,
Polytech'Savoie , BP806 F74016 Annecy cedex, France, and*

Vincent Bronet

TECUMSEH EUROPE, Direction des Usines 38290 La Verpillière, France, and

Maurice Pillet

*Laboratoire de Systèmes et Matériaux pour la Mécatronique (SYMME), Université de Savoie,
Polytech'Savoie , BP806 F74016 Annecy cedex, France*

Introduction

A benchmarking is classically seen as “*a tool to improve organisation's performance and competitiveness in business life*” (Kyrö, 2003). But, more precisely, it can be defined (Maire, Bronet and Pillet, 2005) as a process based on an improvement obtained by the adaptation and, in some cases, by the substitution of one process by another recognized as better, that we will call a *reference process*. At first exclusively used by large firms, its scope has been extended to small business (e.g. McAdam and Kelly, 2002 and Yasin, 2002) and semi-public sectors (e.g. Ball 2000; Davis, 1998; Jones, 1999).

In research literature, a large number of models are currently proposed to contribute to the carrying out of a benchmarking (e.g. Büyükoçkan and Maire, 1998 and Maire, 2002). However, what these various models have in common is that they include quasi-similar steps. The differences between them generally result from a different breakdown of some of these steps into sub-steps or from a different sequence in the realization of these steps. An easy way to merge these models consists of identifying and positioning these steps with the Plan-Check-Act-Improve cycle (PDCA) of the Deming wheel or, in a more detailed way, with those of the Plan-Research-Observe-Analyze-Adapt-Improve cycle (PROAAI) proposed in (GOAL/QPC, 1995) (see Table I).

Step	Aim of the step
Plan	To determine critical processes to compare, to define types of data to be collected on these processes and to plan the various steps of the project.
Research	To determine the measurements to be used, to identify the future partners of the benchmarking and to collect the data already available at these partners.
Observe	To collect the complementary data at the partners and to observe the similarities and differences in the processes.
Analyse	To analyze the current practices and to decide on the operational or strategic practices to carry out on the process.
Adapt	To understand new practices and to adapt them to the specific context in which they will be applied.
Improve	To implement and to follow up the implementation of these practices.

Table I. The steps of a benchmarking process: PROAAI cycle

Many tools are proposed to help companies to carry out these various steps. Some of them are described by the LaRePe laboratory of the University of Quebec (LaRePe, 2001). These tools result essentially from the initiative of governments (for example, *Microscope*¹ for the United Kingdom) or from international programs in the quality field (*Malcolm Baldrige National Quality*², *European Quality Award*³, *Japan Quality Award*⁴, *South African Award*⁵, etc). Other tools are proposed by consultants or research centres (for example, *PDG*^{MD6}, tools developed by *IMG*⁷, *Cisco*⁸, etc).

Some of these tools can be used in all sectors of industry (for example, it is the case of *Benchmark Index*⁹ or *Malcolm Baldrige National Quality Award*) whereas others target a more specific sector or a particular function of this sector (for example, *Metal finishing benchmarking Tool*¹⁰ is used for a benchmarking on the Environment function in the sector of the metal finishing).

The assessments carried by these tools cover company practices (leadership, policy and strategy, attention given to the customers and to the market, human resources, information management, etc.) as well as the results of the performance obtained by the company (performance of the processes, satisfaction of the customers, performance of the partnerships and the suppliers, financial results, etc). However, as the study of LARePE highlights, these tools do not make the relation between these practices and the performance obtained. Some tools are exclusively based on an assessment of results (*Orbitt*¹¹, *Cisco*, *Metal finishing benchmarking Tool*, *IMG*), whereas others are also based on an assessment of the practices at the origin of these results (*Microscope*, *Benchmark Index*, *PDG*^{MD}, *Pilot* and *PROBE*¹², *Malcolm Baldrige National Quality Award*, *European Quality Award*, *Australian Business Framework Excellence*, *South African Award Excellence*, *Corporate Benchmarking*, *Business Benchmarking Process* and *STIN Analysis*¹³, *Performance benchmarking*, *Capability Snapshot*¹⁴, *BOGI*¹⁵, etc). Moreover, the assessment of these practices generally takes the form of a qualitative assessment (except for *PDG*^{MG} and *Benchmarking Performance*).

However, let us remember (as the LeRePe study concluded), that these tools are not very adapted to the SMI/SME context and that today are mostly reserved for big companies. Far too complex,

1 <http://www.connectbestpractice.com>, <http://www.benchmarknow.co.uk>

2 <http://www.quality.nist.gov>, <http://205.179.141.170/selfassess/baldrige>

3 <http://www.benchnet.com/selfassess/efqm>, <http://www.efqm.org/award.htm>

4 <http://www.jqac.com/Website.nsf/NewMainPageE?OpenPage>

5 <http://www.saweb.co.za>

6 <http://www.uqtr.ca/inrpme/larepe/>

7 <http://www.img.com/pmb/default1.htm>

8 <http://www.cisco.com/peg-bin/benchmark/benchmark.cgi>

9 <http://www.benchmarking.co.uk>

10 <http://www.strategicgoals.org/bmstart.cfm>

11 <http://domino.cecs.unt.edu/demo.nsf>

12 <http://www.cbi.org.uk>

13 <http://strategis.ic.gc.ca>

14 <http://www.capsnap.com/>

15 http://prod1.businesscanada.gc.ca/cfDOCS/firm_fr/frame.cfm

these tools indeed require thorough knowledge which is not always available, and sometimes too heavy an investment in terms of time and resources for the collection of data. In addition, these tools do not always deliver sufficiently precise recommendations on the improvements the company should carry out and sometimes fail to take the company's specific context into account. SME often needs to call on external consultants to identify real improvement and then to translate them into the operational actions to carry out.

We therefore propose a set of tools and methods to assist SME in the carrying out of a benchmarking. These tools and methods, which we detail further on, especially target:

- the description of the processes (process to be improved and reference process) using the description of the current practices used (*Observe* step)
- the comparison of these processes, leading to suggestions of improvements to carry out on the process to improve (*Analyze* step).

The approach that we use to describe the processes (ISC matrix and OMP matrix) is based on some recommendations of system theory. We thus stressed the need, not only to identify the good practices associated with the execution of the process, but also the good practices which allow this process to be maintained and improved. The comparison of these matrixes aims to lead very quickly to an action plan to deploy to improve the process. This comparison is based on the description of striking contrasts which exist in the history, the structure and the function of this process compared to a reference process.

Description of the processes

The method generally used to describe a process is based on an input/output approach and on a formalization of the sequence of activities which make up the process (Cattan, Idrissi and Knockaert, 2006). Generally, these inputs and outputs refer to elements that are part of the physical flow or information flow of the process. The representation obtained makes it possible to have a description of the activities as well as a description of the way in which these activities must interact in order for the process to deliver the expected result.

To describe the processes, we made the choice of a systemic approach (LeMoigne, 1984) including a description of the activities in the process, but also a description of its structure and history. We thus decided to use two matrixes.

The first matrix, called matrix *ISC (Is/ Should Not be / Could be)*, aims to more clearly show what the process is made of (what the process *Is*), but also what its limits are (what the process *Should not be* and what it *Could be*) according to the company's experience of the process.

The objective of the second matrix, called matrix *OMP (Operational / Management Part)*, is to provide information about the way in which the process is carried out, with at the same time a description of the operational practices implemented in this process and a description of the management practices related to this implementation. To our mind, management practices have at least as significant an effect on the performance of this process as the operational practices.

We thus detail the contents of each of these two matrixes.

ISC matrix (Is / Should Not be / Could be)

This matrix aims to collect information on the process. The information required relates to the composition and the organization of the process. For benchmarking, this matrix is built in a similar way for both the process to improve and for the reference process.

The matrix is structured with fifteen types of information about the process. For the lines of the matrix, we use the six questions of the QQQQCP tool (Pillet, 2004) classically used to describe a problem. For the rows, we use the "*Is / Could be but is not*" tool (e.g. Crepin and Robin, 2001; Kepner and Tregoe, 1981) classically used to diagnose a problem. We add the row "*Should not be*" because we make the assumption that the company is sometimes able to provide information about some defects in the process, either which have happened or which are anticipated. The matrix is built from the answers given to the questions in each cell of the matrix (see Table 2).

	IS	SHOULD NOT BE	COULD BE
WHAT	What types of problem are tackled in this process?	What types of problems should not be tackled in this process?	What types of problem could be also tackled in this process?
WHO	Who is an actor in the process? Who is responsible for the process? Is external help used to set up the process?	Who should not be an actor in the process? Who should not be responsible for the process? Which other forms of help should not be used to set up the process?	Who could be an actor in the process? Who could be responsible for the process? Which other help could be used to set up the process?
WHEN	How often is the process controlled? When is the process set up? When and how often is external assistance used?	How often should the process not be controlled? When is the process least powerful? When and how often should external assistance not be used?	How often could the process be controlled? When could the process be set up more effectively? When and how often is external assistance most relevant?
WHERE	In which departments has the process been implemented? In which trades is the process most suitable?	In which departments should the process not be implemented? In which trades should the process not be implemented?	In which departments could this process be used? In which trades could this process be implemented?
HOW	How is the process considered by the Executive Committee? How many meetings of the Executive Committee evoked the process? How are human resources allocated to the deployment of this process, or, how many people are full-time for this process?	Should the process not be considered by the Executive Committee? How should human resources not be allocated to the deployment of this process, or, how many people should not be full-time for this process?	Could the process be considered by the Executive Committee? How could human resources be allocated to the deployment of this process, or, how many people could be full-time for this process?
WHY	What are the results expected of the process?	What are the results you should not expect?	What are the results you could expect?

Table II. ISC matrix (Is/Should not be/Could be)

Obviously, we do not claim that these fifteen categories cover all the types of information to be collected for a process but their use offers several advantages. They allow the type of information to be collected to be clearly defined. Then, they allow a reduction in time for the collection of information on the process. Lastly, they make a comparison of the information gathered on different processes possible (it is what will be done when the matrix of the process to be improved and that of the reference process will be compared).

The OMP matrix (Operational / Management Part)

This second matrix aims to describe the practices currently used in this process. Some of these practices will refer to operational elements of the process (i.e. the way in which the process is carried out), whereas others refer to the organisational elements of the process (i.e. the way in which the execution of the process is controlled). This matrix, called OMP matrix (Operational / Management Part), is based on a census of generic activities that any process uses or must implement. These activities are divided into two parts: an *Operational* part and a *Management* part.

Operational part of a process

We thus defined the list of the generic activities which make up the operational part of any process (Table 4). We then grouped these activities into three main functions (*Axe*, *Action* and *Assistance*), each function sub-divided into two types of activities, those referring to the realization of the product/service by the process (*To realize*), and those referring to the management part associated with this realization (*To control*):

- *Axe* function: includes the activities which define the state to be reached by the process
- *Action* function: includes the activities making it possible to reach the expected state for the process, as well as the activities giving information on its current state,
- *Assistance* function: includes the activities dedicated to the analysis and the control of the deviations of the process, as well as the activities aimed at developing new solutions to increase its effectiveness.

Management part of a process

The performance of a process is not exclusively related to the performance of the activities which make up its operational part. The way these activities are organized can also have a significant effect on its performance. For example, the success of a Six Sigma project is mainly based on the use and the renewal of skills of the organization to support the execution of the various steps of a DMAIC cycle (Black Belt, Master Black Belt, Champion...). In the same way, the wedge of the Deming wheel symbolizing the PDCA cycle also underlines the very important role of management in maintaining the performance reached. In both cases, the organization, and thus the way in which the activities of the operational part are controlled, can be regarded as a factor of success of a benchmarking.

Table 4 shows the main activities that we defined for the Management part of a process. We positioned them with regard to three factors impacting the efficiency, the robustness and the maintenance of this process:

- an *Organisational* factor including a *Structure* variable (functional bonds, definition of responsibilities, etc.) on which the process manager steps in to organize physical and informational flows, and a *Performance indicators system* variable which this manager uses to follow and organize the execution of a given activity
- a *Human* factor including a *Individual Skills* variable (theoretical knowledge, know-how, etc.) and a *Collective skills* variable (know-how of a set of people sharing the same objective) on which the responsible steps in to ensure, maintain and improve the functioning of the process
- a *Technical* factor including a *Material* variable (production equipment, raw materials, work environment, etc.) and an *Information* variable (results obtained, events, objectives, strategy, etc.) that the responsible must regularly communicate to the actors of the process.

We listed the various actions allowing us to act on each variable of the Management part of the process (for example, *To Define* and *To budget* for the *Structure* variable, *To design* and *To follow* for the *Performance indicators system* variable, etc).

The two POM matrixes (one for the process to improve, the other for the reference process) are then filled in using the answers given in response to each of the 45 questions defined for the three functions (*Axe*, *Action* and *Assistance*) of the process analyzed (12 questions for the variables and 3 questions for the input data, the activities and the output data of each function). Table 3 lists the questions which are asked for each function.

With the objective of simplifying, but especially with the aim of saving time in the implementation of the benchmarking, the answers to be given are binary: 1 if the answer is positive, 0 if not.

		Input data	Are the input data for this activity formalized?
		Activity	Is the procedure for this activity formalized?
		Output data	Are the output data for this activity formalized?
ORGANIS ATIONAL	Structure	To define	Are one or more people defined for this activity?
		To budget	Do you have a well-defined schedule and/or frequency allocated for this activity?
	Performance indicators system	Design	Do you have any indicators to measure the effectiveness of this activity?
		To follow	Do you carry out a review of this activity?
HUMAN	Individual skills	To train	Do you need people to be trained for this activity?
		To give responsibility	Is this activity carried out by the lowest level of the hierarchy?
	Collective skills	To capitalize	Do you have a regular individual or collective experience feedback on this activity?
		To formalize	Have you formalized generic rules to carry out this activity?
TECHNI CAL	Material	To adapt	Is specific material allocated to this activity?
		To standardize	Do the operators of this activity all use the same material?
	Information	To post	Do you post the results of this activity?
		To communicate	Do you communicate the results of this activity to obtain the personnel's desire to participate?

Table 3. The questions of the OMP matrix

TECHNICAL			HUMAN			ORGANISATION			AXE												ACTION						ASSISTANCE																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
									Input data			Activity			Output data			To balance and select the critical themes			To define the problem, the needs and requirements for each subject			To build the schedule of the actions for each subject			To follow the progression of the subjects, to react and validate the achievement of the objectives			To assess the initial state of each subject observed			To measure the performances of the subjects and the results obtained			To optimize the means of operation of the subjects observed			To follow the evolution of the subjects and to react in case of deviation			To analyze the cause of the no performance of the subjects			To build the schedule of the interventions on the subjects observed			To establish the solutions planned on the subjects			To follow, react and validate the improvements made																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Structure			Performance indicators system			Individual skills			Collective skills			Material			Information			Input data			Activity			Output data																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											

Table 4. The OMP matrix (Operational and Management Part of a process)

Phase 2: Comparison of the two processes

The ISC and OMP matrixes are then compared so as to highlight the striking similarities or differences between the process to be improved and the reference process.

Comparison of the ISC matrixes

Figure 2 shows the various comparisons made between the data of the two ISC matrixes. The more striking contrasts between the two processes are highlighted with the comparison of the answers of the column "Is" of a matrix and the answers of the column "Should not be" of the other matrix. The comparison goes on with the comparison of the answers of the column "Could be" of a matrix with the answers of the column "Should not be" of the other one. Lastly, the columns "Is", the columns "Could be" and the columns "Should not be" of the two matrixes are compared.

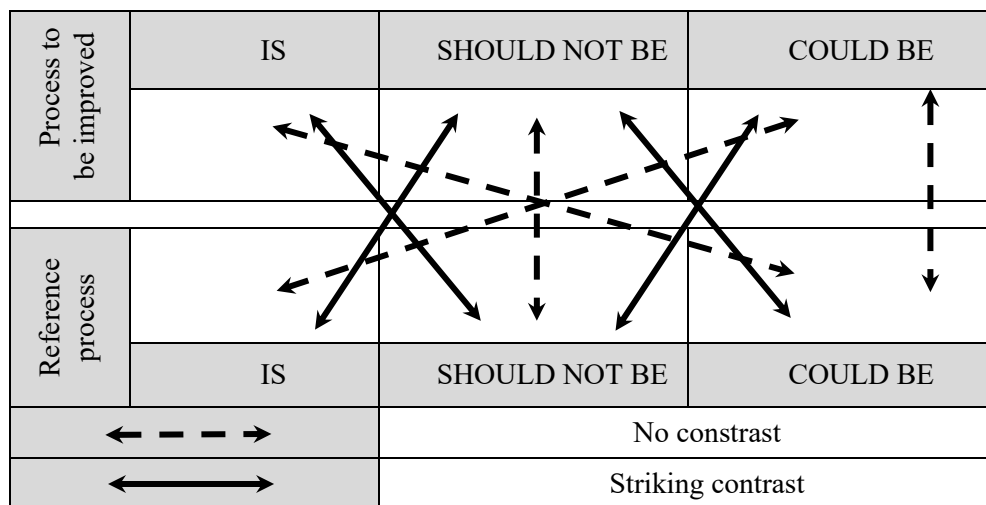


Figure 1. Comparison of the ISC matrixes

Comparison of OMP matrixes

The OMP matrixes of the two processes (process to be improved and reference process) were filled with either 1 or 0. By adding together the values of each row and each line of these two matrixes, we can determine the order of importance between these lines and these columns. This order helps to identify the similarities or differences between the management and operational parts of the processes. For this, we used the Kendall test [Yue and al, 2002] which allows us to check if there is a correlation between the classifications of two sets of data or not.

