



HAL
open science

Maîtrise de la qualité haptique des produits : Formalisation du contrôle haptique et proposition d'une méthodologie de mise en oeuvre

Bruno Albert

► To cite this version:

Bruno Albert. Maîtrise de la qualité haptique des produits : Formalisation du contrôle haptique et proposition d'une méthodologie de mise en oeuvre. Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain. Université Grenoble Alpes, 2019. Français. NNT : 2019GREAA001 . tel-03548217

HAL Id: tel-03548217

<https://theses.hal.science/tel-03548217>

Submitted on 29 Jan 2022

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.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE LA COMMUNAUTÉ UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Sciences pour l'Ingénieur**

Arrêtée ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Bruno ALBERT

Thèse dirigée par **Maurice PILLET** et **Cecilia ZANNI-MERK**
et codirigée par **Jean-Luc MAIRE** et **François DE BERTRAND DE BEU-
VRON**

préparée au laboratoire **SYMME** (Systèmes et Matériaux pour la Mécatro-
nique) et au laboratoire **ICube** (Sciences de l'ingénieur, de l'informatique et
de l'imagerie)

dans l'école doctorale **SISEO** (Sciences et Ingénierie des Systèmes, de l'En-
vironnement et des Organisations)

Maîtrise de la qualité haptique des produits

Formalisation du contrôle haptique et proposition
d'une méthodologie de mise en œuvre

Thèse soutenue publiquement le **15 mars 2019**,
devant le jury composé de :

M. Davy MONTICOLO

Maître de conférences, HDR, ERPI, Université de Lorraine, **Rapporteur**

M. Améziane AOUSSAT

Professeur, LCPI, ENSAM Paris, **Rapporteur**

Mme. Claudia FRYDMAN

Professeur, LIS, Université Aix-Marseille, **Présidente**

M. Julien CHARRIER

Chargé d'affaire, société INEVA, **Examineur entreprise**

M. Maurice PILLET

Professeur, SYMME, Université Savoie Mont-Blanc, **Directeur de thèse**

Mme. Cecilia ZANNI-MERK

Professeur, LITIS, INSA de Rouen, **Co-Directrice de thèse**

M. Jean-Luc MAIRE

Maître de conférences, HDR, SYMME, Université Savoie Mont-Blanc,
Co-Encadrant de thèse

M. François DE BERTRAND DE BEUVRON

Maître de conférences, ICube, INSA de Strasbourg, **Co-Encadrant de thèse**



Cette thèse de doctorat a été réalisée au sein de :

Société INEVA

14 rue du Girlenhirsch
67400 Illkirch-Graffenstaden

Laboratoire SYMME

Université Savoie Mont Blanc
7 Chemin de Bellevue
74940, Annecy-le-Vieux

Laboratoire ICube

Université de Strasbourg, équipe SDC
300 Boulevard Sébastien Brant
67400 Illkirch-Graffenstaden

*À ma fille Candice,
À ma famille*

Remerciements

Je souhaite remercier l'ensemble des personnes qui, par leur aide, leur contribution ou encore leurs encouragements, m'ont donné la possibilité de réaliser ce projet de recherche, très riche et enrichissant sur les plans personnels et professionnels, dans les meilleures conditions possibles. J'ai eu beaucoup de plaisir à travailler avec chacun de vous.

Merci à l'ensemble de mes encadrants. Vous avez su me guider, m'aider, me corriger s'il le fallait, et de manière générale m'apporter votre expertise respective pour que les contributions scientifiques proposées soient les plus abouties et les plus adaptées aux problématiques rencontrées dans ce domaine. Bien qu'un encadrement à 6 personnes de 3 entités différentes ait parfois nécessité un peu de jonglage dans la gestion des échanges d'information, du partage des résultats et des déplacements, cette gymnastique a été grandement positive. Elle a permis de renforcer la qualité des productions et d'apporter un questionnement à point de vue multiple qui, je le crois, a été bénéfique au développement de la thèse.

Merci à Christophe et Julien de m'avoir donné la chance de mener ce projet dans des conditions de travail et d'accompagnement idéales. Merci pour la confiance que vous m'avez accordée, aussi bien dans l'autonomie de la conduite de la thèse que dans l'opportunité offerte de poursuivre les développements et d'aller plus loin dans leurs applications. Merci pour nos échanges et cette collaboration au cours de laquelle j'ai beaucoup appris, aussi bien concernant les aspects du contrôle qualité, de la gestion de projet ou encore du développement technique.

Merci à Jean-Luc et Maurice de m'avoir accompagné et d'avoir dirigé cette thèse de la meilleure des manières. Vos précieux conseils ont su orienter mes choix vers des solutions innovantes, efficaces et concrètes, guidées par votre expertise sur les problématiques de contrôle sensoriel. Merci pour votre aide dans la recherche et la conduite du cas d'étude. Merci Jean-Luc pour ton perfectionnisme, aussi bien sur les méthodes proposées que dans la rédaction. Merci également pour les moments conviviaux partagés à Annecy, où travail et détente se rejoignaient parfois.

Merci à Cecilia et François dont l'expertise en gestion des connaissances a permis d'insuffler une orientation inédite aux éléments proposés dans ce projet. Merci pour nos échanges fructueux, aussi bien en théorie qu'en pratique, dans le cadre de la construction du système de gestion des connaissances. Par ailleurs, merci Cecilia de m'avoir suivi au cours de mes études supérieures, depuis l'INSA jusqu'à l'aboutissement de cette thèse, en passant par l'opportunité offerte de réaliser un stage à Cardiff, et d'avoir ensuite mis à ma connaissance le projet de recherche proposé par INEVA ! Merci pour les bons moments passés en conférence ou en séminaire.

Merci à Piaget de m'avoir permis de mettre en œuvre et de valider les éléments proposés au cours de la thèse dans un cadre aussi prestigieux. Merci notamment à Nicolas Derobert et Yohan Ruiz, ainsi qu'à l'ensemble des participants de l'étude réalisée.

Merci aux doctorants et aux personnels du laboratoire SYMME de m'avoir si bien intégré en considérant un temps sur place se limitant à une semaine mensuelle. Merci à tous les doctorants côtoyés, pour les échanges scientifiques toujours très intéressants, et parfois les échanges un peu moins scientifiques mais toujours conviviaux autour d'un jeu de carte, d'une table de ping-pong, lors d'une course à pied ou encore sur un mur d'escalade ! Merci à Françoise et Nassika pour votre aide pour les questions pratiques et administratives, toujours avec la bonne humeur ! Merci à Gilles et Simon pour la transmission du flambeau des recherches dans le contrôle de la qualité perçue. Merci à Thomas pour les collaborations fructueuses entre visuel et haptique, mais également pour cette belle amitié créée au fil de nos thèses et pour longtemps encore je l'espère !