The following example illustrates the use of this test. Let us consider two sets of data (Table 5), each series classifying the impact of 10 activities (*a, b, c, d, ...*) on the level of satisfaction of the customers in two companies, A and B (the activities *a* and *e* are respectively those which have the most impact on the customer satisfaction of company A and company B).

Activity	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>	<i>j</i>
Company A	1	3	7	5	2	4	10	8	6	9
Company B	5	7	9	3	1	2	10	8	6	4

Table 5

The table is then sorted (Table 6) so that the first series is classified in ascending order of the values.

Activity	a	e	b	f	d	i	c	h	j	g
Company A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Company B	5	1	7	2	3	6	9	8	4	10

Table 6

A new table (Table 7) is then built by examining the classification of the various pairs of values in the second series. When the order is not respected (for example, in the case of the pair [5,1]), value -1 is allotted to the table, and +1 in the opposite case (for example, in the case of the pair [5,7]).

	5	1	7	2	3	6	9	8	4	10
5		-1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1
1			1	1	1	1	1	1	1	1
7				-1	-1	-1	1	1	-1	1
2					1	1	1	1	1	1
3						1	1	1	1	1
6							1	1	-1	1
9								-1	-1	1
8									-1	1
4										1
10										

Table 7

Given C, the total number of possible combinations of pairs in the series:

$$C = \frac{1}{2} N \times (N - 1) \quad (\text{Given } N \text{ the number of values in the series})$$

Given S, the sum of the values in the series, the coefficient of Kendall measures the agreement between the two series and is expressed by the following relation:

$$\tau = \frac{S}{C} \quad (\text{in our example: } \tau = 0.46)$$

When N is higher than 10, the distribution of sampling of τ is comparable to that of the normal distribution and the table of reduced centred variable z can be used.

Thus:

$$\begin{aligned} \bar{\tau} &= 0 & \sigma_{\tau} &= \sqrt{\frac{2 \times (2N + 5)}{9N \times (N - 1)}} \\ \text{Then:} & & z &= \frac{\tau}{\sqrt{\frac{2 \times (2N + 5)}{9N \times (N - 1)}}} \end{aligned}$$

By using the Gauss table, the more the probability of obtaining z will be weak, the more we will be able to conclude that the first set of data is not correlated with the second. We thus make the choice to conclude that the two sets of data are correlated when the probability of obtaining z is lower than 0.05.

In our case, this Kendall test is applied to the two sets of data obtained by adding together the lines of each OMP matrix (activities of the operational part of the two processes), as well as the two sets of data obtained by adding together the columns (activities of the management part of the two processes). In our example, the application of the two tests makes it possible to obtain a representation of the type presented in Figure 2.

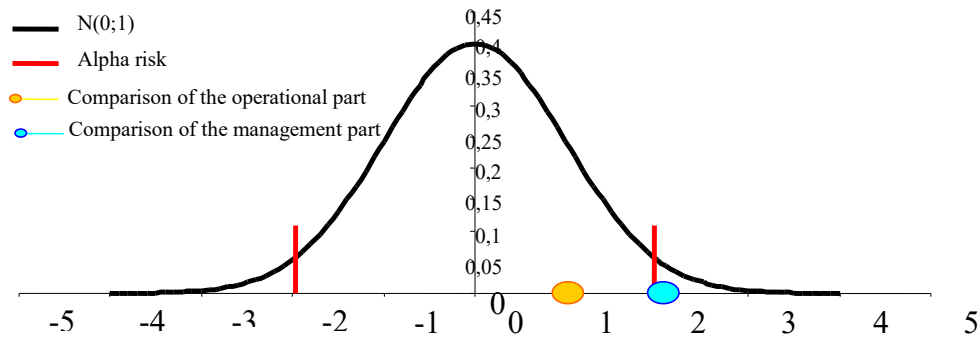


Figure 2. Comparison of the OMP matrixes: application of the Kendall test

Table 8 shows the various types of profile which can be obtained at the end of this test and the conclusion for each of them.

	Conclusion
	There is no relation between the activities of the management part and no relation between the activities of the operational part of the processes.
	The processes are probably managed in a similar way and the activities considered as significant are not the same for the two processes.
	There is no relation between the activities of the management part of the processes and the activities considered as significant for a process are the complete opposite for each of the two processes.
	The processes are probably managed in a similar way and the activities considered as significant for a process are the opposite for the two processes.
	The processes are probably managed in a completely different way and there is no relation between the activities of their operational parts.
	There is no relation between the activities of the management part and the activities considered as significant are the same for the two process.
	The processes are managed in a completely different way and the activities considered as significant are the same for the two processes.
	The processes are managed in a similar way and the activities considered as significant are the same for the two processes.
	The processes are managed in a completely different way and the activities considered as significant for a process are the complete opposite for each of the two processes.

Table 8. Comparison of the OMP matrixes: types of profile

A comparison of the activities of the processes can then be carried out. Given A the POM matrix of the reference process and given B the POM matrix of the process to be improved, the matrix C of the differences is built in the following way:

- If $A[i, j] = 1$ and $B[i, j] = 0$ then $C[i, j] = 2$
- If $A[i, j] = 0$ and $B[i, j] = 1$ then $C[i, j] = -2$
- If $A[i, j] = 0$ and $B[i, j] = 0$ then $C[i, j] = 0$
- If $A[i, j] = 1$ and $B[i, j] = 1$ then $C[i, j] = 1$

We then calculate three points:

- the centre of gravity for the activities the two processes have in common (values of C equal to 1),
- the centre of gravity for the activities which exist for the reference process but not for the process to improve (values of C equal to 2),
- the centre of gravity for the activities which exist for the process to improve but not for the reference process (values of C equal to -2).

To show how these points are calculated, let us consider (Table 9) the following example of a matrix C, reduced here to 4 lines and 4 columns.

N°	1	2	3	4	€ ₁	€ ₁ *N°	€ ₂	€ ₂ *N°	€ ₋₂	€ ₋₂ *N°
4	1	2	1	0	2	8	1	4	0	0
3	0	-2	0	2	0	0	1	3	1	3
2	1	1	2	2	2	4	2	4	0	0
1	2	1	2	1	2	2	2	2	0	0
€ ₁	2	2	1	1						
€ ₁ *N°	2	4	3	4						
€ ₂	1	1	2	2						
€ ₂ *N°	1	2	6	8						
€ ₋₂	0	1	0	0						
€ ₋₂ *N°	0	2	0	0						

€₁: numbers of cells equal to 1; €₂: numbers of cells equal to 2; €₋₂: numbers of cells equal to -2

Table 9

We can now calculate the co-ordinates of the centres of gravity with the following relation:

$$X_G = \frac{\sum_{j=1}^n (\epsilon_j * N^o)}{\sum_{j=1}^n (\epsilon_j)} \quad Y_G = \frac{\sum_{j=1}^n (\epsilon_j * N^o)}{\sum_{j=1}^n (\epsilon_j)} \quad (8)$$

For the example given above, the co-ordinates of the three points are:

	X _G	Y _G
Activities in common	2.16	2.33
Additional activities in the reference process	2.83	2.16
Additional activities in the process to be improved	2	3

These points can then be represented graphically by a correlation graph (Figure 3). The size of each circle is proportional to the number of values used to calculate the point. We thus have a graphic tool which allows us to quickly understand the differences between the two processes. In the example given, the activities the two processes have in common refer to technical as well as to organisational and human factors. The reference process is characterized by a significant effort on strategic actions (axis function) while the process to improve concentrates on support activities (assistance function).

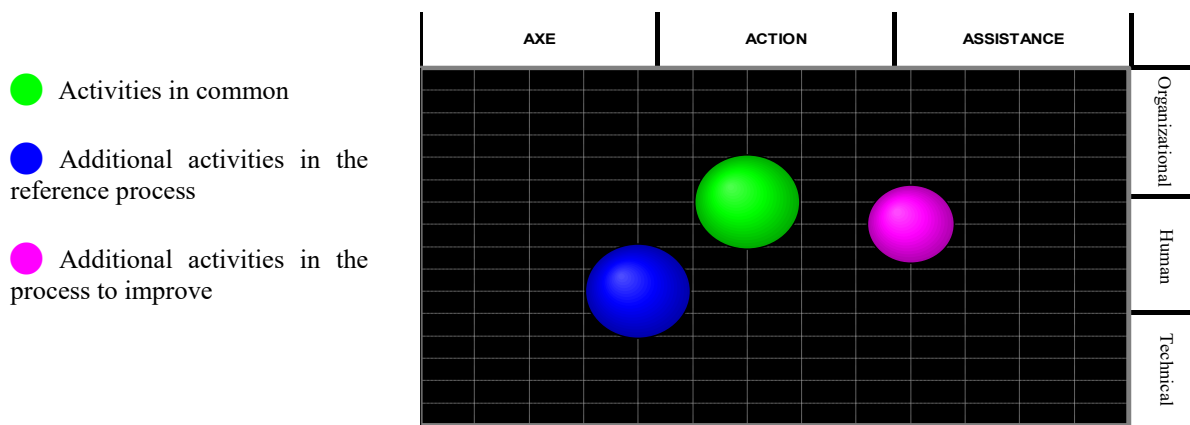


Figure 3. Correlation graph

The representation in Figure 4 offers additional information to that shown in Figure 3 by locating the activities at the origin of the differences between the two processes. The additional activities of the reference process (in blue on the figure) represent potential actions to be undertaken to improve the process.

- Activities in common
- Additional activities in the reference process
- Additional activities in the process to improve

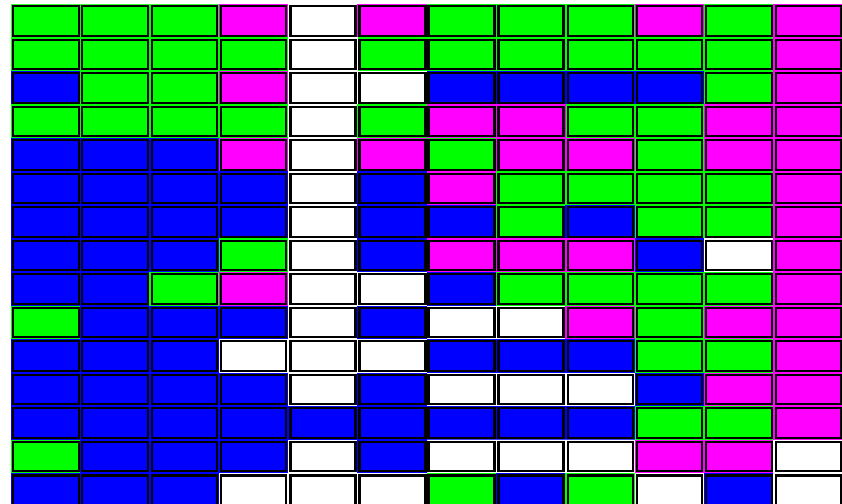


Figure 4. Comparison of activities

Output data of the comparison

The output data of the comparison which is carried out (comparison of the ISC matrixes and the OMP matrixes) are thus:

- the striking contrasts resulting from the comparison of the two ISC matrixes
- the formulation of the causes at the origin of these striking contrasts
- the relative position of the activities in each process
- the vision of the activities privileged in the two processes

These data are obtained with a study requiring only some structured interviews compatible with the time the manager has available. With these output data, it is easy to structure an effective action plan to make progress on the process to improve.

As an example, let us take the results obtained following a benchmarking that we carried out for the company Tecumseh Europe. This benchmarking aimed at obtaining the improvement of the Six Sigma process on one production site, located at La Mure, starting from the reference process of another site, situated at Cessieu.

Initially, we identified striking contrasts between the two sites by comparing two ISC matrixes. Table 10, for example, shows the conditions that the site at La Mure had defined before the deployment of the Six Sigma process. The actions which were decided upon using the results of this comparison are in bold.

	IS	SHOULD NOT BE
WHAT	We deal with the problems of dispersion for all the characteristics of the parts.	This process does not make it possible to deal with the problems involved in data-processing failures
WHO	Production Technician, Sector Manager, Quality Manager. The Quality manager is responsible for the process. The implementation of the process requires an expert.	The personnel in production is not responsible for the process. The director is not responsible for the process. A person must be recruited for this process.
WHEN	Every month. The implementation of the process must be done during periods of low activity. We will need help every two weeks for one year.	Every week. The deployment of the process should not be done during periods of high activity. Outside help should not be used every week, but rather only twice per annum.

WHERE	The process is implemented by the different parts of the production department and the quality department must be involved in this implementation. It must be deployed in the machining sector, but also in assembly.	Nobody shall be specifically assigned to implement the process. This process should not be deployed for non-repetitive activities.
HOW	The process is deployed by many people. No dedicated full-time person to this process.	No person must be dedicated full-time to the deployment of this process
WHY	We expect 50% less scrap on each work area.	We should not expect better performance from the products, but only a weaker dispersion around the objective targeted.

Table 10. Comparison of ENP matrices: example of a benchmarking carried out in the company TECUMSEH Europe

The POM matrices of the two sites were then compared. Our objective was to highlight the failing practices to substitute or evolve on the site at La Mure. The Kendall test initially made it possible to show that the operational parts of the process of the two sites were correlated whereas the Management parts were not (respectively $\tau = 3.20$ and $\tau = 1.2$). These conclusions were confirmed by the analysis of the correlations (diagrams in the bottom left-hand corner of Figure 5).

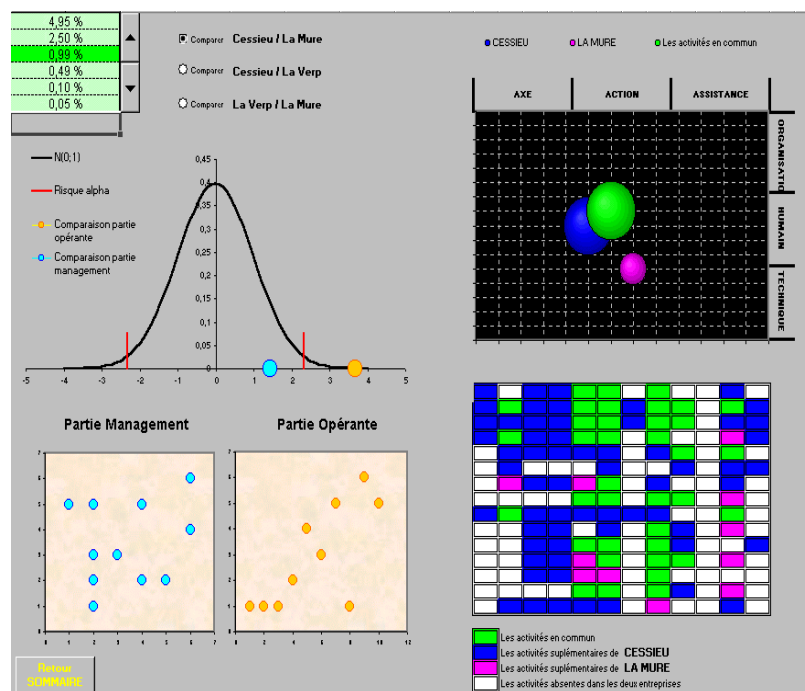


Figure 5. Comparison of OMP matrices: example of a benchmarking carried out in the company TECUMSEH Europe

A graph of the correlations (in top right-hand corner of Figure 5) was then created so as to show the differences between the two sites for this process. Both sites were characterized by efforts made in activities based on organization and human aspects, but with a more significant number of activities for the process at Cessieu (blue circle) compared to the site at La Mure (pink circle). Thus, for example, for the site at La Mure only one person was dedicated to piloting the process and the emphasis was mainly put on the technical means necessary to the process.

Finally, we made an analysis aimed at identifying the additional and different practices that only the site at Cessieu, (i.e. the site of the reference process) implemented. The table of the differences (see graph in the bottom right-hand corner of Figure 5) made it possible to clearly identify the activities missing on the site at La Mure. For example, this site had not built a control system of the Six Sigma work areas and thus did not have the possibility of communicating on the progress made and the benefits of this step. At present, the site at La Mure is putting all the good solutions tested in the work areas into a database (whereas the site of Cessieu does not do this yet).