Merci aux doctorants et personnels de l'équipe SDC du laboratoire ICube. Merci à Ali et Pei pour les échanges toujours instructifs, ainsi que les bons moments partagés lors des différents séminaires et conférences. Merci à Nicolas pour ton aide au labo. Merci à Anne-Sophie et Christelle pour la gestion administrative du projet côté ICube.

Merci à l'ensemble des collègues d'INEVA. En particulier aux développeurs qui ont contribué à la programmation de l'outil logiciel : Jeff, Raphaël, Nicolas, ainsi que Laurine. De manière générale, un grand merci aux collègues ayant participé à m'aider ou me former, m'apportant bien souvent leur savoir-faire, aussi bien en contrôle qualité qu'en mécanique, en électrotechnique ou encore en câblage. Merci également aux partenaires de course à Pied : Lionel, Olivier, Christophe et parfois même Julien ! Ainsi qu'aux squasheurs : Josselin, Jeff, Olivier. L'ambiance motivante, les projets intéressants et les challenges à relever sont autant de choses qui ont fait de cette thèse CIFRE à INEVA une expérience très agréable et enrichissante.

Merci aux amis et aux couz (que je ne citerai pas au risque d'en oublier), pour les soirées mémorables et les moments de détente qui comptent aussi beaucoup, pour être plus efficace ensuite.

Un immense merci à ma famille et belle-famille qui m'a toujours soutenu dans mes démarches, aidé à affronter les épreuves et poussé pour faire de ce projet une réussite. Merci à mes grands-parents, présents ou dans le souvenir. Merci à mes parents Liliane et Pierre d'avoir toujours cru en moi, de m'avoir aidé à trouver mon chemin, aussi bien à Cardiff qu'à Strasbourg, et d'avoir contribué à ce que je poursuive la voie qui me plaît et me permet et de m'épanouir, dans la vie professionnelle et personnelle. Merci à Danielle et Jean-Paul mes beaux-parents de m'avoir soutenu au quotidien et considéré comme leur fils. Bien-sûr, merci pour la préparation de tous les bons repas ! Merci à Marc et Déborah mon frère et ma belle-sœur, pour être toujours présents et à mes côtés, et d'autant plus dans les moments importants.

À Natacha, pour ton soutien sans faille de tous les jours, pour la motivation que tu m'as toujours apportée, pour ta patience et ta compréhension, pour notre amour et notre magnifique Candice, je ne pourrai jamais assez te remercier.

Table des matières

Table des matières	iv
Introduction générale	1
0.1 Préambule	2
0.2 Cadre et enjeux des recherches	3
0.3 Problématique et démarche de recherche	5
0.4 Structure du document	6
1 Le contrôle haptique des produits	9
1.1 Quelques observations sur le contrôle haptique industriel	10
1.1.1 Observations générales	10
1.1.2 Observations sur le cas PIAGET	12
1.1.3 Synthèse des observations	14
1.2 Le processus de perception humaine dans le cadre du contrôle sensoriel	15
1.3 De l'exploration aux stimuli	16
1.3.1 Les modes d'exploration du toucher	16
1.3.2 Les récepteurs et effecteurs sensoriels du toucher	17
1.4 Les sensations et leur description	19
1.4.1 La sémantique dans le domaine sensoriel	19
1.4.2 La description des sensations haptiques dans la littérature	22
1.4.3 Méthodes de catégorisation de la description	24
1.5 L'interprétation des sensations pour la perception des anomalies	26
1.5.1 La perception sensorielle des produits	26
1.5.2 Parallèles entre contrôle visuel et contrôle haptique	27
1.5.3 Perception des anomalies haptiques	28
1.6 De l'anomalie au défaut	29
1.7 Conclusion	30
2 Définition et formalisation des connaissances haptiques	33
2.1 Introduction	34
2.2 Un modèle de description des sensations haptiques	36
2.2.1 Analyse de sources sémantiques	38
2.2.2 Pré-filtrage par pertinence et précision	41
2.2.3 Clustering : regroupement sémantique	44
2.2.4 Post-filtrage par indépendance et discriminance	47
2.2.5 Sensations haptiques élémentaires	48
2.2.6 Critères pour l'exploration manuelle des surfaces associés aux sensations élémentaires	51

2.2.7	Quantification de la description sensorielle	52
2.2.8	Modèle de description et classification	54
2.2.9	Synthèse du modèle obtenu	58
2.3	Validation du processus de formalisation	59
2.3.1	Généricité du modèle	59
2.3.2	Indépendance des catégories de sensation	60
2.3.3	Robustesse de la méthode	61
2.3.4	Cohérence et intérêt par rapport aux méthodes existantes	64
2.4	Conclusion	67
3	Organisation et gestion des connaissances haptiques	69
3.1	Introduction	70
3.2	État des lieux de l'organisation des connaissances pour le contrôle haptique	71
3.2.1	Les techniques d'organisation des connaissances	71
3.2.2	La structuration ontologique des connaissances	73
3.2.3	Les systèmes existants pour la gestion des connaissances	77
3.3	Une représentation ontologique des connaissances du contrôle sensoriel .	80
3.3.1	Architecture ontologique générale	80
3.3.2	Ontologie de contexte d'application	82
3.3.3	Ontologie de perception sensorielle haptique	84
3.3.4	Ontologie d'instrumentation	90
3.3.5	Autres ontologies de domaine implémentées	91
3.3.6	Validation de la représentation ontologique	92
3.4	Un système pour la gestion évolutive et contextuelle des connaissances . .	94
3.4.1	Schéma général de gestion des connaissances	94
3.4.2	Enrichissement et évolution de la base de connaissances	95
3.4.3	Gestion du contexte d'utilisation	97
3.4.4	Synthèse	98
3.5	Conclusion	99
4	Exploitation des connaissances haptiques pour le contrôle de la qualité des produits	101
4.1	Introduction	102
4.1.1	Contraintes et challenges pour le contrôle haptique des produits .	102
4.1.2	Une méthodologie pour la mise en place du contrôle haptique . .	105
4.2	Description formelle des spécifications de contrôle	107
4.2.1	Expression et analyse du vocabulaire	108
4.2.2	Formalisation de la description	110
4.2.3	Définition des anomalies	113
4.3	Protocoles de contrôle haptique	115
4.3.1	Sélection du mode d'exploration approprié	116
4.3.2	Analyse de l'influence de l'exploration sur l'intensité perçue . . .	116
4.3.3	Proposition d'une grille d'évaluation	122
4.4	Tolérances et référentiel de contrôle	126
4.4.1	Établissement des limites d'acceptabilité	127
4.4.2	Définition d'un référentiel	128
4.5	Application au contrôle manuel et validation des performances	129
4.5.1	Processus d'application du contrôle haptique	129

4.5.2	Synthèse des protocoles de contrôle	130
4.5.3	Utilisation des protocoles	130
4.5.4	Test de variabilité et améliorations observées	131
4.6	Conclusion	133
5	L’outil logiciel INSENSO pour aider à la mise en œuvre d’un contrôle hap-	135
	tique	
5.1	Introduction	136
5.2	Architecture de l’outil	136
5.2.1	Structure de la plate-forme logicielle	136
5.2.2	Les modules de l’outil INSENSO	139
5.2.3	Diagrammes de classe	140
5.3	Développement des modules	142
5.3.1	Construction et gestion des connaissances	142
5.3.2	Définition du contexte d’application d’un projet de contrôle	145
5.3.3	Définition des spécifications	147
5.4	Conclusion	152
	Conclusion générale et perspectives	153
6.1	Synthèse générale	154
6.2	Quelques extensions possibles à nos travaux	156
6.2.1	Extensions possibles pour la méthode de formalisation	156
6.2.2	Extensions possibles pour la méthodologie de contrôle	159
6.3	Extensions possibles pour l’instrumentation du contrôle de la qualité hap-	
	tique	161
6.3.1	Quelques capteurs et appareils pour la mesure des sensations élé-	
	mentaires	162
6.3.2	Essai d’instrumentation sans contact pour le cas d’étude	
	PIAGET	163
6.4	Perspectives : de nouvelles opportunités dans le domaine de la qualité	
	sensorielle	167
6.4.1	Résultats complémentaires dérivés de l’application de la métho-	
	dologie	167
6.4.2	Ouvertures à d’autres domaines	168
	Publications	I
	Bibliographie	IV
	Glossaire	XV
	Table des figures	XX
	Liste des tableaux	XXVI

Annexes	XXVII
A Détails des tests de variabilité du cas d'étude PIAGET	1
B Détails de la représentation ontologique	5
C Détails de la construction de protocoles de contrôle	11
D Détails de l'outil INSENSO	21
E Liste d'instruments pour la mesure des sensation haptiques	35
F Supports de présentation	39

Introduction générale

Sommaire

0.1	Préambule	2
0.2	Cadre et enjeux des recherches	3
0.3	Problématique et démarche de recherche	5
0.4	Structure du document	6

0.1 Préambule

La perception sensorielle est essentielle à l'être humain, à la fois pour découvrir son monde environnant, le comprendre, mais également pour interagir avec les éléments qui le composent. Elle est, de ce fait, très présente dans l'industrie où la qualité sensorielle des produits prend une place de plus en plus importante. Il s'agit notamment pour de nombreuses entreprises manufacturières de proposer des produits dont la qualité sensorielle est la plus aboutie possible, et cela en accord avec les attentes des clients préalablement identifiées. **La maîtrise de la mesure sensorielle est ainsi devenue primordiale dans le contrôle de la qualité des produits.**

Cette maîtrise s'avère néanmoins parfois très complexe à atteindre, en raison notamment de la multitude de phénomènes physiques et psychologiques impliqués lors du processus de perception humaine. Cette complexité, associée à l'enjeu majeur de l'atteinte de la qualité sensorielle pour les industriels, fait du contrôle de la qualité sensorielle un sujet de recherche très pertinent à explorer.

En phase de conception d'un produit, l'étude des préférences des consommateurs ciblés vise à donner des directions dans le choix des caractéristiques à privilégier pour ce produit (par exemple son matériau, l'état de sa surface, etc.). L'ensemble de ces caractéristiques doivent au final générer, pour le client, une perception souhaitée. Celle-ci implique différents sens pouvant être sollicités séparément ou ensemble. Le plus souvent, la première approche du client avec le produit est visuelle. Prendre en main ensuite le produit lui permet parfois de se faire une idée plus précise de sa qualité. Ainsi, avec la vue, le toucher peut avoir un rôle important dans la perception du client. Le rôle du toucher ne se limite toutefois pas à la relation du client avec le produit au moment de l'acte d'achat. Il est également présent en cours ou en fin de fabrication du produit, dès lors qu'il s'agit de contrôler sa conformité en touchant tout ou partie de sa surface.

Lors du contrôle sensoriel d'un produit, c'est en effet la perception des opérateurs, ou de systèmes instrumentés, qui intervient pour quantifier cette qualité et vérifier que celle-ci correspond effectivement aux attentes définies. On parle alors de **mesure sensorielle**. La variabilité de cette mesure doit évidemment être la plus faible possible. Si dans le domaine visuel cette variabilité est aujourd'hui relativement bien maîtrisée, ce n'est pas encore le cas dans le domaine du toucher. De nombreuses entreprises expriment aujourd'hui le besoin de disposer de moyens systématiques pour réaliser de manière plus efficace et plus efficiente le contrôle haptique (toucher statique et dynamique) de leurs produits, notamment lorsqu'il s'agit de produits à forte valeur ajoutée.

Au cours de ce projet de recherche, nous avons choisi d'explorer, en suivant une approche inédite, les connaissances associées à la perception au toucher avec l'objectif de **proposer des méthodes et des outils innovants dédiés au contrôle haptique des produits.**

0.2 Cadre et enjeux des recherches

Ce projet de thèse a été réalisé dans le cadre d'un partenariat entre l'entreprise **INEVA**¹, le laboratoire **SYMME**² (de l'Université Savoie Mont-Blanc) et le laboratoire **ICube**³ (de l'Université de Strasbourg). Nommé **feliCity**⁴, ce projet est issu d'une volonté commune des trois partenaires d'innover dans le domaine du contrôle de la qualité perçue des produits. Il a été co-financé par la société **INEVA** et l'ANRT⁵ (Association Nationale de Recherche et Technologie) dans un format de thèse CIFRE.

La figure 1 donne une vue résumée du contexte du projet en présentant l'ensemble des travaux déjà menés.