At the end of this comparison, many corrective actions were made to the Six Sigma process at the La Mure site, resulting in this process is now being regarded as the reference process for all the other sites of the company TECUMSEH Europe.

Conclusion

It is the difficulty of SME to carry out a benchmarking which led us to propose tools and methods:

- to describe the processes, the process to improve and the reference process,
- to compare these processes with the objective of defining actions to carry out on the process to improve.

The description of the process which we proposed is based on some recommendations of the system theory. We thus stressed the need, not only to identify the good practices of a process, but also, and especially, to identify the interactions between these practices which mean that the process is in a position to be maintained and to improve over time.

The comparison of these matrixes aims at leading very quickly to an action plan to improve the process. This comparison is based on the description of striking contrasts which exist in the history, the structure and the execution of this process compared to a reference process. The tool proposed thus highlights the differences in the practices implemented, either in the way of carrying out these processes, or in the way of managing it.

Our current work aims to develop the OMP matrix (*Operative and Management Part*) by giving the possibility of providing answers, different from binary ones (0 or 1), but founded on more structured information (for example, with the use of semantic scales whose treatment could be carried out by fuzzy logic). This information would enable us to reveal subtleties in the positions of the centres of gravity. Another topic of research relates to the identification of the good practices. In this paper, this identification is currently based on a description of the differences observed between a reference process and the process to be improved. Our research is now to determine how just one interview could be carried out instead of two.

References

Ball, A. (2000), "Benchmarking in local government under a central government agenda", *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 7 No. 1, pp. 20-34

Büyükoçkan G., Maire J.L. (1998), "Benchmarking Process Formalization and a Case Study", *Benchmarking for Quality Management and Technology: An International Journal*, MCB Press, vol. 5, n° 2, pp. 101-125

Cattan M., Idrissi N., Knockaert P. (2006), *Maîtriser les processus de l'entreprise*, Editions d'Organisation, Paris

Crépin, D., Robin, R. (2001), *Résolution de problèmes*, Editions d'Organisation

Davis, P. (1998), "The burgeoning of benchmarking in British local government", *Benchmarking for Quality Management and Technology*, Vol. 5 No. 4, pp. 260-70

- GOAL/QPC (1995), *The Team Memory Jogger*, Ed. GOAL/QPC, Joiner Associated Inc.
- Jones, R. (1999), "The role of benchmarking within the cultural reform journey of an awardwinning Australian local authority", *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 6 No. 4, pp. 338-49
- Kepner C. H., Tregoe B.B. (1981) *The new rational manager*, Princeton research press
- Kyrö, P. (2003), "Revising the concept and forms of benchmarking", *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 10 No. 3, pp. 210-225
- LaRePE (2001) Rapport de recherche du Laboratoire de Recherche sur la performance des entreprises, "*Le Benchmarking comme outil d'aide à l'amélioration de la compétitivité et de la productivité des PME Québécoises*", www.uqtr.ca/inrpme/larepe
- Le Moigne J.L. (1984), *La théorie du système général - théorie de la modélisation*, 2^{ème} édition, Presses Universitaires de France,
- Maire, J.L. (2002), "A model of characterization of the performance for a process of benchmarking", *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 9, No. 5, pp. 506-520
- Maire J.L., Pillet M., Bronet V. (2005), "A Typology of best practices for processes improvement", *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 12, No. 1, pp. 45-60
- McAdam, R. and Kelly, M. (2002), "A business excellence approach to generic benchmarking in SMEs", *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 9 No. 1, pp. 7-27
- Pillet M. (2004), *Appliquer Six Sigma*, Editions d'Organisation
- Yasin, M.M. (2002), "The theory and practice of benchmarking: then and now", *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 9 No. 3, pp. 217-43
- Yue S., Pilan P., Gavadias G. (2002), "Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series", *Journal of Hydrology*, 259, pp.254-271
-

Toward a better visual inspection of products

ABSTRACT

Purpose of this paper - Visual inspection is used to assess a product's quantitative characteristics (physical inspection) and/or to assess a product's qualitative characteristics (sensory inspection). Due to the complexity of the product, inspection tasks are often performed by humans and are therefore prone to errors. It is particularly the case when controllers have to detect aesthetic anomalies, to evaluate them and decide if a product must be rejected or not. The paper details how to improve visual inspection.

Design/methodology/approach - This paper details how the performance of visual inspection can be measured. It then lists the actions which can be carried out to improve the detection and the evaluation of aesthetic anomalies. Finally, it describes how can be made the knowledge about visual inspection more explicit in order to be shared by controllers. The methods we propose are illustrated with a concrete example detailed throughout the paper.

Findings - The gage R^2E^2 we developed can be used to decide which corrective actions to carry out. The four generic descriptors and the list of their attributes we list are usable by a controller to both describe and characterize any aesthetic anomaly on the surface of any product. The paper details then how evaluate an anomaly with a grid or with a neural network when the link between attributes values and the overall intensity of the anomaly is not linear. Finally, a method to formalize the expertise of controllers is described.

Practical implications - The proposed approach has been applied in companies which are part of a European research program (INTERREG IV). The practices we suggested have significantly reduced the variability of the visual inspection results observed up to now.

What is original/value of paper - The paper shows how to improve inspection vision of products.

1. Introduction

Visual inspection is a major component of quality control. It is defined as the process (or operation) of determining if a product (also referred to as a part, object, or item), in whole or part, deviates from a given set of specifications (also referred to as relevant, achievable standards) (Sablatnig, 1997). Inspection plays therefore an important role in many fields which are characterized as high-consequence (food industry, aircraft maintenance, pharmaceuticals industry, etc.).

Moreover, visual inspection can be also very important for industries where the appearance of the product is as decisive as its technical properties (luxury goods industry, for example). In addition of being free of defects, a product must sometimes be free of aesthetic anomalies.

Even though several inspection methods exist (such as using a fully automated vision machine, or a semi-automated with an operator review), human inspection remains one of the best methods to detect aesthetic anomalies. However, some limitations in the performing of visual inspection tasks by humans have been reported (Konz *et al.*, 1981; Schilling, 1982). . Table 1 gives some references of studies about the impact of human factors on visual inspection.

Visual acuity	(McCormick, 1950), (Courtney, 1985), (Kephart and Manson, 1950)
Eye movement	(Courtney, 1986), (Findlay, 1997), (Näsänen <i>et al.</i> , 2001)
Age	(Ball <i>et al.</i> , 1988), (Cerella, 1985), (Scialfa, 1987)
Tiredness	(Jebaraj <i>et al.</i> , 1999), (Lin <i>et al.</i> , 2009), (Brozek <i>et al.</i> , 1947)
Concentration	(Sagi, 2010)
Training/Feedback	(Chabukswar and Grimes, 2003), (Gramopadhye <i>et al.</i> , 1997), (Wang <i>et al.</i> , 1997), (Rebsamen <i>et al.</i> , 2010), (Megaw, 1979)
Memory	(Sagi, 2010), (Arani <i>et al.</i> , 1984), (Shore et Klein, 2000), (Maxwell <i>et al.</i> , 2003)
Motivation	(Rousseau, 1977), (Hays et Hill, 2001), (Lawler, 1969)

Table 1 – Human factors in visual inspection

Human inspectors can make measurement errors since they are subjective and fallible. As Drury (1992) stated, inspection errors can be reduced with appropriate interventions, but cannot be eliminated. Error rates of 20% to 30% are frequently quoted in the inspection literature across multiple types of inspection tasks (Drury and Fox, 1975).

In response to this situation, many companies have made the choice of training controllers who carried out visual inspection only instead of assigning this task to manufacturing workers. Training has been identified as essential to improving the decision making performance of human operators (Wiener, 1975). Despite implementing this, these same companies say that they are not satisfied with the outcome of the visual inspection of their products. Table 2 shows for example the measures we have collected in a famous French luxury goods company. Thirty parts were visually inspected twice (I1 and I2) by three trained controllers (A, B and C) and their results were compared to those provided by a group of experts (True Value column).

Part #	True Value	Controller A		Controller B		Controller C	
		I1	I2	I1	I2	I1	I2
1	C	C	C	NC	NC	NC	NC
2	C	C	NC	NC	C	C	C
3	C	C	NC	C	NC	C	NC
4	C	C	NC	C	C	C	C
5	C	C	NC	NC	NC	NC	C
6	C	C	NC	C	C	NC	C
7	C	C	C	C	NC	C	NC
8	C	C	C	NC	NC	C	C
9	C	C	NC	C	C	NC	C
10	C	C	C	NC	C	C	C
11	C	C	C	C	C	C	C
12	NC	NC	NC	C	C	NC	C
13	C	C	C	C	C	NC	C
14	C	C	C	NC	NC	C	C
15	C	NC	NC	C	C	C	C
16	C	C	C	NC	NC	C	C
17	C	NC	NC	NC	C	C	C
18	C	C	C	C	C	C	C
19	C	NC	NC	NC	NC	C	C
20	C	NC	NC	C	NC	NC	NC
21	C	C	NC	NC	NC	NC	C
22	C	C	C	C	C	C	C
23	C	NC	NC	C	C	C	C
24	C	C	C	C	C	NC	C
25	C	C	C	NC	NC	NC	C
26	C	C	NC	C	C	NC	C
27	NC	C	C	NC	NC	NC	C
28	C	C	NC	NC	NC	C	C
29	C	NC	NC	C	C	C	C
30	C	NC	NC	C	C	C	NC

Table 2 – Example of results of a visual inspection

For the group of experts, only 2 parts were no compliant (#12 and #27), all the others were. Controller A judged 17 parts as non-compliant including #12 but not #27 (16 parts for appraiser B and 15 for controller C). Only one part (#22) was judged as compliant by the three controllers, the others were judged at least once as non-compliant by one of the controllers (for example, part #20 was judged as compliant by the experts but was judged five times as non-compliant by the three controllers).

These results of a visual inspection can be explained by looking at the repeatability and the reproducibility of the inspection.

Repeatability is defined as “the variation in measurements obtained with one measurement instrument when used several times by an appraiser while measuring the identical characteristic on the same part” (AIAG, 2002). In Table 2, out of the 30 parts, 9 evaluations

made by controller A ended in two opposite results. Repeatability can be calculated as $\# \text{agreements} / \# \text{parts inspected}$.

Reproducibility is defined as “the variation in the average of the measurements made by different appraisers using the same measuring instrument when measuring the identical characteristic on the same part” (AIAG, 2002). In Table 2, controller A and controller B evaluated 10 parts in a different way. Reproducibility can be calculated as $\# \text{agreements among all controllers} / \# \text{parts inspected}$.

Tables 3 and 4 show the results of a R&R (Repeatability and Reproducibility) gage study using the data given in Table 2.

	Between controllers	With experts
Number of parts inspected	30	30
Repeatability problems	19 ⁽¹⁾	19
Reproducibility problems	8 ⁽²⁾	8
Total problems	27	27
Average %	10.00% ⁽³⁾	10.00%
Result	Not adapted ⁽⁴⁾	Not adapted

⁽¹⁾ Parts #2, #3, #4, #5, #6, #7, #9, #10, #12, #13, #17, #20, #21, #24, #25, #26, #27, #28 and #30

⁽²⁾ Parts #1, #8, #14, #15, #16, #19, #23 and #29

⁽³⁾ $(30-27)/30=10\%$

⁽⁴⁾ $\leq 70\%$

Table 3 – Example of the results of a R&R gage study: repeatability and reproducibility between controllers and controllers with experts.

	Controller A	Controller B	Controller C
Number of parts inspected	30	30	30
Repeatability problems	9 ⁽¹⁾	6	13
Problems vs expert	8 ⁽²⁾	10	2
More severe	7	9	2
Less severe	1	1	0
Total Problems	17	16	15
Average %	43.33% ⁽³⁾	46.67%	50.00%
Result	Not adapted ⁽⁴⁾	Not adapted	Not Adapted

⁽¹⁾ Parts #2, #3, #4, #5, #6, #9, #21, #26 and #28

⁽²⁾ Parts #15, #17, #19, #20, #23, #27, #29 and #30

⁽³⁾ $(30 - 17)/30 = 43,33\%$

⁽⁴⁾ $\leq 70\%$

Table 4 –Example of results of a R&R gage study: repeatability and reproducibility of controllers

2. Toward a more precise measure of visual inspection performance

As illustrated previously, a R&R gage study helps one to identify if a visual inspection works well or not. In the latter case, the problem to be solved is then to define what must be done to improve it. Is the situation due to a problem in detecting the aesthetic anomalies? Or is it due to a problem of evaluating the intensity of the anomalies? If we look again the example above, when controller A successively evaluates part #2 as compliant and then no compliant, is it because he did not detect the anomaly during his first exploration but detected it during the second? Or is it because he detected the anomaly during both controls but judged it as acceptable and then unacceptable? In the same way, when controller A and controller B give different results for part #8 (compliant for A and no compliant for B), is it because the first has detected the anomaly and the second has not? Or is it because controller B has detected the anomaly but has judged it as acceptable? A R&R gage study does not give answers to these questions.

In fact, the reproducibility and the repeatability of a visual inspection depend, on the one hand, on the ability of the controllers to detect the anomalies and, on the other hand, on their capacity to evaluate these anomalies. The R^2 & E^2 gage study we proposed (Maire *et al.*, 2013) links the Repeatability and the Reproducibility (R^2) of visual inspection to the Exploration and the Evaluation (E^2) of anomalies.

To use a R^2 & E^2 gage, we need additional data. Table 5 shows the data we collected to carry out a R^2 & E^2 gage study for the previous example. For each part, a value equal to 0 indicates that the controller detected an aesthetic anomaly, a value equal to 1 indicates that he detected an aesthetic anomaly and judged it as acceptable and a value equal to 2 indicates that he detected an aesthetic anomaly and he judged it as not acceptable.

Part #	True Value	Controller A		Controller B		Controller C	
		I1	I2	I1	I2	I1	I2
1	1	0	0	2	2	2	2
2	1	1	2	2	1	0	1
3	1	1	2	1	2	0	2
4	0	1	2	0	1	1	1
5	0	1	2	2	2	2	1
6	1	0	2	1	1	2	1
7	1	0	0	0	2	0	2
8	0	0	1	2	2	1	0
9	1	1	2	1	0	2	1
10	0	0	1	2	0	0	0
11	0	0	0	0	0	1	1
12	2	2	2	1	0	2	0
13	0	1	0	1	0	2	1
14	1	1	0	2	2	1	1
15	1	2	2	0	0	1	1
16	0	0	1	2	2	0	1
17	0	2	2	2	1	1	1
18	1	0	0	1	0	0	0
19	1	2	2	2	2	0	0
20	0	2	2	1	2	2	2
21	0	0	2	2	2	2	0
22	1	1	1	1	0	0	1
23	1	2	2	0	0	0	1
24	0	1	0	1	1	2	1
25	0	0	1	2	2	2	1
26	1	1	2	1	1	2	0
27	2	0	1	2	2	2	0
28	1	1	2	2	2	1	0
29	0	2	2	0	0	0	0
30	0	2	2	0	1	0	2

(0: anomaly not detected, 1: anomaly detected but judged as acceptable, 2: anomaly detected but judged as not acceptable)

Table 5 – Example of data collected in a R^2 & E^2 gage study

Concerning the exploration of anomalies, for each controller, we can able to calculate:

- *Repeatability rate of exploration* which measures his ability to detect the same anomaly twice
- *Reproducibility rate of exploration* which measures his ability to detect the same anomalies as the experts
- *Overall exploration rate* which measures his overall ability (repeatability and reproducibility) to explore a product
- *Number of false alarms* which gives the number of anomalies he detected that the experts did not
- *Number of omissions* which gives the number of anomalies he has not detected but have been detected by experts

Concerning the evaluation of anomalies, for each controller, we are able to calculate:

- *Repeatability rate of evaluation* which measures his ability to evaluate in the same way the same anomaly

- *Reproducibility rate of evaluation* which measures his ability to evaluate the anomalies in the same way than experts
- *Overall evaluation rate* which measures his global ability (repeatability and reproducibility) to evaluate a product
- *Number of more severe* which gives the number of anomalies he evaluated as not acceptable that the experts did not
- *Number of less severe* which gives the number of anomalies he evaluated acceptable that the experts did not
- *Matching* which gives the number of agreements with experts.

Table 6 and Table 7 detail equations used respectively for the calculation of exploration measures and evaluation measures.