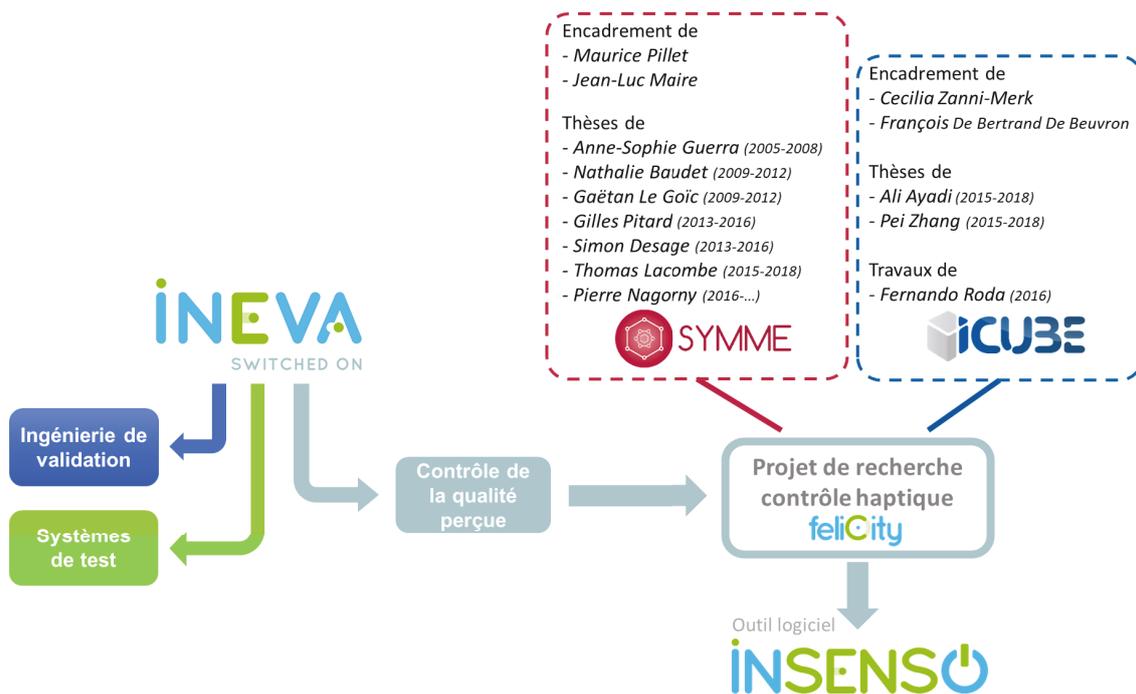


Figure 1 – Contexte des recherches de la thèse

Forte d'une grande expertise dans le domaine de la validation produit et de la conception de systèmes de test, la société **INEVA** a souhaité approfondir ses compétences dans le domaine du contrôle de la qualité perçue et élargir la gamme des services proposés à ses clients. L'axe *Qualité des Produits* du laboratoire **SYMME**, au travers des travaux de M. Pillet et J.-L. Maire, a un historique de plus de dix ans de recherches dans le domaine du contrôle d'aspect, avec au départ des approches sensorielles manuelles (Baudet, 2012; Guerra, 2008), puis en partie instrumentées (Desage, 2016; Le Goïc, 2012; Pi-

1. INEVA : <http://ineva.fr/fr/>

2. SYMME (Système et Matériaux pour la Mécatronique) : http://int.polytech.univ-smb.fr/index.php?id=symme_accueil

3. ICube, équipe SDC (Sciences des Données et des Connaissances) : <http://icube-sdc.unistra.fr/fr/>

4. **feliCity** est le nom de code donné à ce projet de recherche. Il symbolise l'objectif de formalisation du contrôle au toucher.

5. ANRT : <http://www.anrt.asso.fr/fr>

tard, 2016) et au final complètement automatisées (Lacombe, Pillet, & Favreliere, 2017; Nagorny et al., 2017). De son côté, l'équipe SDC (Sciences des Données et des Connaissances) du laboratoire **ICube**, avec les travaux de C. Zanni-Merk et de F. de Bertrand de Beuvron (Ayadi, Zanni-Merk, De Beuvron, & Krichen, 2017; Roda & Musulin, 2014; Zanni-Merk, 2014, 2015; Zanni-Merk, Marc-Zwecker, Wemmert, & de Bertrand de Beuvron, 2015; P. Zhang, Essaid, Zanni-Merk, & Cavallucci, 2017) a établi des passerelles entre différents domaines industriels (design inventif, diagnostic d'entreprise, biologie, etc.) et celui de la science des connaissances. C'est dans ce contexte que cette thèse a été réalisée, aux frontières des domaines du sensoriel, de la qualité industrielle et de l'organisation des connaissances. **Les travaux réalisés au cours ce projet s'inscrivent donc à la fois dans les disciplines du génie industriel et celles de l'informatique.**

Ce projet s'inscrit également dans le contexte d'un intérêt des industriels de plus en plus marqué pour l'amélioration de la qualité de la perception de leurs produits. La notion de qualité perçue est très présente, notamment dans les entreprises du secteur du luxe très concernées par ce sujet. Cela est particulièrement vrai en ce qui concerne la qualité des sensations perçues au toucher d'un produit. Une bonne estimation du potentiel des activités et des applications relatives au sens du toucher est donnée par les rapports de plusieurs organismes d'analyse de tendances. Ils évaluent la valeur de l'industrie haptique entre 2,8 et 19,55 milliards de dollars⁶ dans les années à venir. Qu'il s'agisse de sensations ressenties sur des surfaces passives (où les matériaux et l'état de surface permettent de générer les sensations) ou actives (où les sensations sont générées virtuellement à l'aide d'actionneurs), la qualité haptique d'un produit occupe un rôle très important dans la satisfaction des clients et l'image de marque de l'entreprise (Klatzky & Peck, 2012; van Laack, 2014). La maîtrise de la qualité haptique des produits est donc devenue une nécessité pour de nombreuses entreprises industrielles.

Dans ce contexte, la société **INEVA** a souhaité, en participant à ce projet, relever deux défis. Le premier est d'accompagner ses clients dans l'amélioration de leurs processus de contrôle en leur proposant notamment des méthodes innovantes dans le domaine du toucher. Le second défi consiste à proposer à ses clients de nouvelles solutions instrumentées et automatisées pour le contrôle par toucher, et cela en s'appuyant sur les capacités de conception et de développement **mécatronique** déjà présentes dans l'entreprise. Les principales difficultés pour rendre systématique et automatiser ce type de contrôle résident dans le fait que peu de standards et d'outils existent actuellement, que les grandeurs caractéristiques à évaluer sont souvent mal définies et que les relations entre les mesures effectuées et les perceptions générées sont complexes à établir. C'est la recherche de solutions à ces difficultés qui a guidé nos travaux.

6. Les rapports de *IDTechEx* (IDTechEx, 2017), *Research and Markets* (Research & Markets, 2017), et *Markets and Markets* (Markets & Markets, 2017) estiment entre 2,8 et 19,55 milliard de dollars la valeur du marché global des technologies haptiques, respectivement au horizons 2027, 2021 et 2022.

0.3 Problématique et démarche de recherche

Le contexte de ce projet et les enjeux pour l'industrie nous ont amené à orienter nos travaux vers le contrôle de la qualité haptique des produits. Nos observations sur des cas d'étude ont mis en évidence les difficultés rencontrées par les industriels dans la mise en place et l'application de ce contrôle. Elles ont également soulevé plusieurs questions concernant l'efficacité des méthodes existantes (ou parfois l'absence de méthodes) et leur capacité à évoluer ou à s'adapter à d'autres domaines d'application. Nous avons identifié trois éléments principaux à l'origine de ces difficultés :

1. la complexité de l'expertise associée à la perception sensorielle haptique, qui rend le dialogue parfois difficile entre l'ensemble des acteurs de la qualité (depuis la compréhension du souhait du client, en passant par le marketing, la conception, la production et le contrôle de la qualité),
2. le manque de structure et de généricité dans la gestion de ces connaissances, qui les rend peu accessibles et peu évolutives,
3. le manque de méthodes adaptées au contrôle industriel, le plus souvent caractérisées par une grande variabilité de leurs résultats résultant de la subjectivité du jugement des contrôleurs.

Ces trois éléments nous ont ainsi amenés à formuler notre problématique qui peut s'exprimer ainsi :

Comment maîtriser le contrôle haptique d'un produit ?

Maîtriser la qualité haptique des produits requiert une grande expertise qu'il s'agit d'abord d'acquérir, puis de représenter pour être utilisée et enrichie. Cette maîtrise requiert également de disposer de méthodes capables de réduire autant que possible la variabilité des résultats qui est généralement observée pour ce type de contrôle. Elle requiert enfin que ces méthodes puissent être les plus génériques possibles de manière à être applicable à différents contextes de contrôle (différents produits, différents types d'anomalies, etc.).

Plusieurs objectifs ont donc été définis pour répondre à notre problématique :

1. **Définir et modéliser les connaissances** associées au contrôle haptique des produits.
2. **Organiser et gérer ces connaissances** de manière à les rendre rapidement accessibles et évolutives.
3. **Proposer et automatiser une méthodologie de mise en œuvre du contrôle** à destination des industriels.

0.4 Structure du document

Le document est structuré de manière à détailler l'ensemble de nos contributions, celles-ci convergeant vers notre proposition d'un ensemble complet et cohérent de méthodes et d'outils pour aider les industriels à maîtriser le contrôle de la qualité haptique de leurs produits.

Le chapitre 1 présente d'abord un état des lieux sur la manière dont le contrôle sensoriel des produits est réalisé dans les entreprises, en détaillant plus spécifiquement le cas du contrôle haptique. Celui-ci étant très lié à la perception que le contrôleur a (et que le client aura) du produit, nous détaillons les spécificités et les principales caractéristiques d'un processus de perception du toucher humain.

Le chapitre 2 décrit la méthode proposée pour formaliser les connaissances nécessaires au contrôle haptique des produits. Un modèle est proposé pour obtenir une description des sensations haptiques. Celui-ci a été construit grâce à la conception d'un processus d'analyse sémantique générique. Neuf catégories de sensations haptiques ont été identifiées grâce à ce processus et employées pour formaliser les connaissances associées au contrôle. Nous montrons ainsi qu'il est possible de construire un modèle sémantique reposant sur une décomposition de la description des sensations. Le fait que le processus soit générique, et donc indépendant du domaine d'application, mène à un modèle qui est utilisable pour différents contextes de contrôle.

Le chapitre 3 introduit une représentation ontologique des connaissances du contrôle sensoriel, ainsi qu'un système pour leur gestion et leur enrichissement. S'appuyant sur des ontologies de plus haut niveau bien établies dans la littérature, l'ontologie proposée permet une représentation robuste et contextuelle de ces connaissances, tout en préservant un fort potentiel évolutif.

Dans le chapitre 4, une méthodologie est proposée pour faciliter la définition de spécifications, de protocoles et de tolérances de contrôle. Cette méthodologie exploite le modèle de connaissances proposé, tout en s'adaptant aux spécificités du produit à contrôler. Son application dans l'entreprise horlogère PIAGET a permis de vérifier la pertinence du modèle développé. Elle a abouti à une amélioration significative des performances du contrôle haptique (réalisé sur certains bracelets de montre).

Enfin, le chapitre 5 présente l'outil logiciel INSENSO que nous avons développé dans le cadre de ce projet. Cet outil intègre les méthodes proposées pour la mise en place systématique d'un contrôle haptique et pour la gestion des connaissances associées. Il rend ces connaissances accessibles aux industriels et facilite l'accès à l'expertise de la base de connaissances grâce aux mécanismes de raisonnement.

La figure 2 présente une vue d'ensemble des liens entre les chapitres du manuscrit et les différents résultats de nos travaux.