Exploration measures		With...
<i>Repeatability rate of exploration</i>	$\frac{NP_Repeat_Ex}{NP_Insp}$	<i>NP_Repeat_Ex</i> : Number of Parts where the controller detected the same anomaly twice ((A.0, A.0) ⁽¹⁾ , (A.1,A.1), (A.1,A.2) or (A.2,A.1)) <i>NP_Insp</i> : Number of Parts Inspected ⁽¹⁾ Controller A has detected no anomalies during both evaluations.
<i>Reproducibility rate of exploration</i>	$\frac{NP_Repro_Ex}{NP_Repeat}$	<i>NP_Repro_Ex</i> : Number of Parts where the controller detected twice the same anomaly than experts ((E.0, A.0,A. 0) ⁽²⁾ , (E.1, A.1, A.1), (E.1, A.2, A.2), (E.1, A.1, A.2), (E.1, A.2, A.1), (E.2, A.1, A.1), (E.2, A.2, A.2); (E.2, A.1, A.2), (E.2, A.2, A.1)) ⁽²⁾ The experts detected no anomaly and controller A detected no anomaly during both evaluations.
<i>Overall exploration rate</i>	$\frac{NP_Repro_Ex}{NP_Insp}$	
<i>Number of false alarms</i>	$\frac{NP_FA}{2}$	<i>NP_FA</i> : Number of Parts where a False Alarm was observed ((E.0, A.1) ⁽³⁾ , (E.0, A.2)) ⁽³⁾ The experts detected no anomaly and controller A detected an anomaly and judged it as acceptable.
<i>Number of omissions</i>	$\frac{NP_Om}{2}$	<i>NP_Om</i> : Number of Parts where an anomaly has not been detected by the controller ((E.1, A.0) ⁽³⁾ , (E.2, A.0)) ⁽³⁾ The experts detected an anomaly but controller A did not detect it.

Table 6 - Exploration measures in a R²&E² gage

Exploration measures		With...
<i>Repeatability rate of evaluation</i>	$\frac{NP_Repeat_Ev}{NP_Insp_A}$	<i>NP_Repeat_Ev</i> : Number of Parts where the controller has twice evaluated the part in the same way twice ((A.1, A.1) ⁽¹⁾ , (A.2,A.2)) <i>NP_Insp_A</i> : Number of Parts Inspected and where an anomaly has been detected both times ((A.1, A.1),(A.2,A.2), (A.1, A.2), (A.2, A.1)) ⁽¹⁾ Controller A evaluated the anomaly as acceptable during both evaluations.
<i>Reproducibility rate of exploration</i>	$\frac{NP_Repro_Ev}{NP_Repeat_Ev}$	<i>NP_Repro_Ev</i> : Number of Parts where the controller has twice evaluated the anomaly in the same way as the experts ((E.1, A.1,A. 1) ⁽²⁾ , (E.2, A.2, A.2)) ⁽²⁾ The experts evaluated the anomaly as acceptable and controller A evaluated both times this anomaly as acceptable.
<i>Global exploration rate</i>	$\frac{NP_Repro_Ev}{NP_Insp_A}$	
<i>Number of more severe</i>	$\frac{NP_MS}{2}$	<i>NP_MS</i> : Number of Parts where an anomaly was judged as not acceptable by the controller and judged as acceptable by the experts (E.1, A.2) ⁽³⁾ , ⁽³⁾ The experts evaluated the anomaly as acceptable and controller A judged it as not acceptable.
<i>Number of less severe</i>	$\frac{NP_LS}{2}$	<i>NP_LS</i> : Number of Parts where an anomaly was judged as acceptable by the controller but as not acceptable by the experts (E.2, A.1) ⁽⁴⁾ , ⁽⁴⁾ The experts evaluated the anomaly as not acceptable and the controller A judged it as acceptable.

<i>Matching</i>	$\frac{Nb_A + Nb_NA + Nb_A_ND}{2 * Nb_Insp}$	<i>Nb_A</i>: Number of anomalies judged as acceptable by the controller and by the experts (E.1, A.1) <i>Nb_NA</i>: Number of anomalies judged as not acceptable by the controller and by the experts (E.2, A.2) <i>Nb_A_ND</i>: Number of anomalies judged as acceptable by the controller and not detected by the experts and vice versa ((E.0, A.1), (E.1, A.0))
-----------------	---	--

Table 7 - Evaluation measures in a R²&E² gage

For example, Table 8 and Table 9 give respectively the measures of exploration and the measures of evaluation obtained with the data given in Table 5.

	Controller A	Controller B	Controller C
Repeatability rate of exploration	67% ⁽¹⁾	70%	57%
Reproducibility rate of exploration	55% ⁽²⁾	52%	41%
Global exploration rate	37% ⁽³⁾	37%	23%
Number of false alarms	9.5 ⁽⁴⁾	10	10
Number of omissions	4,5 ⁽⁵⁾	4.5	6.5

⁽¹⁾ Parts #1, #2, #3, #4, #5, #7, #9, #11, #12, #15, #17, #18, #19, #20, #22, #23, #26, #28, #29 and #30 (*NB_Repeat_Ex*=20, *NB_Insp*=30) – 20/30=67%

⁽²⁾ Parts #2, #3, #9, #11, #12, #15, #19, #22, #23, #25 and #28 (*NB_Repro*=11, *NB_Repeat*=20) – 11/20=55%

⁽³⁾ (*NB_Repro*=11, *NB_Ins*=30) – 11/30=37%

⁽⁴⁾ For inspection I1, parts #4, #5, #13, #17, #20, #24, #29 and #30 and for inspection I2, parts #4, #5, #8, #10, #16, #17, #20, #21, #25, #29 and #30 (*NB_FA*=19) – 19/2=9.5

⁽⁵⁾ For Inspection I1, parts #1, #6, #7, #18 and #27 and for inspection I2, parts #1, #7, #14 and #18 (*NB_Om*=9) – 9/2=4.5

Table 8 – Example of exploration results in a gage R²&E² study

	Controller A	Controller B	Controller C
Repeatability rate of evaluation	56% ⁽¹⁾	76%	54%
Reproducibility rate of evaluation	22% ⁽²⁾	23%	28%
Global evaluation rate	12% ⁽³⁾	18%	15%
Number of more severe	6 ⁽⁴⁾	5.5	3.5
Number of less severe	0.5 ⁽⁵⁾	0.5	0
Matching	43% ⁽⁶⁾	43%	41%

⁽¹⁾ Parts #12, #15, #17, #19, #20, #22, #23, #29 and #30 (*NB_Repeat_Ev*=9, *NB_Insp_A*=16) – 9/16=56%

⁽²⁾ Parts #12 and #22 (*NB_Repro_Ev*=2, *NB_Repeat_Ev*=9) – 2/9=22%

⁽³⁾ (*NB_Repro_Ev*=2, *NB_Ins_A*=16) – 2/16=12%

⁽⁴⁾ For inspection I1, parts #15, #19 and #23 and for inspection I2, parts #2, #3, #6, #9, #15, #19, #23, #26 and #29 (*NB_MS*=12) – 12/2=6

⁽⁵⁾ For Inspection I1, parts #27 (*NB_LS*=1) – 1/2=0.5

⁽⁶⁾ (*Nb_A*=8, *Nb_NA*=2, *Nb_A_ND*=16) – 26/60=43%

Table 9 – Example of evaluation results in a R²&E² Gage

By knowing the results of a gage R²&E² study, more appropriate corrective actions can be selected. These actions may concern either the exploration of anomalies or the evaluation of anomalies, or both. In the example given in Table 9, the obtained measures show that corrective actions must specifically target the method used by the three controllers to evaluate the anomalies.

The results of a gage R²&E² study can sometimes be judged as too severe. It is especially the case when experts say that they did not detect an anomaly (value 0) and a controller detected this anomaly but judged it as acceptable (value 1). The initial data can therefore be modified by changing the value 1 to the value 0 for controllers when the value of the experts is 0. Table 10 gives the new data obtained and which can be used for the gage R²&E² study. Table 11 and Table 12 give the new measures provided.

Part #	True Value	Controller A		Controller B		Controller C	
		I1	I2	I1	I2	I1	I2
1	1	0	0	2	2	2	2
2	1	1	2	2	1	0	1
3	1	1	2	1	2	0	2
4	0	0	2	0	0	0	0
5	0	0	2	2	2	2	0
6	1	0	2	1	1	2	1
7	1	0	0	0	2	0	2
8	0	0	0	2	2	0	0
9	1	1	2	1	0	2	1
10	0	0	0	2	0	0	0
11	0	0	0	0	0	1	1
12	2	2	2	1	0	2	0
13	0	0	0	0	0	2	0
14	1	1	0	2	2	1	1
15	1	2	2	0	0	1	1
16	0	0	0	2	2	0	0
17	0	2	2	2	0	0	0
18	1	0	0	1	0	0	0
19	1	2	2	2	2	0	0
20	0	2	2	0	2	2	2
21	0	0	2	2	2	2	0
22	1	1	1	1	0	0	1
23	1	2	2	0	0	0	1
24	0	1	0	0	0	2	0
25	0	0	1	2	2	2	0
26	1	1	2	1	1	2	0
27	2	0	1	2	2	2	0
28	1	1	2	2	2	1	0
29	0	2	2	0	0	0	0
30	0	2	2	0	0	0	2

(0: anomaly not detected, 1: anomaly detected but judged as acceptable, 2: anomaly detected and judged as not acceptable)

Table 10 – Example of a gage R²&E² study using filtered data

	Controller A	Controller B	Controller C
Repeatability rate of exploration	73%	73%	73%
Reproducibility rate of exploration	68%	68%	68%
Global exploration rate	50%	50%	50%

⁽¹⁾ Parts #1, #2, #3, #7, #8, #9, #10, #11, #12, #13, #15, #16, #17, #18, #19, #20, #22, #23, #26, #28, #29 and #30 (NB_Repeat_Ev=20, NB_Insp_A=30) – 20/30=73%

⁽²⁾ Parts #2, #3, #8, #9, #10, #11, #12, #13, #15, #16, #19, #22, #23, #26 and #28 (NB_Repro_Ev=15, NB_Repeat_Ev=22) – 15/22=68%

⁽³⁾ (NB_Repro_Ev=15, NB_Insp_A=30) – 15/30=50%

Table 11 – Example of exploration results with filtered data

	Controller A	Controller B	Controller C
Repeatability rate of evaluation	64%	86%	54%
Reproducibility rate of evaluation	22%	25%	28%
Global evaluation rate	14%	21%	15%

⁽¹⁾ Parts #12, #15, #17, #19, #20, #22, #23, #29 and #30 (NB_Repeat_Ev=9, NB_Insp_A=14) – 9/14=64%

⁽²⁾ Parts #12 and #22 (NB_Repro_Ev=2, NB_Repeat_Ev=9) – 2/9=22%

⁽³⁾ (NB_Repro_Ev=2, NB_Insp_A=14) – 2/14=14%

Table 12 – Example of evaluation results with filtered data

Even when using data filtered, the results of the gage R²&E² study confirm the bad reproducibility of the evaluation of controllers found with the initial gage R²&E² study.

3. Toward a better inspection vision

When a gage R²&E² study reveals that inspection visual process must be improved (as is the case for the given example), corrective actions must be taken. We will now detail which actions can be applied to improve the detection and evaluation of aesthetic anomalies.

3.1. Description of anomalies

Visual inspection has been extensively studied. In most of studies, detection of defects is considered as the main step of visual inspection, the evaluation step simply consisting for the controller to pass the product if no defect has been detected. Megaw (1979) has for example listed the main factors which can impact the detection of a defect: visual acuity, lighting, inspection time and feedback. Other studies have continued this work by measuring the impact of each of these factors to the results of visual inspection: magnification (Lee and Chan, 2009), inspection time (Nakajima *et al.*, 2013), external noises (Taylor *et al.*, 2003) and inspection distance (Jebaraj *et al.*, 1999).

The defects are most often always known (typical surface cracks for example in the visual inspection of aircraft) and the controllers know all the defects they have to detect. For advanced controls, tolerances may even be defined (for example, a crack with a length which does not exceed 0.5 cm). Controllers can also have a photos library at their disposal illustrating all defects he can detect.

In all cases, the purpose of visual inspection is to ensure that all the products have no defects and/or meet the technical requirements imposed by the consumers.

As mentioned above, the objective of visual inspection is also to check than all the products are free of aesthetic anomalies and so will be well perceived by the consumers (Tsotsou, 2006). In this context, the purpose of visual inspection is not only to detect any defect but also to detect any anomaly which could be perceived by the consumer as a defect. We can thus explain why the results of visual inspection are sometimes so poor because of the difficulty in listing exhaustively all the anomalies which can occur on a given product. The number of possible anomalies is considerably higher than the number of possible defects. In fact, an anomaly-free surface does not exist since, at a given level of magnification, the controller will always detect some kind of deviation (in relief, color, shape and/or contrast) from the ideal surface.

Most often, a list of aesthetical characteristics is built to help the controller to detect any anomalies. Unfortunately, these characteristics and the terms are generally directly related to the product and to switch to another product needs to define other characteristics.

We have therefore chosen to build a list of four generic descriptors usable by a controller to both detect and describe any aesthetic anomalies on the surface of any product (Table 13).

<i>Anything that...</i>	
Mark	<i>Damages the surface, a break in the form (scratches, scuffs, dent, etc.).</i>
Heterogeneity	<i>Makes the product lose its homogeneity (a stain, a difference in color and/or texture, etc..)</i>
Pollution	<i>Is added to a surface and which is considered undesirable (a hair, dust, a particle, etc.).</i>
Distortion	<i>Changes the shape of the surface (an overly-polished surface, an irregular line of light, etc.).</i>

Table 13 – The four descriptors of any aesthetic anomalies

Any aesthetic anomaly can thus be described with one of these four descriptors. The main advantage of this list is to be available for visual inspection of any product. Using a short list reduces also the knowledge that controllers must have. The detection of anomalies is therefore improved and the variability of the results of their inspections is necessarily decreased.

3.2. Characterization of anomalies

Once the anomaly has been detected and then described as a ‘Mark’, ‘Heterogeneity’, ‘Pollution’ or ‘Distortion’, it must then be detailed. We have therefore built a set of aesthetic attributes (see Table 14) usable for the four descriptors. These attributes have been divided into three groups, this distinction reflecting the manner in which the controller evaluates the anomaly. Initially, he focuses his attention on the anomaly itself, then analyses the conditions in which the anomaly can be perceived and finally considers the impact of the anomaly in relation to its local and overall environment.

	<i>Attribute</i>	<i>which characterizes...</i>
Factual description	Size	the size of the anomaly (e.g. the width of the anomaly makes it perfectly perceptible)
	Shape	the shape of the anomaly (e.g. the regularity of the anomaly makes it hardly noticeable)
Viewing conditions	Distance	the distance required to perceive the anomaly (for example, the anomaly is only seen at a distance of less than 30 cm).
	Orientation	the number of angular movements to be carried out to see the anomaly (for example, the anomaly is seen from all angles).
	Light intensity	the intensity required so as to see the anomaly (for example, the anomaly is seen perfectly with less than 200 lx).
	Duration	the time required to see the anomaly (for example, the anomaly is immediately seen at the beginning of the exploration stage).
	Direction	the direction in which the anomaly can be seen (for example, the anomaly is perceived when the product is oriented vertically).
Perspective	Local impact	how the anomaly is hidden or, on the other hand, is obviously present in its local environment (e.g. the round shape of the anomaly makes it very perceptible because it is completely the opposite to the horizontal lines of the decor in which it appears).
	Overall impact	the impact of the position of the anomaly on the product in terms of the overall perception (for example, the anomaly is easily seen because it is on a visible part of the product).

Table 14 – The attributes of an aesthetic anomaly

To characterize an anomaly, the controller has to give an intensity value for each attribute. In order to do this, he must have a written standard that sets out all the possible values for each attribute and describes the method of awarding these values. Table 15 shows the standard we built for the given example for the attributes ‘Distance’, ‘Orientation’ and ‘Local Impact’.

Value	Distance	Orientation	Local impact
1	Visible using a binocular		Very difficult to perceive because it is “completely hidden by the decor”
2	Visible to the naked eye	Perceived under only one light effect	Difficult to perceive because it is “hidden in the decor”
3	Closely visible	Perceived under two light effects	Perceived because it is “isolated but in keeping with the decor”
4	Visible at arm’s length	Perceived under three light effects	Easily perceived because it is NOT in keeping with the decor”
5	Visible from a distance		Very easily perceived because it is “obvious for the observer”

Table 15 – An example of a standard for the attributes ‘Distance’, ‘Orientation’ and ‘Local Impact’

If need be, the standard can be more detailed in order to better help the controller to give the correct value to attributes. Table 16 shows the standard we wrote for the attribute ‘Local impact’. This standard is based on the use of the Gestalt laws in the domain of perception (Weil-Barais *et al.*, 2005).