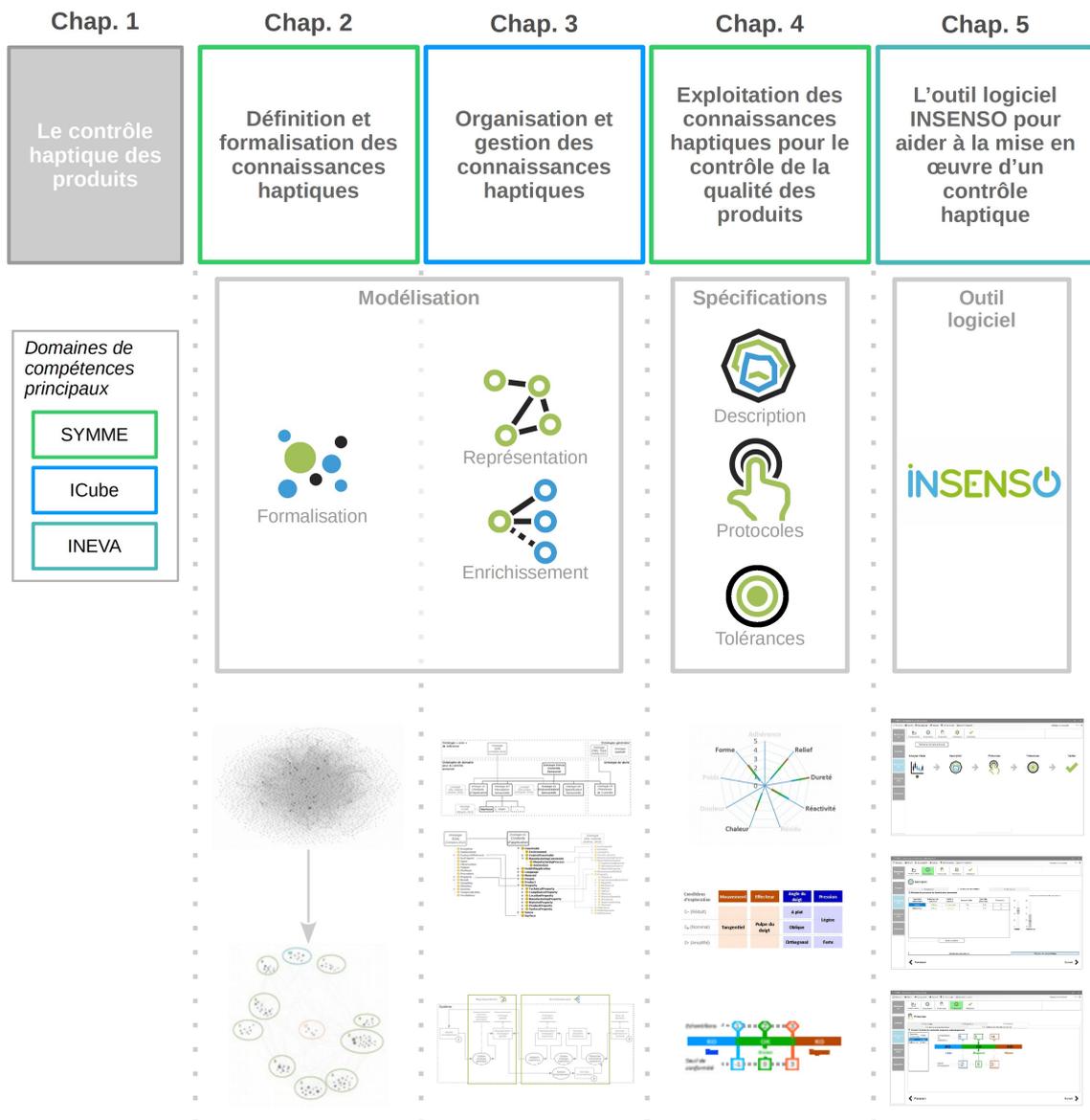


Figure 2 – Vue d'ensemble de la structure du manuscrit

1

Le contrôle haptique des produits

Sommaire

1.1	Quelques observations sur le contrôle haptique industriel	10
1.1.1	Observations générales	10
1.1.2	Observations sur le cas PIAGET	12
1.1.3	Synthèse des observations	14
1.2	Le processus de perception humaine dans le cadre du contrôle sensoriel	15
1.3	De l'exploration aux stimuli	16
1.3.1	Les modes d'exploration du toucher	16
1.3.2	Les récepteurs et effecteurs sensoriels du toucher	17
1.4	Les sensations et leur description	19
1.4.1	La sémantique dans le domaine sensoriel	19
1.4.2	La description des sensations haptiques dans la littérature	22
1.4.3	Méthodes de catégorisation de la description	24
1.5	L'interprétation des sensations pour la perception des anomalies	26
1.5.1	La perception sensorielle des produits	26
1.5.2	Parallèles entre contrôle visuel et contrôle haptique	27
1.5.3	Perception des anomalies haptiques	28
1.6	De l'anomalie au défaut	29
1.7	Conclusion	30

Le sens du toucher a depuis longtemps fait l'objet de nombreuses recherches. Dans le domaine de la psychologie, les premières études sur le toucher remontent au XVIII^{ème} siècle avec les travaux de Weber (1795-1878) et Fechner (1801-1887). Leurs travaux portaient sur la sensibilité tactile et, plus précisément, sur la manière dont le toucher est perçu en fonction de la localisation des stimuli et de leur intensité. Aujourd'hui, la neurophysiologie parvient à décrire précisément comment notre système nerveux réagit à des stimuli (une synthèse des connaissances à ce sujet est par exemple donnée dans (S. Lederman & Klatzky, 2009)).

En revanche, **la perception du toucher**, c'est à dire la manière dont sont interprétées et traitées les sensations du toucher reste encore aujourd'hui un sujet de recherche pour lequel de nombreux verrous sont à lever. Cette recherche est d'autant plus importante que les entreprises sont de plus en plus nombreuses à exprimer des attentes d'une meilleure compréhension du sens du toucher pour concevoir ou pour contrôler leurs produits. Parvenir à maîtriser le toucher d'un produit requiert en effet une expertise souvent difficile à acquérir, tant dans le domaine de la formalisation des connaissances concernées que dans celui de la mise en œuvre des méthodes à utiliser pour ce type de contrôle.

Ce chapitre présente d'abord quelques observations que nous avons faites sur le contrôle par toucher tel qu'il est réalisé aujourd'hui dans l'industrie (section 1.1). Nous abordons ensuite la question de la perception humaine, et plus particulièrement celle du toucher lors du contrôle d'un produit (section 1.2). Nous décrivons enfin les différentes étapes composant ce processus, depuis la génération des sensations (sections 1.3 et 1.4) jusqu'à leur interprétation pour le contrôle d'un produit (sections 1.5 et 1.6).

1.1 Quelques observations sur le contrôle haptique industriel

Dans l'industrie, les contrôles des produits mis en place font de plus en plus appel au sens du toucher. Le plus souvent, ces contrôles se positionnent en complément de contrôles visuels pour affiner les résultats, ou peuvent même les remplacer pour vérifier certaines caractéristiques des produits que la vue humaine ne permet pas d'appréhender correctement (l'adhérence d'une surface par exemple).

Le contrôle par toucher est généralement un **contrôle haptique** parce qu'il implique à la fois une perception **tactile** mais aussi une perception **kinesthésique** du produit. On parle également parfois de toucher dynamique pour indiquer que ce contrôle s'effectue avec un produit et un effecteur (doigt, main, paume, etc.) en mouvement.

1.1.1 Observations générales

Le contrôle haptique est présent dans de nombreux domaines industriels comme, par exemple, le secteur automobile, celui de la joaillerie, de l'ameublement, de la fabrication de pièces mécaniques ou encore celui des écrans tactiles (figure 1.1). Comme d'autres contrôles sensoriels, le contrôle haptique a pour objectif de vérifier que la perception que les utilisateurs ont d'un produit est conforme à ce qui a été souhaité par ses concepteurs. Il peut également être utilisé, au même titre qu'un contrôle visuel, pour vérifier certaines

caractéristiques fonctionnelles d'un produit (par exemple, l'état de surface d'une pièce mécanique en contact avec d'autres composants).



Figure 1.1 – Quelques exemples d'application du contrôle haptique

Pour de nombreuses entreprises, le contrôle sensoriel se base sur l'utilisation d'une **défauthèque** qui répertorie l'ensemble des défauts pouvant apparaître sur un produit ou sur une gamme de produits (Dietrich, 1999, p. 21). Un exemple de défauthèque pour des pièces de fonderie moulées est donné dans (Lavastre & Bouvet, 2012). L'utilisation d'une défauthèque présente cependant plusieurs inconvénients. D'abord, elle peut se révéler parfois difficile à mettre en place, parce qu'une identification de tous les défauts possibles sur un produit suppose que l'entreprise dispose d'une expérience suffisamment longue dans la fabrication ou l'utilisation de ce produit. Elle est ensuite très souvent spécifique à un type de produit ou à un processus de fabrication, ce qui la rend généralement difficile à réutiliser et à partager. De plus, la formation des contrôleurs à son utilisation peut s'avérer compliquée à cause du nombre et de la variété des défauts pouvant apparaître sur le produit. Au final, ces inconvénients amènent bien souvent les contrôleurs à ne pas utiliser la défauthèque mise à leur disposition, mais à faire plutôt appel à leurs propres connaissances pour décider de l'acceptation ou non d'un produit. Malgré cela, une défauthèque, surtout lorsqu'elle est déjà en place, fournit un grand nombre d'informations particulièrement intéressantes qui peuvent servir de base à la construction de méthodes de contrôle plus formelles et standardisées.

Au début des années 1980, plusieurs études soulignaient déjà l'impact de la perception humaine sur les performances d'inspection et fournissaient des méthodes permettant d'évaluer la qualification des contrôleurs (Benson & Ohta, 1986 ; Johnson & Funke, 1980 ; Ohta, Kase, & Asao, 1980). Plus récemment, dans le contexte d'un contrôle d'aspect esthétique des produits, les études menées au laboratoire SYMME (Baudet, 2012 ; Baudet, Maire, & Pillet, 2013 ; Guerra, 2008 ; Guerra, Pillet, & Maire, 2006) ont contribué à améliorer de manière significative la performance de l'inspection visuelle en fournissant une liste d'anomalies visuelles génériques, ainsi que des protocoles de contrôle adaptés à la perception visuelle humaine.

Malgré ces avancées, les méthodes génériques et formelles aidant les industriels à mettre en place un contrôle sensoriel sont encore peu nombreuses. Si certaines méthodes utilisées en analyse sensorielle contribuent à mieux décrire ou mesurer des sensations, elles sont en revanche généralement difficiles et longues à mettre en œuvre. Elles sont de plus très souvent spécifiques à un produit ou un domaine d'application et ne permettent pas toujours de capitaliser l'expérience acquise lors d'une application sur un produit donné. Enfin, la notion d'anomalie – détaillée dans les études de Guerra (2008) et Baudet (2012) – pourtant essentielle au contrôle qualité, est rarement abordée par ces méthodes, celles-ci se focalisant davantage sur la formalisation et la caractérisation des sensations.

1.1.2 Observations sur le cas PIAGET

Dans les entreprises avec lesquelles nous avons travaillé, nous avons rapidement remarqué le manque, voire dans certains cas l'absence totale, de formalisation et de standardisation dans les méthodes de contrôle haptique mises en place. C'était le cas de l'entreprise d'horlogerie et de bijouterie de luxe **PIAGET**⁷ qui souhaitait réaliser un contrôle haptique sur certains bracelets de montre. Des retours clients faisaient état de bracelets décrits comme « trop râpeux » ou « très agressifs ». Notre première analyse a rapidement mis en évidence la forte variabilité des résultats des contrôles avec une répétabilité et une reproductibilité insuffisantes. Par ailleurs, nous avons constaté la difficulté pour les personnes impliquées dans le contrôle à partager un même vocabulaire pour décrire leurs perceptions haptiques et décrire les anomalies relevées.

The image shows the logo of the company PIAGET, which consists of the word "PIAGET" in a large, bold, serif font.

Figure 1.2 – Logo de l'entreprise PIAGET

Le cas PIAGET n'est pas unique. Nous avons relevé les mêmes difficultés dans d'autres entreprises, notamment en ce qui concerne la définition de spécifications ou la mise en place de protocoles permettant la réalisation des tâches de contrôle haptique. Ces éléments, pourtant bien cadrés pour le contrôle géométrique des produits (Ballu, Mathieu, & Dantan, 2001; Favreliere, 2009), le sont beaucoup moins pour le contrôle sensoriel et haptique en particulier. Bien que les normes d'analyse sensorielle (ISO 11035, 1994; ISO 5492, 2008; ISO 13299, 2016; ISO 6658, 2017) apportent certaines solutions, leur application industrielle n'est pas immédiate et reste en général limitée aux laboratoires de recherche et développement. Les récentes études effectuées au laboratoire SYMME ont par contre proposé des éléments de réponse pour le contrôle visuel ou contrôle d'aspect (Baudet, 2012; Desage, 2016; Guerra, 2008; Pitard, 2016) (manuel ou instrumenté). Cela nous a donc amené à approfondir nos observations et à proposer des méthodes pour répondre à cette problématique.

Pour affiner nos observations, nous avons fait réaliser 32 échantillons par l'entreprise PIAGET en nous basant sur les résultats d'un plan d'expérience à plusieurs facteurs influant la fabrication (type d'outil utilisé, usure de l'outil, type de finition appliquée, opérateurs, etc.)⁸. Chaque échantillon prenait la forme d'une barre métallique (7 cm x 1 cm x 3 mm) disposant d'une partie striée (2 cm x 1 cm) obtenue en faisant varier les différents paramètres de fabrication.

Plusieurs personnes ont participé à cette étude en réalisant un contrôle haptique de ces échantillons. Il s'agissait de trois responsables qualité en charge de la définition des spécifications et protocoles de contrôle et de quatre contrôleurs réalisant le contrôle des bracelets en cours ou en fin de production.

Un test de variabilité R^2 & E^2 (J.-L. Maire, Pillet, & Baudet, 2013a) a été appliqué sur les résultats de cette étude. Par rapport au test R&R, ce test analyse la répétabilité et la reproductibilité des résultats de contrôle à la fois pour la phase de détection et pour la phase d'évaluation des anomalies. Aucun mode de contrôle n'a été communiqué aux participants de l'étude, le contrôle se faisant à l'aveugle. Les échantillons ont été présentés de manière aléatoire aux participants qui indiquaient à chaque fois leur décision parmi trois choix possibles (échantillon accepté sans détection de problème de qualité, échantillon accepté malgré un possible problème de qualité, ou échantillon refusé pour cause