Local impact value	GESTALT LAWS		
	Similarity and Proximity	Continuity	Closure
1 (very low)	Anomaly is completely hidden by surrounding objects		
2 (low)	Anomaly is similar to surrounding objects and close to these objects	Anomaly is perfectly located in the continuity of the line of other objects	The anomaly closes the geometric shape
3 (quite strong)	Anomaly is similar to surrounding objects but it is further away from these objects	Anomaly is partially located in the continuity of the line of other objects	
4 (strong)	Anomaly is not similar to surrounding objects and close to these objects	Anomaly is not located in the continuity of the line of other objects	
5 (very strong)	Anomaly is further away from the surrounding objects and is not similar to the surrounding objects		

Table 16 – An example of detailed written standard for the attribute ‘Local Impact’

The anomaly having been characterized (i.e. a value has been given for each attribute), it can then be evaluated. The calculation of the overall intensity of the anomaly is made using all of the values the controller gives to the attributes. This calculation is generally expressed as a sum (sometimes weighted) of these values. Table 17 shows an example of a grid we built. The overall intensity of the anomaly is obtained by adding together the values of the retained attributes (value between 1 and 10) together.

Viewing conditions		Characteristics of the anomaly		Context	
Distance	Orientation	Size	Shape	Local impact	Overall impact
Visible at 30cm (+1)	Perceived under only one light effect (+0)	Small (+0)	Round or oval (+0)	Low (+0)	Low (+0)
Visible at 1m (+2)	Perceived under two light effects (+0)	Medium (+1)		Quite strong (+0)	
Visible at 3m (+3)	Perceived under three light effects (+1)	Large (+2)	Elongated (+1)	Strong (+1)	Strong (+2)

Table 17 – An example of a grid for evaluation of an aesthetic anomaly

This grid helps the controller to give the overall intensity of an aesthetic anomaly. For example, if he judges the anomaly as visible at 1m, perceivable under only one light effect, as small, elongated and having a low local impact but a strong overall impact, he will give a value equal to 5 for the overall intensity of the anomaly. Most often, this grid contributes to a significant reduction in the variability of the results.

Sometimes this grid cannot be built because a linear relationship cannot be established between the values of the attributes compared to the overall intensity of the anomaly. In this case, a neural network can be used to model this relationship (Jaeger, 2002). This network is composed of an input layer made up of n_e neurons, one output layer composed of a unique neuron and some hidden layers. It is supervised by using a set of N_k examples $\{(x_1, o_1), (x_2, o_2), \dots, (x_K, o_K)\}$

with:

- x_k : vector of n_e components representing the set of inputs of the k^{th} example to learn among the N_k examples (the values of the attributes of the aesthetic anomaly detected on the product k)
- t_k : vector of n_s components representing the set of expected outputs for the input x_k (the response concerning the compliance of the product k given by the experts)
- o_k : vector of n_e components representing the set of calculated outputs for the input x_k (the response concerning the compliance of the product k delivered by the network)

Each neuron j is connected to each neuron i of the next layer. The input of the neuron i is a weighted sum of the outputs o_j which is the result of a activation function f (in our case, a

$$\text{nonlinearity sigmoid function): } o_i = f\left(\sum_j w_{ij} o_j - \theta_j\right) \quad (1)$$

where w_{ij} = Weights of the connection between the neuron i and the neuron j
 o_i = Output of the neuron i
 o_j = Output of the neuron j
 θ_i = Threshold of the neuron i

For all the examples, the error Q is calculated: $Q = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^K (o_i - t_i)^2$ (2)

The back propagation algorithm (Rojas, 1996) can be used to find the weightings that minimize the error using the method of gradient descent. To illustrate this, Table 18 shows the data used for the neural network we built for the given example. The input values (which correspond to the aesthetic attributes values) for 25 parts have been given by the controllers using Table 16 and the outputs of the network (the results of the control) which have been provided by the experts.

Part No.	Distance	Orientation	Size	Shape	Local impact	Overall impact	Decision ^(*)
1	2	2	1	1	1	2	0
2	1	3	2	2	2	1	1
3	3	1	2	1	1	2	0
4	2	2	1	1	3	2	0
5	2	3	2	3	1	2	0
6	2	1	2	3	2	1	1
7	3	3	1	2	2	2	0
8	2	1	2	1	3	1	0
9	2	1	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	2	1	1
11	2	2	2	2	2	2	0
12	1	1	2	3	1	1	1
13	1	2	2	1	1	1	1
14	2	3	1	1	3	2	0
15	3	2	1	1	3	2	0
16	2	1	1	1	1	1	1
17	3	3	2	1	1	2	0
18	3	2	2	2	2	1	0
19	1	2	2	1	3	2	0
20	1	2	2	3	2	1	1
21	3	1	1	3	1	2	0
22	2	1	2	1	2	2	0
23	1	2	1	3	3	1	0
24	3	2	2	2	2	1	0
25	3	1	2	1	1	2	0

^(*) (0: part judged as not acceptable, 1: part judged as acceptable)

Table 18 – A set of examples for the neural network

Table 19 gives the weights we obtained with the network composed of an input layer which includes six neurons, two hidden layers each containing three neurons and an output composed of just one neuron.

<i>Layer 1 - Layer 2</i>	<i>Layer 2 - Layer 3</i>	<i>Layer 3 - Layer 4</i>
1,25113235	2,008033717	-4,81957938
1,83713356	-5,149549294	-8,13818758
2,42694381	-3,115685671	10,165202
-2,69548058	3,136690584	
3,12036503	-7,370603341	
2,59629298	-5,187267852	
4,93888783	-2,953619328	
-0,32579087	7,087173253	
-5,44919622	3,150288612	
-8,75730951		
2,03187057		
-6,78438159		
-1,77325739		
-1,9505911		
-2,9977124		
3,53868988		
-3,66206131		
-2,60379453		

Table 19 – An example of weights obtained with a neural network

The network has been used to evaluate the 30 parts of Table 2 and the results obtained were then compared with those given by the experts. Parts #12 and #27 were both judged as non-compliant and only three parts out of the other 27 parts were evaluated differently. The results may, of course, be improved by extending the set of examples used by the network.

With a supervised network, it is then possible to form a judgment about the conformity of a part from any set of attribute values of a detected anomaly (a set of 324 possible configurations in the case of an evaluation using the grid given in Table 17).

Table 20 shows for example the result given by the network for a particular set of attributes (D=1, O=2, SZ=2, SH=1, LI=1, GI=2) not included in the set of 25 examples given by the experts.

Part No.	D: Distance (1 to 3)	O: Orientation (1 to 3)	SZ: Size (1 to 3)	SH: Shape (1 to 3)	LI: Local impact (1 to 3)	GI: Global impact (1 to 3)	Decision (O: NC, 1: C)
1	1	2	2	1	1	2	1

Table 20 – A set of examples for the neural network

With this method, any controller is able to give a correct result (with good repeatability and good reproducibility) in a visual inspection of a part. We can so conclude that automatized evaluation of aesthetic anomalies can be carried out and can produce clearly better results than human controllers (see Table 2).

3.3. Expertise formalization

The use of an evaluation grid and a network improves the visual inspection significantly. In software development, a rule-based system, also called expert system, is a set of "if-then" and can be used to create software that will provide an answer to a problem instead of a human expert. In visual inspection, a rule-based system can also be used to explicit expert's knowledge and make its sharing possible with all controllers. This enables to make the knowledge implicitly captured by the trained neural network, explicit. In other terms, the neural network can be used to formalize the expertise of the controllers

Two types of approaches are used to explicit the knowledge of a neural network. Some methods, like SUBSET (Towell *et al.*, 1993), RuleNet (McMillan *et al.*, 1992) or N-of-M (Towell *et al.*, 1993), analyze incoming weights of hidden and output neurons with the aim of extracting rules. With other methods, like REAL (Craven *et al.*, 1994), VIA (Thrun, 1995) or RULENEG (Pop

et al., 1994), the patterns are presented to the trained network one by one and conjunctives rules are extracted.

The algorithm we have developed, called EKVI (Explicit Knowledge of Visual Inspection), can be classified into the second type of approaches. It looks for a set of rules from all the inputs and outputs of the neural network. It involves three steps:

-
1. From the calculated weights of the neural network, generate all the combinations of attributes values
 2. For each combination:
 - a. Extract rule mapping inputs directly to the output
 - b. Use existing rules to classify it and add a new rule if needed
 - c. Check if the extended set of rules still agree with all the other combinations
 3. Generalize the rules when possible
-

For example, with the grid given in Table 16, step 1 of the EKVI algorithm generates 324 possible combinations.

During the second step, it transforms for example the set of values given in the Table 20 in:

IF (D=1 AND O=2 AND SZ=2 AND SH=1 AND LI=1 AND GI=2) THEN Response="C"

If the base already contains the rule:

IF (D=1 AND O=2 AND SZ=3 AND SH=1 AND LI=2 AND GI=2) THEN Response="C"

the two rules are removed and a new rule is added:

IF (D=1 AND O=2 AND SZ=3 AND SH=1 AND (LI=1 OR LI=2) AND GI=2) THEN Response="C"

If the final base contains the rule:

IF (D=1 AND O=2 AND SZ=3 AND SH=1 AND (LI=1 OR LI=2 OR LI=3) AND GI=2) THEN Response="C"

This rule is transformed into:

IF (D=1 AND O=2 AND SZ=3 AND SH=1 AND GI=2) THEN Response="C"

If the final base contains both rules:

IF (D=1 AND O=1 AND SZ=3 AND SH=1) THEN Response="C"

IF (D=2 AND O=2 AND SZ=3 AND SH=1) THEN Response="C"

IF (D=3 AND O=3 AND SZ=3 AND SH=1) THEN Response="C"

the rules are removed and a new rule is added:

IF (D=O AND SZ=3 AND SH=1 AND GI=2) THEN Response="C"

The explicit knowledge obtained from the neural network with EKVI is:

IF (Distance = 1) AND (Local impact = 1 OR Local impact = 2) AND (Global impact = 1) THEN Response="C"

IF (Global impact = 2) THEN Response="NC"

IF (Local impact = 3) THEN Response="NC"

IF (Distance = 2) AND (Size = 1 OR Size = 2) AND (Local impact = 1 OR Local impact = 2) AND (Global impact = 1) THEN Response="C"

IF (Distance = 2 OR Distance = 3) AND (Size = 3) THEN Response="NC"

IF (Distance = 3) THEN Response="NC"

Whereas the experts could not explicit their knowledge, the method (grid evaluation, neural network and EKVI algorithm) reduce significantly the knowledge they must have to carry out a visual inspection. In the example, we finally found only 6 rules. This result can so easily be shared by the controllers and makes the visual inspection more efficient and effective.

4. Application

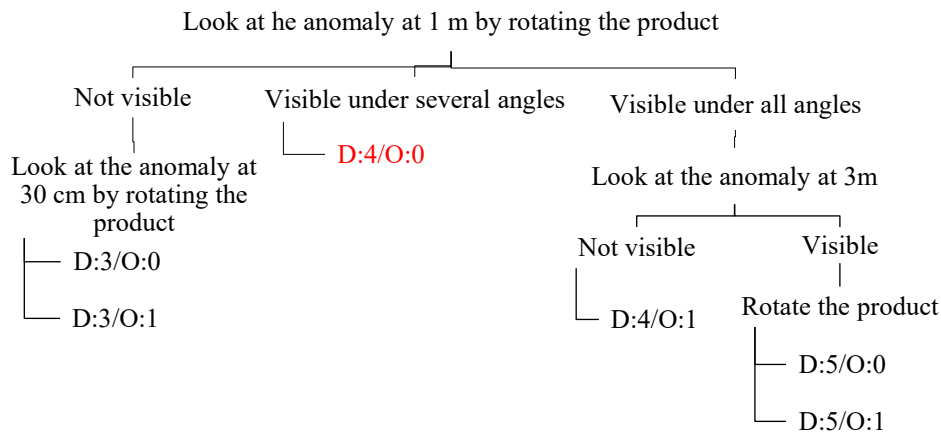
Our approach has been applied in several French and Swiss companies where visual inspection should be improved. This paper gives a few examples of what has been done in ST Dupont, a manufacturer of lighters and pens, and in Fournier, a well-known kitchen and bath units manufacturer. In both companies, the results of visual inspection were poor mainly because of the lack of a quality standard.

In Fournier, we have built a written standard such as the grid we detailed previously (see Table 16). Table 21 shows therefore the grid that the company is now using. It is used for any visual anomalies (marks, heterogeneity, pollution and distortion). It has been tested and successfully applied to a family of products but will soon be adapted in order to be applied to any product family (polyurethane lacquer, traditional wood finish, steel or aluminum finish,...). Specific training has been given to controllers and the first results of the experience show a significant reduction in the variability of the results of the visual inspection.

	Viewing conditions		Perspective			Intensity	
	Distance (D)	Orientation (O)	Local		Global		
			Direction (DT)	Colour (C)	Final Use (U)		
3	Visible at 30cm (+1)	Seen under only one angle (+0)	In the same direction as the decor (-1)	Of the same colour as the product (+0)	Visible in the case of open or closed furniture (+0)	1	Compliant
						2	
						3	
4	Visible at 1m (+2)		Plain decor (+0)	Colour contrast (+1)	Visible in the case of open furniture (+0)	4	
						5	
						6	
5	Visible at 3m (+3)	Seen under several angles (+1)	Not in the same direction as the decor (+0)		Visible in the case of closed furniture (+1)	7	Non-compliant
						8	

Table 21 – The evaluation grid used in Fournier to evaluate an aesthetic anomaly

Distance value (D) and Orientation value (O) are given at the same time. The algorithm given below shows how these values are obtained.



In ST Dupont, we first defined a set of aesthetic attributes and their possible values for a family of lighters (see Table 22).

Attribute	Level	Value
Orientation (OR)	Visible under a small part of the movement	2
	Visible under a part of the movement	3
	Visible under all the movement	4
Shape (SH)	Round shape	1
	Elongated shape	2
Size (SI)	$\emptyset < 0,2$ (round) Length < 1,5 and thin (elongated)	0
	$\emptyset > 0,2$ and $\emptyset < 0,3$ (round) Length > 1,5 and thin (elongated)	1
	$\emptyset > 0,2$ and $\emptyset < 0,35$ (round) Length < 1,5 and large (elongated)	2
	$\emptyset > 0,35$ (round) Length < 1,5 and large (elongated)	3
Shape contrast (SC)	Favorable Localization	-1
	Hidden in the background	0
	Unfavorable localization and not hidden in the background	1
Color contrast (CC)	No contrast	0
	Low contrast	1
	High contrast	2
Location (LO)	Bottom	1
	Small hinge side, top cap	2
	Engine, back, brand (bottom)	3

Table 22 – The aesthetic attributes in ST Dupont

By contrast with Fournier, we could not establish a linear relationship between the values of attributes and the result of the visual inspection. We therefore used a neural network to model this link (as proposed in section 3.2). We used a set of 122 anomalies for this purpose (see Table 23). For each of them, experts gave their decisions: Compliant(C), non-compliant (NC), just at the limit of compliance (C?).

	OR	SH	SI	SC	CC	LO	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

Table 23 – The set of examples in ST Dupont

The neural network included 4 layers, 6 input neurons (OR, SH, SI, SC, CC, LO) and 1 output neuron (the final result). We obtained an agreement of 94% between the results provided by the experts and those provided by the neural network. We therefore have a preliminary confirmation that human expertise in visual inspection can be, or at least partially, automated. To confirm these results, an additional sample of 15 aesthetic anomalies was used. By using the neural network, we obtained an agreement of 76%, which is slightly below the result that we would have wanted. There are several reasons for this. First, the attributes we defined cannot describe all the differences between the anomalies on their own. Another reason could be that the quality standard is not understood in the same way by all the experts. Experts will therefore undergo need to specific training in the evaluation of aesthetic anomalies to improve the reliability of the neural network.

5. Conclusion

The paper details how to improve inspection vision of products. The gage R^2E^2 we developed can be used to decide which corrective actions to carry out. The four generic descriptors and the list of their attributes we list are usable by a controller to both describe and characterize any aesthetic anomaly on the surface of any product. The paper details then how evaluate an anomaly with a grid, or with a neural network when the link between attributes values and the overall intensity of the anomaly is not linear. Finally, a method to formalize the expertise of controllers is described.

Our approach has been applied in companies which are part of the INTERREG IV program. The practices we suggested have significantly reduced the variability of the visual inspection results observed up to now. Of course, due to the subjectivity of a human evaluation, the efficiency and the effectiveness of visual inspection can be further enhanced. Therefore our research aims now to apply our approach to a surface inspection automatized device. This device should be able to detect any type of aesthetic anomaly (scratch, streak, etc.), evaluate these anomalies in relation to their perceived intensity and then evaluate the conformity of the product. A first prototype has been developed in a Ph.D Thesis (Le Goïc, 2012). A new prototype is currently being developed in the MESurA project (Measuring Surface Appearance, 2013).

6. References

- Automotive Industry Action Group (AIAG) (2002). Measurement System Analysis, 3rd ed. AIAG, Detroit, MI.
- Ball, K.K., Beard, B.L., Roenker, D.L., Miller, R.L. and Griggs, D.S. (1988). Age and visual search: Expanding the useful field of view. *Journal of the Optical Society of America A*, 5, 12, pp.2210-2219.
- Baudet, N. (2012). "Maîtrise de la qualité visuelle des produits - Formalisation du processus d'expertise et proposition d'une approche robuste de contrôle visuel humain". Ph.D. thesis, Université de Savoie.
- Baudet, N., Pillet, M. and Maire, J.L. (2011). "Visual inspection of products: a comparison of the methods used to evaluate surface anomalies", *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 2, 1, pp.31-38.
- Baudet, N., Pillet, M. and Maire, J. L. (2012). Neural network for improvement of the visual quality process. *Proceedings of the International Conference on Kansei Engineering and Emotion Research*, Penghu, Taiwan.
- Cerella, J. (1985). Age-related decline in extrafoveal letter perception. *Journal of Gerontology*, 40, 6, pp. 727-736.
- Brožek, J., Simonson, E. and Keys, A. (1947). A work test for quantitative study of visual performance and fatigue. *Journal of Applied Psychology*, 31, 5, pp. 519-532.
- Chabukswar, S., Gramopadhye, A.K., Melloy, B.J. and Grimes, L.W. (2003). Use of aiding and feedback in improving visual search performance for an inspection task. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 13, 2, pp. 115-136.
- Courtney, A.J. (1985). Development of a search-task measure of visual lobe area for use in industry. *International Journal of Production Research*, 23, 6, pp. 1075-1087.
- Courtney, A.J. (1986). A search performance test for visual lobe size. *IIE transactions*, 18, 1, pp.56-62.
- Craven, M.W. and Shavlik, J.W. (1994). "Using sampling and queries to extract rules from trained neural networks" *Proceedings of the 11th International Conference on Machine Learning*, New Brunswick, NJ, USA.
- Drury, C. G. and Fox, J. G. (1975). *Human reliability in quality control*, Taylor & Francis, New York, NY, pp. 11-16.
- Drury, C.G. (1992). Inspection performance. In *G. Handbook of Industrial Engineering*, 2nd ed. Salvendy, New York: John Wiley & Sons, pp. 2282-2314.
- Findlay, J.M. (1997). Saccade target selection during visual search. *Vision research*, 37, 5, pp. 617-631.
- Gramopadhye, A.K., Drury, C.G. and Sharit, J. (1997). Feedback strategies for visual search in airframe structural inspection. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 19, 5, pp. 333-344.

- Hays, J.M. and Hill, A.V. (2001). A preliminary investigation of the relationships between employee motivation/vision, service learning, and perceived service quality. *Journal of Operations Management*, 19, 3, pp. 335-349.
- Jaeger, H. (2002). Tutorial on training recurrent neural networks, covering BPTT, RTRL, EKF and the “echo state network” approach. Tech. rep.no. GMD report 159. German National Research Center for Information Technology.
- Jebaraj, D., Tyrrell, R. A., & Gramopadhye A. K. (1999). Industrial inspection performance depends on both viewing distance and oculomotor characteristics. *Applied Ergonomics*, 30, 3 223-228.
- Jebaraj, D., Tyrrell, R.A. and Gramopadhye, A.K. (1999). Industrial inspection performance depends on both viewing distance and oculomotor characteristics. *Applied Ergonomics*, 30, 3, pp. 223-228.
- Kephart, N.C. and Mason, J.M. (1950). Acuity differences between the two eyes and job performance. *Journal of Applied Psychology*, 34, 6, p.423.
- Konz, S., Peterson, G. and Joshi, A. (1981). “Reducing inspector errors”. *Quality Progress*, 14, 7, pp. 24-26.
- Lee, F. C. H., and Chann A. H. S. (2009). Effects of magnification methods and magnifier shapes on visual inspection. *Applied Ergonomics*, 40, 3, 410-418.
- Le Goïc, G. (2012). ”Qualité géométrique et aspect des surfaces”. Ph.D. thesis, Université de Savoie.
- McCormick, E.J. (1950). An analysis of visual requirements in industry. *Journal of Applied Psychology*, 34, 1, p. 54.
- Lawler, E.E. (1969). Job design and employee motivation. *Personnel Psychology*, 22, 4, pp 426-435.
- Lin, Y.T., Lin, P.H., Hwang, S.L., Jeng, S.C. and Liao, C.C. (2009). Investigation of legibility and visual fatigue for simulated flexible electronic paper under various surface treatments and ambient illumination conditions. *Applied Ergonomics*, 40, 5, pp. 922-928.
- Maire, J.L., Pillet, M., Baudet, N. (2013) “Gage R2&E2: an effective tool to improve the visual control of products”, *International Journal of Quality & Reliability Management*, 30, 2, pp.161 – 176.
- Maxwell, J.P., Masters, R.S.W. and Eves, F.F (2003). The role of working memory in motor learning and performance. *Consciousness and Cognition*, 12, 3, pp. 376-402.
- McMillan, C., Mozer, M.C. and Smolensky, P. (1992). “Rule induction through integrated symbolic AND subsymbolic processing” in J. E. Moody, S. J. Hanson, & R. P. Lippmann Eds., *Advances in neural information processing systems 4*, San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, pp. 969-976.
- Megaw, E. D. (1979) Factors affecting visual inspection accuracy. *Applied Ergonomics*, 10(1), 27-32
- Measuring Surface Appearance (2013). Available from: < <http://symme-mesura.com/>>.
- Nakajima, R., Shida, K. and Matsumoto, T. (2013). A Study on the Effect of Inspection Time on Defect Detection in Visual Inspection, *APMS 1, IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Springer, 414, pp. 29-39.
- Näsänen, R., Ojanpää, H. and Kojo., I. (2001). Effect of stimulus contrast on performance and eye movements in visual search. *Vision Research*, 41, 14, pp. 1817-1824.
- Pop, E., Hayward, R. and Diederich, J. (1994). “RULENEG: extracting rules from a trained ANN by stepwise negation”. QUT NRC Technical report, Neurocomputing Research Centre, Queensland University Technology, Brisbane, Qld.
- Rebsamen, M., Boucheix, J.M. and Fayol, M. (2010). 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, pp. 150-160.
- Rojas, R. (1996), *Neural networks – A systematical introduction*, Springer Verlag, Berlin.
- Rousseau, D.M. (1977). 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, pp. 18-42.
- Sagi, D. (2011) Perceptual learning in vision research. *Vision research*, 51, 13, pp. 1552-1566.
- Sablatnig, R. (1997). A highly adaptable concept for visual inspection. *Vienna University of Technology*. pp. 1-4.
- Scialfa, C.T., Kline, D.W. and Lyman, B.J. (1987). 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, pp 14.
- Shore, D.I. and Klein, R.M. (2001). On the manifestations of memory in visual search. *Spatial vision*, 14, 1, pp. 59-75.
- Schilling, E. G. (1982). *Acceptance sampling in quality control*, Marcel Dekker, New York, NY.

Thrun, S. (1995). "Extracting rules from artificial neural networks with distributed representations". In: G. Tesauro, D. Touretzky, T. Leen, eds, *Advances in Neural Information Processing Systems 7*, MIT Press, Cambridge, MA.

Taylor, W. R., Bowling, S. R., and Gramopadhye, A. K. (2003). The Effects of Intermittent, Random, and Continuous Noise on the Visual Search Component of a Visual Inspection Task, *Proceedings of Industrial Engineering Research Conference*, Portland, Oregon.

Towell, G. and Shavlik, J. (1993). "Extracting refined rules from knowledge-based neural networks", *Machine Learning*, 13, 1, pp. 71-101.

Wang, M.J.J., Lin, S.C. and Drury, C.G. (1997). Training for strategy in visual search. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 20, 2, pp. 101-108.

Weil-Barais, A.A., Dubois, D., Nicolas, S., Pedinielli, J.L. and Streri, A. (2005). *L'homme cognitif*, 1st ed., Quadriage.

Wiener, E.L. (1975). Individual and group differences in inspection. *Human Reliability in Quality Control*, C.G. Drury and J.G. Fox, London: Taylor & Francis. pp.101-122.

Generic and structured description of tactile sensory perceptions

Bruno Albert¹, Jean Luc Maire¹, Maurice Pillet¹, Cecilia Zanni-Merk², François de Bertrand de Beuvron², Christophe Knecht³, Julien Charrier³

¹ SYMME laboratory – Université Savoie Mont-Blanc – Annecy le Vieux– France – bruno.albert@ineva.fr

² ICube laboratory – INSA de Strasbourg – Strasbourg – France

³ INEVA – Illkirch – France

Abstract: In the field of quality control of products, very few applications make use of the sense of touch. Touch involves complex physical phenomena, mainly related to contact and friction. Being able to master this type of product control presupposes the understanding of how the tactile perception of a product is constructed. Moreover, realizing quality control by means of a comparison to a reference is important in order to ensure customer satisfaction. Looking at the tactile descriptors usually proposed, one can observe that these descriptors are generally strongly related to specific products and languages. In addition, they are often intended to be used in the design process of new products.

This paper focuses on the measuring of the tactile sensory perception in a production context. Although the sensory analysis of the customer perception is not the main topic here, the specificities of the tactile control in production detailed in this paper are based on it. In particular, the aim is to guarantee the expected sensory perceptions of the customer, independently from those of the inspectors in charge of product control. This feature induces the need for a new classification of the tactile descriptors to be used in quality control. The paper describes the process of tactile perception by analogy with the process of visual perception which is better formalized. An inventory of the tactile descriptors mentioned in the literature is done and a list of the relevant ones in the context of tactile control of product is proposed. Several methods for the structuring of these descriptors are analyzed, with the focus put on obtaining a very small list of descriptors. Indeed, this is essential in order to reduce the variability of the results usually seen in this type of control. Finally, this paper shows how ontologies can be used, through the representation of these descriptors as well as the relations between them, in order to model the expertise associated with tactile control. The aim of this modelling is to lead to the automation (or semi-automation) of this type of control.

The originality of the paper is the proposal of a different, overall generic, way to address the tactile perception of a product, while mainly focusing on sensory measurements in production.

Keywords: perceived quality; tactile control sensory measurement; tactile descriptors; sensations.

1. INTRODUCTION

While visual inspection of products has been widely studied and has led to a variety of methods in order to control perceived quality (N Baudet, Pillet, & Maire, 2011; Nathalie Baudet, Pillet, & Maire, 2011; Nathalie Baudet, 2012; Désage et al., 2015; Guerra, 2008; Maire, Pillet, & Baudet, 2013; Xie, 2008) interest for the sense of touch has only recently emerged.

Industrials are very concerned by the tactile control of products. Although the act of purchase usually starts with the visual perception of a product, it is almost always followed by hands-on observation and thus, tactile perception. Touch can confirm or contradict the visual perception of the customer with an assessment of the product surface characteristics. Formalizing the tactile perception could be a decisive factor in ensuring a product conformity regarding customer expectations. Section 2 describes the process of tactile perception. Section 3 lists usual tactile descriptors and presents a new generic and structured way to describe tactile sensations. Section 4 provides the validation methods and section 5 is an introduction of the possible use of ontologies in this study. Finally section 6 presents our conclusions and perspectives of future work.

2. FROM STIMULI TO TACTILE PERCEPTION

The process of creation of a tactile perception starts with touch, which can be defined as the stimulation of the skin by thermal, mechanical, chemical or electrical stimuli. Sensory systems activate as soon as a stimulus is detected. They transform the energy received through the stimuli to electrical energy by a change of neuronal electrical potential (transduction). Encoded information is then processed by the nervous system in order to produce sensations. Sensory systems located in the nervous system interpret these sensations by comparison to memories and known sensations. Perceptions are the results of this process.

In principle, a sensation is identical, or near-identical, for everybody. However, a perception differs from one person to another, and depends on experience and/or culture. A schematic view of the tactile perception process is provided in Figure 1.

2.1. Types of sensory receptors

There are several types of sensory receptors sorted following the type of stimulus they are able to detect (De Boissieu, 2010; S.J. Lederman & Klatzky, 2009; Susan J. Lederman & Klatzky, 1987; University of Washington, 2009). Amongst somatosensory receptors localized on the skin or in the epidermis, the following can be listed:

- Thermoreceptors sensitive to temperature variations (hot or cold)
- Nociceptors sensitive to pain (sting, pinch, extreme temperatures, etc.)
- Mechanoreceptors sensitive to mechanical deformations (vibrations, stretching, pressure, etc.)

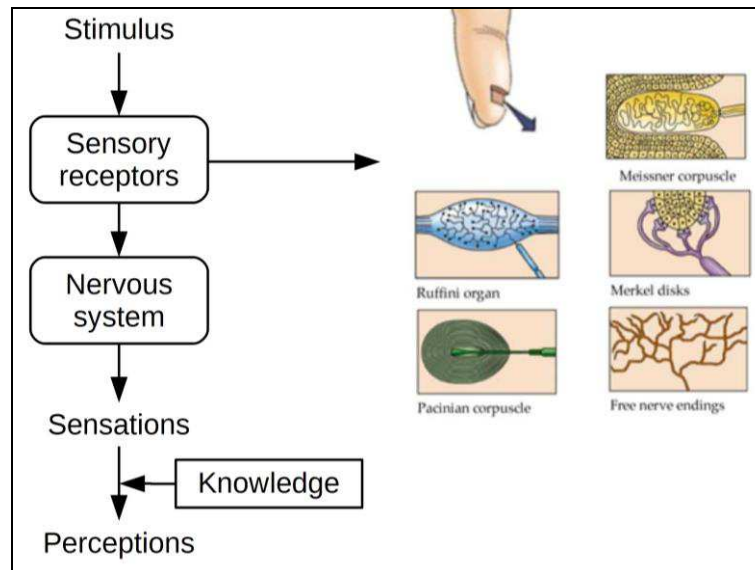


Figure 1: Tactile perception process. Inspired from (De Boissieu, 2010; De Rossi & Scilingo, 2006).

Mechanoreceptors take a form of encapsulated nerve endings like Meissner, Ruffini and Pacini corpuscles, or a form of free nerve endings like the one associated with Merkel cells. The latter are located at the base of the epidermis. They are very sensitive to weak pressures applied to the skin. Meissner's corpuscles are located directly under the epidermis. They also enable a fine tactile perception and are particularly sensitive to very slight contact and constant pressure. Ruffini's corpuscles, located in the dermis are sensitive to pressure and stretching. Finally Pacini's corpuscles, located in the deep dermis and hypodermis, are only sensitive to brutal variations of deformation of the skin (De Rossi & Scilingo, 2006).

The localization of these cutaneous receptors on the body differs, as well as the size of the zone they cover (S.J. Lederman & Klatzky, 2009; University of Washington, 2009). On the one hand, sensory receptors (Merkel and Meissner) localized on the surface of the skin have very narrow and well delineated sensitive areas. On the other hand, sensory receptors (Ruffini and Pacini) localised deep in the skin cover larger zones with vague limits.

The speed of reaction to stimuli is also different from one receptor to another. The ones associated with Merkel's cells and Ruffini's corpuscles react slower than the ones associated with Meissner's and Pacini's corpuscles.

2.2. Types of tactile perceptions

There are two types of manual tactile perceptions: the cutaneous and the haptic perceptions (Hatwell, Streri, & Gentaz, 2003). The cutaneous perception results from the stimulation of the skin by contacts with an object while keeping the hand still (e.g. the stimulation produced by a sharp object positioned on someone's hand). The haptic perception results from active movements of exploration of the hand in contact with an object (e.g. applying a pressure onto the object's surface). These two types correspond respectively to passive and active touch. Active touch hence combines a kinesthetic approach (movement) to the cutaneous sensation (Révész, 1950). Moreover, the hand is considered as the best tactile perceptive system (Hatwell et al., 2003).

Therefore, defining how to control a product using touch is not limited to the choice of the hand zone to be used in order to stimulate sensory receptors related and perceive specific characteristics of a product. It is also important to choose appropriate exploration movements to be associated with the cutaneous stimulations.

Haptic perceptions are often involved in the context of quality control, because controllers generate exploratory movements with their hands on products. Some studies (Eterradossi, 2011; Hollins & Risner, 2000; S.J. Lederman & Klatzky, 2009) have revealed the significance of the roles of these movements in order to improve tactile perceptions. Through a variety of exploratory possibilities (lateral motion, pressure, static contact, contour following, holding, enclosure, etc.), the

controller is able to distinguish between two types of properties of an object: its spatial properties (form, size, orientation, distance, weight, etc.) and its physical properties related to its texture (roughness, hardness, elasticity, etc.).

2.3. Visual perception vs tactile perception

Both vision and touch enable to get information about our surrounding, and more specifically about spatial and physical characteristics of objects. Considering the field of quality control, it is essential to know which sense is the most efficient regarding the type of control to be performed.

Some studies have drawn comparisons between these two modes of perception. They revealed that although tactile perception is less precise than vision in order to detect and evaluate spatial properties of objects (Simonnet, Guinard, & Tisseau, 2005) – vision enabling a more global approach – touch enables a much higher sensitivity for the evaluation of fine surface characteristics (Heller, 1989b; Klatzky, Lederman, & Metzger, 1985). Indeed, it induces a direct contact with the object and thus to collecting more information about the texture. For instance, Heller (1989a) has shown that tactile perception is more appropriate in order to discriminate abrasive paper between P1000 and P6000.

While touch is sometimes used in quality control, it is usually associated with visual control. On the one hand vision is used to control some geometric anomalies of surfaces. On the other hand, touch is used to evaluate texture anomalies. Studies performed on sighted, early-blind and late-blind subjects (Heller, 1989b; Lebaz, 2011; Susan J. Lederman, Klatzky, Chataway, & Summers, 1990) confirm the fact that the sense of touch is superior when it comes to discriminating fine textures, but do not indicate that touch alone would be more efficient than both, considering a general product inspection.

However, one can understand that some other aspects of objects and surface properties are directly related to the fact that touch is involved when using them. Thus, these aspects, which are essential to human-objects interactions, can only be appreciated using the sense of touch. For instance, the sensations of heat, moist, grip, stickiness, hardness, etc. cannot be assessed using vision.

In addition, tactile illusions exist and some visual illusions also appear to be tactile illusions (Révész, 1950). Tactile perceptions can sometimes be influenced by visual perceptions. For instance, the haptic perception of weight of an object can be influenced and misled by its appearance of size or density. However, holding the object will end this visual illusion. Hatwell and Gentaz (2003) found that in general tactile perceptions induces fewer illusions than visual perceptions. In the context of quality control, in some cases visual illusion could be avoided with touch.

3. TACTILE DESCRIPTORS

Using tactile perception in a quality control starts with the right choice of descriptors in order to describe touch sensations.

3.1. Specificities of the tactile description

Descriptors found in the literature are usually related to specific types of product and material. They also depend on the language and culture of the controllers. Sensotact (Crochemore, Vergneault, & Nesa, 2003) is a reference method introduced by Renault in order to describe the tactile perceptions of vehicle interiors. It employs ten descriptors distributed following the exploration mode (translated from French: *hardness*, *responsiveness*, *memory effect*, *sticky*, *fibrous*, *relief*, *scratchy*, *blocking*, *slippery* and *thermal*). Considering textile products only, Issa (Issa, Schacher, & Adolphe, 2005) proposed six invariant descriptors common to French and English languages (*flexible/rigid*, *falling*, *thin/thick*, *soft*, *creasable*, *responsive*). In the same field of application, Picard (Picard, Dacremont, Valentin, & Giboreau, 2003) found five pairs of descriptors (*soft/rough*, *thin/thick*, *mellow/hard*, *smooth/rough*, *pleasant/harsh*), from a set of twenty-four and Sola (2007) listed fourteen descriptors. Considering paper sheets, Summers (Summers, Irwin, & Brady, 2007) reduced it to two descriptors (*rough* and *stiff*). In the field of packaging, Dumenil-Lefevre (Dumenil-Lefebvre, 2006) suggested two groups of descriptors, respectively for the tactile description of ground-glass (from French: *sticky*, *rough*, *granular*, *slippery*, *cool*, *greasy*) and a multi-material group, including

plastic, cardboard, etc. (from French: *adherent, sticky, supple, elastic, markable, rough, granular, slippery, scratchable, cool*).

The descriptors listed in the different studies are hence very different from one product to another, as well as from one type of material to another. While some descriptors are common across different materials (for instance, *soft* that is used similarly for wood, fabric, leather, ceramic, some others are very specific to one type of material. For example, descriptors like *furry, fuzzy, fluffy*, etc. are mainly used for the description of fabric.

Translations from one language to another can also make these lists change, because the correspondence between the meanings of translated words is not always complete, or can be expressed with several different words, following the context. For example, *frais* in French could be translated into *fresh* or *cool*. Some words also do not have any translation, which is the case of *bouchardé* in French which comes from a tool: the "boucharde", which is originally used to print marks on concrete (Sola, 2007). Differences between cultures, often represented by the difference in language, can sometimes induce a difference in the meaning of the same words, for example a sensation of *cold* might not be perceived the same way by people living in cold or hot areas.

3.2. Usual tactile descriptors

As a result of the search for tactile descriptors performed across the literature, a full list of almost 200 descriptors is shown below, in English, in alphabetic order (Bassereau, 1995; Crochemore et al., 2003; Duchamp, Bassereau, Dubois, & Luong, 2002; Dumenil-Lefebvre, 2006; Giboreau et al., 2007; Issa et al., 2005; Philippe, Schacher, Adolphe, & Dacremont, 2004; Picard et al., 2003; Sola, 2007; Summers et al., 2007).

active; adaptable; adherent; adhesive; adjustable; advancing; aggressive; agreeable; arid; asperous; baby skin; bendable; bent; blocking; blunt; bonding; bristly; brittle; bulgy; bumpy; burning; choppy; cashmere; circular; clean; cling; clinging; clumpy; coarse; cold; compact; constrained; continuing; continuous; cool; cottony; creamy; creasable; curved; damp; dense; downy; dry; elastic; enjoyable; even; falling; feathery; fibroid; fibrous; firm; flat; flexible; floppy; flossy; flowing; fluffy; formable; fragile; freeing; freezing; fresh; frosty; furry; fuzzy; glacial; glistening; glossy; gluey; glutinous; gnarled; grainy; granular; grasping; greasy; gripping; gritty; hairless; hairy; hanging; hard; hard hairs; harsh; hateful; heavy; hot; humid; humpy; icy; inflexible; interrupted; knotted; leathery; light; lightweight; limp; lukewarm; lumpy; lustrous; lying down; maleable; markable; mellow; membrane; memory effect; moist; moist-free; mucous; natural; nervous; nonfibrous; obstructing; offensive; oily; peach skin; pellicle; pilous; planar; plastic; pleasant; pliable; pointed; polished; protruding; puffy; pulpy; raw; reactive; rebounding; reduced; reflecting; regular; relief; replying; resilient; resistant; respondent; responsive; resting; ribbed; rigid; robust; rough; round; rubbery; rude; rugged; sandy; satin; scarred; scratchable; scratchy; scuffable; shaggy; sharp; shiny; silky; skin; sleek; slender; slick; slimy; slippery; smooth; soaking; soapy; soft; solid; sparse; spongy; springy; sticky; stiff; straight; stretchable; strong; superficial; supple; swollen; synthetic; tacky; temperate; tender; thick; thin; tight; topping; tough; traceable; twisted; veined; velvety; viscous; warm; wet; wiry; wool.

3.3. Generic description of tactile feeling

The definition of generic and structured method and vocabulary enabling the description of tactile sensations is essential in the process of formalizing tactile quality controls. In previous research work, we demonstrated that it is possible to propose a reduced list of descriptors used in a context of visual quality control (Nathalie Baudet, 2012; Maire et al., 2013). Associated with an intensity scale, this list groups all existing visual anomalies, and provides a methodology in order to quantify them, and to reduce operator-related variability. Similarly, we hereby propose a way to describe tactile sensations in a reduced, generic and structured manner.

3.4. Classification

As exposed above, descriptors from the literature are usually given for specific types of products and materials. In addition, some studies have proposed different ways to group the descriptors following different axes. Crochemore (2003) and Dumenil-Lefevre (2006) hence suggested a classification by exploration mode (orthogonal, tangential or static). Klatzky and Lederman (2009) revealed links between the type of exploration involved and characteristics of the surface. In the same study, links between stimuli of tactile sensations and surface properties were also highlighted, throughout the notions of texture, thermal quality, compliance, weight (density and structure), geometric properties and orientation. On a different level, David (David, 1997; Sola, 2007) focused on the origins and meaning of the descriptors in order to propose a classification following three axes: source, effect and physical property. These axes highlight the semantic foundations of the descriptors and the links with the characteristics of a surface. Moreover, considering the different sensitivity of each sensory receptor (De Boissieu, 2010; S.J. Lederman & Klatzky, 2009; Susan J.

Lederman & Klatzky, 1987), a correspondence could be established between these descriptors and tactile perceptions.

Thus, from the literature, several classification methods can be considered. Among them, one can list:

- The exploration mode,
- The type of sensory receptors involved,
- The materials associated with the descriptor,
- The source, effect and physical property axes,
- If it is a hedonic sensation,
- The semantic distance.

The first three methods can be used to give a description of the way stimuli are obtained, but do not enable to sort out the descriptors. On the other hand, the last three methods provide a way to categorize them following their own meaning. These methods are investigated in the following sections, and a new way to represent the sensations is proposed.

3.5. Source, effect and physical property axes

The source axis refers to a perception (sensation complemented with knowledge and experience), e.g. *oily* refers to oil. One needs to have the knowledge of what oil is to understand what an oily sensation is.

The effect axis refers to sensations, which involve a judgement from the evaluator. These sensations are hence subjective, or even hedonic.

Finally, the physical property axis refers to a non-hedonic sensation, which can be directly measured.

3.6. Semantic distance

Relations of synonyms and antonyms across the usual tactile descriptors were used in order to draw semantic correspondence between the descriptors. A graphic representation is proposed, and shown in Figure 2. It has been constructed by generating links between the descriptors, according to the relations of synonyms and antonyms. It was then obtained using a graphical tool¹ and the OpenOrd method (Martin, Brown, Klavans, & Boyack, 2011) in order to group the descriptors based on their semantic distance. This method involves the computation of the distance between nodes (descriptors), by minimizing a formula containing attractive and repulsive terms. The minimization is performed across the nodes and enables to gather elements with strong relations and spread the ones with weak relations. In addition, hedonic elements were set apart and eliminated.

¹ Gephi : Open graph visualisation platform, url: <https://gephi.org/>

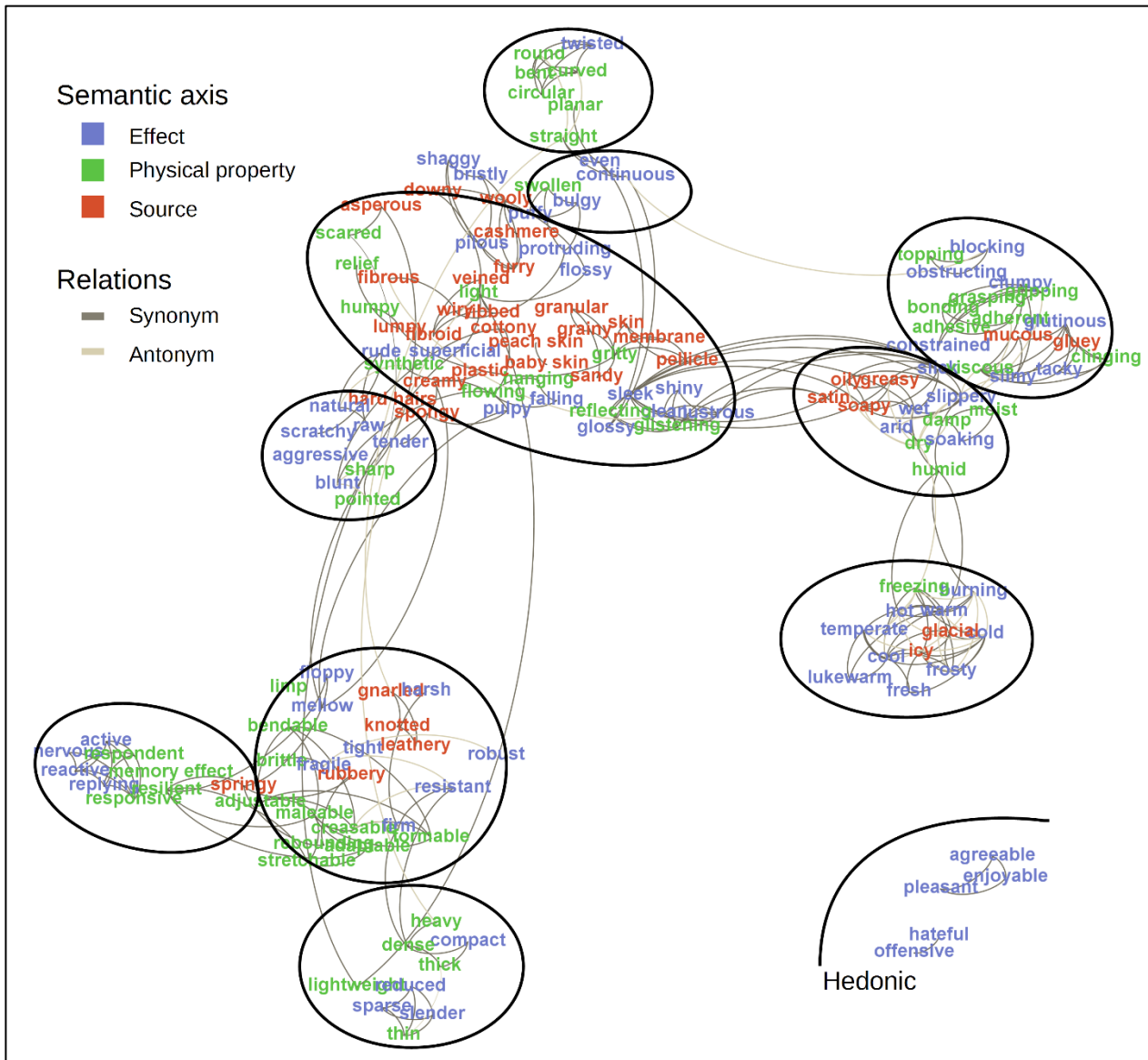


Figure 2: Graph of a subset of tactile descriptors organized following the semantic distance

3.7. Elementary tactile sensations

Based on the classification previously performed, and by adjusting groups following what had been proposed in the literature, ten categories of sensations have been identified and listed in Table 1. Each category groups neighbor descriptors of Figure 2. For example, *grip* groups *slippery*, *slick*, *adherent*, *grasping*, *blocking*, *sticky*, *adhesive*, etc. They refer to either local or global sensations. These elementary tactile sensations aim at describing all tactile sensations that can be perceived when performing diverse explorations on an object.

Table 1: Proposed categories of sensations and intensity scale, with integration of selected relevant descriptors

Elementary sensations	1	2	3	4	5
	Low intensity			High intensity	
Local sensations					
Grip (Adhérence)	slippery	slick	adherent	grasping adhesive	blocking sticky
Relief (relief)	polished sleek	smooth	gritty scarred	rough humpy	rude
Hardness (Dureté)	limp mellow	flexible	bendable formable	resistant firm	hard rigid stiff
Responsiveness (Réactivité)	memory effect	supple	replying resilient	responsive active	reactive nervous
Trace (trace)	dry arid	damp humid	moist viscous	slimy wet	soaking
Warmth (chaleur)	cold	cool fresh	temperate lukewarm	warm	hot
Pain (douleur)	tender	blunt	scratchy	pointed	sharp aggressive
Global sensations					
Weight (poids)	light thin lightweight	reduced slender	sparse	thick puffy	heavy dense massive
Consistency (uniformité)	interrupted	protruding	bulgy	regular	even continuous
Shape (forme)	straight flat planar	curved	bent	twisted	round circular

Each sensation can then be evaluated following its intensity, from weak to strong. This grid being generic, because of the diversity of the descriptors origins, it can be used across all materials and types of surfaces. Indeed, the denomination of the categories is not related to specific types of materials or objects, and do not refer to source references. Moreover, they do not derive from hedonic references and thus, the notion of pleasure is not involved in the evaluation of the tactile sensations.

The most relevant descriptors were hierarchically placed in this grid in order to give an adapted vocabulary to the different levels of intensity of each sensation. Considering the type of sensation they represent, these selected descriptors can only be found in a single category. Descriptors from the literature that could potentially be placed in several of these categories (that have hence too many synonym relations with descriptors coming from different categories) were set apart from this minimal list.

Indeed, similarly to the way the selection of descriptors is performed in sensory analysis, these elementary sensations have been constructed to be relevant, precise, discriminant, exhaustive and independent one from another. Then, the principle of this grid is to enable a generic and structured description of tactile sensations obtained from interacting with the surface of an object. Therefore a description of any tactile descriptor could be given thanks to a combination of specific levels of intensity of some elementary sensations.

In addition, for each category of sensation, it is possible to define the types of stimulus involved, as well as the preferential exploratory movements and body zone to be used (Table 2)

Table 2: Corresponding exploratory movements, sensory receptors and preferential body zone

Elementary Sensation	Type of stimulus	Exploratory movement	Preferential body zone
Local sensations			
Grip	Stretching	tangential, orthogonal	Fingers
Relief	Vibrations	tangential	Fingers, palm or nails
Hardness	Pressure	orthogonal	Finger
Responsiveness	Pressure	orthogonal	Finger
Trace	Persistence	tangential, orthogonal	Finger
Warmth	Temperature variation	static	Hand, palm
Pain	Extreme pressure, temperature or stretching	orthogonal, static	Finger
Global sensations			
Weight	Pressure, arm position	lifting	Hand & arm
Consistency	Stretching, pressure, vibrations,	tangential	Hand & arm
Shape	Stretching, pressure, vibrations,	enveloping	Hand & arm

4. METHOD VALIDATION

In order to verify the validity of the proposed method it is necessary to demonstrate its exhaustiveness in terms of types of sensations and categories of materials, and elaborate an evaluation plan. These two steps are investigated below and clues of the evaluation are proposed.

4.1. Method exhaustiveness

First, the proposed method for the description of tactile sensations has to be validated in terms of exhaustiveness of the vocabulary used in order to construct it. Even if at first descriptors were extracted from the literature, searching synonyms has enabled the emergence of a certain number of additional words then taken into account in the complete list shown above. Exhaustiveness being usually hardly reachable, instead it is reasonable to demonstrate the sufficiency of the method.

As indicated before, this method has to provide a complete description of each descriptor related to touch. Some descriptors, that were not included in Table 1, were tested and some examples are proposed below. For instance, the term *soft* is not listed in our grid but can be defined by four elementary sensations: grip, relief, hardness and pain (respectively *slick*, *smooth*, *mellow* and *tender*). *Oily* can be defined by two elementary sensations: grip and trace (respectively *slippery* and *viscous*). *Peach skin* can be defined by six elementary sensations: *grip*, *relief*, *trace*, *warmth*, *pain* and *consistency* (respectively *slick*, *smooth*, *damp*, *warm*, *tender* and *regular*). Therefore, the proposed method effectively provides a generic, structured and complete description of the tactile sensations for each one of the listed usual descriptors.

4.2. Future work

Further evaluation would include panel and expert testing.

Panel testing: Some objects would be given to a panel of operators who would be asked to provide a description of their tactile sensations, with and without the grid.

Expert testing: The same objects would be given to a number of experts who would give a precise description of the intensity level of each tactile sensations obtained from touching the objects. The way they interact with the object would also be recorded.

These experiments would provide a number of relevant results. First the variability of the description with and without the proposed grid could be compared. The hierarchical position of each chosen descriptor in the grid could be verified using expert knowledge. Expert and panel evaluations could be compared in order to check the suitability of the wording used in the sensation grid for non-expert operators. Finally, the proposed preferential exploratory movements and body zones could be verified from the way experts interact with objects.

5. CONCEPTUAL REPRESENTATION

The conceptualization of knowledge is usually a very suitable approach when aiming at the formalization of a domain of interest. In particular, ontologies are especially relevant when dealing with semantic knowledge (Zanni-Merk, 2014). The use of formal models, such as ontologies, is essential for the development of a smart system to try and automate the whole process. However, very few studies have proposed ontologies directly related to the description of human perceptions, or more specifically to perceived quality. Some examples of ontologies developed in other domains show their interest and potential for this kind of applications (Gartiser, Zanni-Merk, Boullosa, & Casali, 2014; Milton, Shadbolt, Cottam, & Hammersley, 1999; Zanni-Merk, Marc-Zwecker, Wemmert, & Bertrand de Beuvron, 2015). One rare example of similar domain ontology has been proposed by Myrgioti (2013), but this study focused on software development for haptic interfaces.

5.1. High level conceptual model

The first step in the construction of a conceptual domain representation is the use of a high-level ontology in order to form the "skeleton" of the structure. There are multiple upper-level ontologies, but we will focus here on the Semantic Sensor Network (SSN) ontology (Compton et al., 2012) that has been identified as particularly relevant considering the context of the study and the opportunities of further development.

Compton et al. (2012) introduced the SSN ontology in order to describe sensors and observations. Besides the perspectives of future development of the present study around the system of sensors, the SSN ontology proposes a way to conceptualize the links between properties, sensors and observation. Figure 3 is a reduced version of the stimulus-sensor-observation pattern proposed by (Compton et al., 2012), focused only on the entities relevant to this study. Indeed, this representation gathers the concepts necessary for the tactile perception to be formed, and structures them in a way it enables to integrate knowledge about this domain.

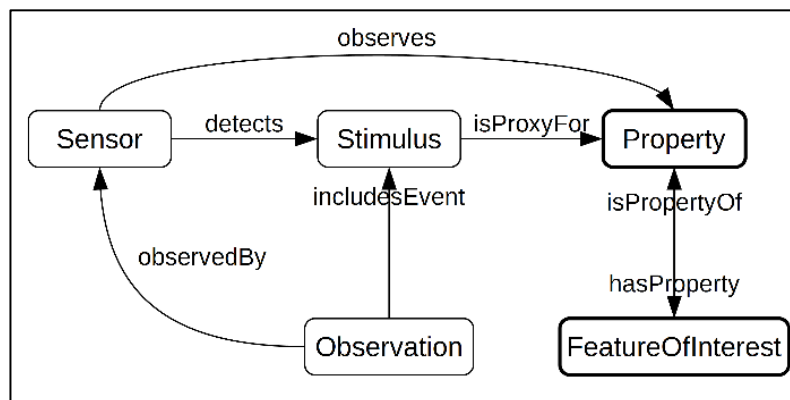


Figure 3: Extract of interest of the stimulus-sensor-observation pattern from (Compton et al., 2012)

5.2. Alignment to the description of tactile sensations

The level of the concepts defined by Compton et al. (2012) being high enough, they can be aligned to the domain of tactile sensations. Considering the description of these sensations only, the concepts of Property and FeatureOfInterest can be aligned as follows.

Property is an object/surface characteristic. It is observable by a sensor through a stimulus. Properties are here the elements of the generic description proposed in this paper, i.e. the elementary tactile sensations.

FeatureOfInterest is an abstraction of a real-world phenomenon. Features of interest are here the descriptors commonly used in order to describe a tactile sensation.

Moreover, relations between these entities can be derived from the knowledge of experts, and used in order to give meaning to sensor measurements about tactile perceptions.

In addition to this structure, contextual information as well as expert experience could be integrated in an enlarged knowledge-based framework as introduced by Zanni-Merk (2015).

6. CONCLUSION

This paper proposed a generic and structured way to describe tactile sensations. The tactile perception process was presented, along with the specificities of the sense of touch, in particular by analogy with the sense of vision. Usual descriptors of tactile sensations and perceptions were listed from the literature, and sorted following several methods, including the use of semantics. Categories of sensations were extracted in order to propose a generic and structured description of tactile sensations that is minimal yet complete. A validation plan was provided, aiming at evaluating the variability reduction brought by the method, and suggesting possible improvements to the grid. Finally, a conceptual representation of the tactile description problem was introduced, based on the ontology principle.

This work sets the basis for the formalization of tactile quality control, which would provide a generic method for the evaluation of tactile sensations in a production context. Eventually, this method would greatly reduce control variability related to operators' subjectivity and the current lack of structure, as well as enable future automation of this type of control. Our future works will be focused on the logical formalization of these descriptors with ontologies, as outlined in Section 5, as the basis for a smart software system intended to automate, as much as possible, the tactile quality control.

ACKNOWLEDGEMENT

This work has been done within a thesis project funded by the French technological research association (ANRT) as well as the company INEVA². It is realized in collaboration between three parties which are all thanked: the company INEVA, the INSA de Strasbourg and the University of Savoie Mont Blanc.

REFERENCES

- Bassereau, J. F. (1995). *Cahier des charges qualitatif design, élaboration par le mécanisme des sens*. École nationale supérieure d'arts et métiers. Retrieved from <https://books.google.fr/books?id=2K3QMgEACAAJ>
- Baudet, N. (2012). *Maîtrise de la qualité visuelle des produits - Formalisation du processus d'expertise et proposition d'une approche robuste de contrôle visuel humain*. Université de Grenoble.
- Baudet, N., Pillet, M., & Maire, J. L. (2011). Visual inspection of products : a comparison of the methods used to evaluate surface anomalies, 1–8. <http://doi.org/10.1051/ijmqe/2011006>
- Baudet, N., Pillet, M., & Maire, J.-L. (2011). Visual inspection of products: a comparison of the methods used to evaluate surface anomalies. *International Journal of Metrology and Quality Engineering, Volume 2*(Number 1), pp. 31–38. <http://doi.org/10.1051/ijmqe/2011006>
- Compton, M., Barnaghi, P., Bermudez, L., García-Castro, R., Corcho, O., Cox, S., ... Taylor, K. (2012). The SSN ontology

² <http://www.ineva.fr>

- of the W3C semantic sensor network incubator group. *Journal of Web Semantics*, 17, 25–32. <http://doi.org/10.1016/j.websem.2012.05.003>
- Crochemore, S., Vergneault, C., & Nesa, D. (2003). A new reference frame for tactile perceptions: Sensotact. *5th Rose Mary Pangborn, Boston MA, USA*, 20–24.
- David, S. (1997). Représentations sensorielles et marques de la personne : contrastes entre olfaction et audition. *Catégorisation et Cognition: De La Perception Au Discours*. D. Dubois. Paris, Kimé, 211–242.
- De Boissieu, F. (2010). *Toucher artificiel à base d'un microcapteur d'effort : traitement du signal et des informations associées*. Université de Grenoble.
- De Rossi, D., & Scilingo, E. P. (2006). Skin-like sensor arrays. *Encyclopedia of Sensors*, 10, 1–22.
- Désage, S.-F., Pitard, G., Pillet, M., Favrelière, H., Maire, J.-L., Frelin, F., ... Le Goïc, G. (2015). Syntactic texture and perception for a new generic visual anomalies classification, (JUNE), 953406. <http://doi.org/10.1117/12.2182819>
- Duchamp, R., Bassereau, J.-F., Dubois, P., & Luong, T. H. L. (2002). Procédé et dispositif de contrôle sensoriel de la surface extérieure d'un objet. France.
- Dumenil-Lefebvre, A. (2006). *Integration Des Aspects Sensoriels Dans La Conception Des Emballages En Verre : Mise Au Point D'Un Instrument Methodologique A Partir Des Techniques D'Evaluation Sensorielle*. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers. Retrieved from <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00001774/ft/>
- Eterradossi, O. (2011). *Une approche cartographique des propriétés d'aspect des matériaux*. Université Jean Monnet.
- Gartiser, N., Zanni-Merk, C., Boullosa, L., & Casali, A. (2014). A semantic layered architecture for analysis and diagnosis of SME. *Procedia - Procedia Computer Science*, 35, 1165–1174. <http://doi.org/10.1016/j.procs.2014.08.212>
- Giboreau, A., Dacremont, C., Egoroff, C., Guerrand, S., Urdapilleta, I., Candel, D., & Dubois, D. (2007). Defining sensory descriptors: Towards writing guidelines based on terminology. *Food Quality and Preference*, 18(2), 265–274. <http://doi.org/10.1016/j.foodqual.2005.12.003>
- Guerra, A.-S. (2008). *Métrologie sensorielle dans le cadre du contrôle qualité visuel*. Université de Savoie.
- Hatwell, Y., Streri, A., & Gentaz, E. (2003). *Touch for Knowing. Advances in Consciousness Research*. Retrieved from http://books.google.nl/books?hl=en&lr=&id=ICH7RfejyWQC&oi=fnd&pg=PA105&dq=Haptic+integration+of+planar+size+with&ots=Es2B_ehRhy&sig=qt2jswvolwDIBcDINOzcJ-qm1kM
- Heller, M. A. (1989a). Picture and pattern perception in the sighted and the blind: the advantage of the late blind. *Perception*, 18(3), 379–389.
- Heller, M. A. (1989b). Texture perception in sighted and blind observers. *Perception & Psychophysics*, 45(1), 49–54. <http://doi.org/10.3758/BF03208032>
- Hollins, M., & Risner, S. R. (2000). Evidence for the duplex theory of tactile texture perception. *Perception & Psychophysics*, 62(4), 695–705. <http://doi.org/10.3758/BF03206916>
- Issa, M., Schacher, L., & Adolphe, D. C. (2005). Invariant attributes in the tactile characterization of fabrics. In *Proceeding, Fiber Society Spring Conference*.
- Klatzky, R. L., Lederman, S. J., & Metzger, V. a. (1985). Identifying objects by touch: an “expert system”. *Perception & Psychophysics*, 37(4), 299–302. <http://doi.org/10.3758/BF03211351>
- Lebaz, S. (2011). Perception haptique d'images aux traits en relief par des individus aveugles et voyants., 1–130.
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1987). Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive Psychology*, 19(3), 342–368. [http://doi.org/10.1016/0010-0285\(87\)90008-9](http://doi.org/10.1016/0010-0285(87)90008-9)
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (2009). Haptic perception: A tutorial. *Attention, Perception & Psychophysics*, 71(3), 1439–1459. <http://doi.org/10.3758/APP.71.7.1439>
- Lederman, S. J., Klatzky, R. L., Chataway, C., & Summers, C. D. (1990). Visual mediation and the haptic recognition of two-dimensional pictures of common objects. *Perception & Psychophysics*. <http://doi.org/10.3758/BF03208164>
- Maire, J. L., Pillet, M., & Baudet, N. (2013). Measurement of the perceived quality of a product - Characterization of aesthetic anomalies. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 4(2), 63–69.
- Martin, S., Brown, W. M., Klavans, R., & Boyack, K. W. (2011). OpenOrd: an open-source toolbox for large graph layout. *Proc. SPIE*, 7868(JANUARY 2011), 786806–786811. <http://doi.org/10.1117/12.871402>
- Milton, N. R., Shadbolt, N., Cottam, H., & Hammersley, M. (1999). Towards a knowledge technology for knowledge management. *International Journal of Human-Computer Studies*, 51(3), 615–641.

<http://doi.org/10.1006/ijhc.1999.0278>

- Myrgioti, E., Bassiliades, N., & Miliou, A. (2013). Bridging the HASM: An OWL ontology for modeling the information pathways in haptic interfaces software. *Expert Systems with Applications*, 40(4), 1358–1371. <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.053>
- Philippe, F., Schacher, L., Adolphe, D. C., & Dacremont, C. (2004). Tactile feeling: Sensory analysis applied to textile goods. *Textile Research Journal*, 74(12), 1066–1072. <http://doi.org/10.1177/004051750407401207>
- Picard, D., Dacremont, C., Valentin, D., & Giboreau, A. (2003). Perceptual dimensions of tactile textures. *Acta Psychologica*, 114(2), 165–184. <http://doi.org/10.1016/j.actpsy.2003.08.001>
- Révész, G. (1950). *Psychology and art of the blind*. (Longmans, Ed.). Oxford: Longmans, Green.
- Simonnet, M., Guinard, J.-Y., & Tisseau, J. (2005). Les modalités tactiles et auditives pour une représentation spatiale non visuelle : une application en voile pour les marins non voyants. *XIIème Journées Du Groupe de Travail En Animation et Simulation*, 1–10.
- Sola, C. (2007). Y a pas de mots pour le dire, il faut sentir : Décrire et dénommer les happerceptions professionnelles. *Terrain*, (49).
- Summers, I. R., Irwin, R. J., & Brady, A. C. (2007). Haptic discrimination of paper. In *Human Haptic Perception: Basics and Applications* (pp. 525–535). Basel: Birkhäuser Basel. http://doi.org/10.1007/978-3-7643-7612-3_44
- University of Washington. (2009). Chapter 10 the Somatosensory System (pp. 58–67). Retrieved from <http://courses.washington.edu/psych333/coursepack.shtml>
- Xie, X. (2008). A review of recent advances in surface defect detection using texture analysis techniques. ... *Letters on Computer Vision and Image Analysis*, 7(3), 1–22. <http://doi.org/10.5565/rev/elcvia.268>
- Zanni-Merk, C. (2014). *Knowledge Technologies for Problem Solving in Engineering*. Université de Strasbourg.
- Zanni-Merk, C. (2015). KREM : A Generic Knowledge-Based Framework for Problem Solving in Engineering Proposal and Case Studies. In *Keod* (pp. 381–388).
- Zanni-Merk, C., Marc-Zwecker, S., Wemmert, C., & Bertrand de Beuvron, F. de. (2015). A Layered Architecture for a Fuzzy Semantic Approach for Satellite Image Analysis. *International Journal of Knowledge and Systems Science*, 6(2), 31–56. <http://doi.org/10.4018/IJKSS.2015040103>