7. PIAGET : <https://int.piaget.com/>

8. L'intitulé des paramètres est simplifié pour conserver la confidentialité de la réalisation des bracelets.

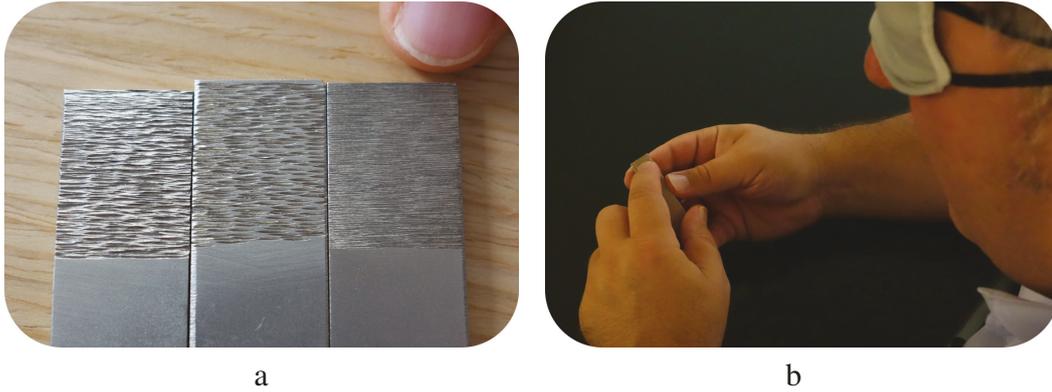


Figure 1.3 – Le test R^2 & E^2 dans l'entreprise PIAGET

de problème de qualité). Pour chaque échantillon, le participant décrivait à l'aide de mots les sensations perçues ou les raisons de son choix. La figure 1.3(a) montre un exemple des échantillons utilisés durant le test et la figure 1.3(b) montre un exemple de mode contrôle utilisé par un participant sur l'un de ces échantillons. La figure 1.4 montre quant à elle les principaux résultats de l'application du test. Plus de détails concernant ces résultats sont fournis en annexe A.

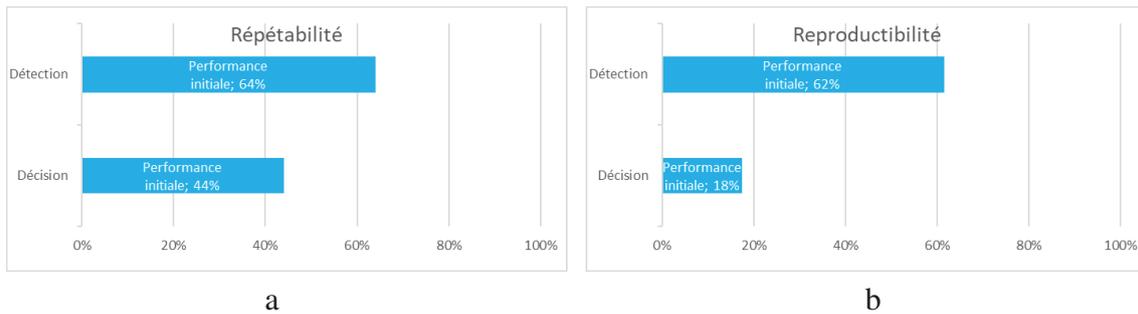


Figure 1.4 – Principaux résultats du test R^2 & E^2

Le test R^2 & E^2 a montré des résultats très insuffisants tant en répétabilité (figure 1.4(a)) qu'en reproductibilité (figure 1.4(b)) et cela aussi bien en détection qu'en décision (moins de 20% de reproductibilité dans l'évaluation des échantillons). L'analyse du vocabulaire utilisé par les participants a révélé, comme le montre la figure 1.5, une grande diversité de mots.

La manière d'explorer les échantillons était également très différente d'un participant à l'autre, comme le montre la figure 1.6 qui donne quelques exemples des modes d'exploration utilisés (exploration par contact avec le poignet, la paume ou les doigts, avec mouvements rapides ou longs, etc.)

Par ailleurs, nous avons noté le temps important utilisé par chaque participant pour effectuer ses contrôles (une heure environ pour réaliser le test complet). Le sentiment de fatigue nous a également été remonté à plusieurs reprises, en raison de la concentration nécessaire au contrôle.



La taille de la police utilisée pour chaque mot est proportionnelle au nombre d'occurrences de ce mot.

Figure 1.5 – Les mots utilisés par les participants durant le contrôle



Figure 1.6 – Quelques modes d'exploration utilisés lors du contrôle

1.1.3 Synthèse des observations

Les résultats de notre première analyse, ainsi que ceux du test réalisé sur notre cas d'étude dans l'entreprise PIAGET, ont montré la difficulté des contrôleurs à réaliser un contrôle haptique efficace. Le manque de formalisation de la méthode de contrôle a été identifiée comme à l'origine de cette difficulté (brainstorming réalisé avec l'entreprise lors de la présentation des résultats du test). Formaliser une méthode de contrôle suppose de bien comprendre le **processus de perception haptique humain**. Ce processus débute par une phase d'exploration qui active des stimuli, un traitement sensoriel sur ces stimuli qui génère des sensations, se poursuit par une interprétation des sensations qui conduit à la détection d'éventuelles anomalies et, se termine par une phase d'évaluation de ces anomalies pour juger si ce sont des défauts ou non. La section suivante détaille ce processus de perception.

1.2 Le processus de perception humaine dans le cadre du contrôle sensoriel

Le processus de perception sensorielle de l'être humain est relativement similaire pour tous les sens. Goldstein (Goldstein, 1989) en donne par exemple une description très complète. Avec la figure 1.7, nous en proposons une représentation plus générale, mais appliquée cette fois à un contexte de contrôle sensoriel : de la génération et l'acquisition de stimuli transformés en sensations jusqu'à leur interprétation par le cerveau pour la détection d'anomalie et le jugement d'acceptabilité d'un produit.

Nos systèmes sensoriels produisent des sensations selon le sens sollicité (vision, odorat, ouïe, goût...). Dans le cas où la peau est mise en contact avec un objet, la **somesthésie** (appelée aussi système sensoriel somatique) génère des sensations **haptiques**. Celles-ci peuvent être extéroceptives (pression, chaleur, froid, ...), proprioceptives (position des parties du corps) ou nociceptives (douleur). A l'inverse des autres systèmes sensoriels, ces récepteurs sont répartis tout au long du corps et non à des endroits bien localisés comme ceux de la vision, de l'audition ou de l'olfaction. Les travaux de Katz au début du XX^e siècle (Katz, 1989, traduction et ré-édition de l'œuvre originale de 1925), fournissaient déjà de sérieuses avancées dans la compréhension de la perception humaine liée au sens du toucher. Les études de Gibson (Gibson, 1962), celles de Lederman et Klatzky (Klatzky & Lederman, 1988 ; S. J. Lederman & Klatzky, 1987), puis celles de Jones (Jones & Lederman, 2006) ont ensuite permis de mieux comprendre le fonctionnement de ce processus de perception qui comprend des dimensions **tactile** et **kinesthésique**. La dimension tactile est apportée par des récepteurs localisés dans la peau, tandis que la dimension kinesthésique est apportée par ceux localisés dans les muscles, tendons et articulations. Ainsi, au contact d'un objet, certains récepteurs fournissent des informations sur des zones très localisées de la surface de l'objet alors que d'autres récepteurs fournissent des informations plus globales sur cette surface. La somesthésie englobe donc ces deux aspects de la sensibilité humaine qui forment la perception **haptique**.

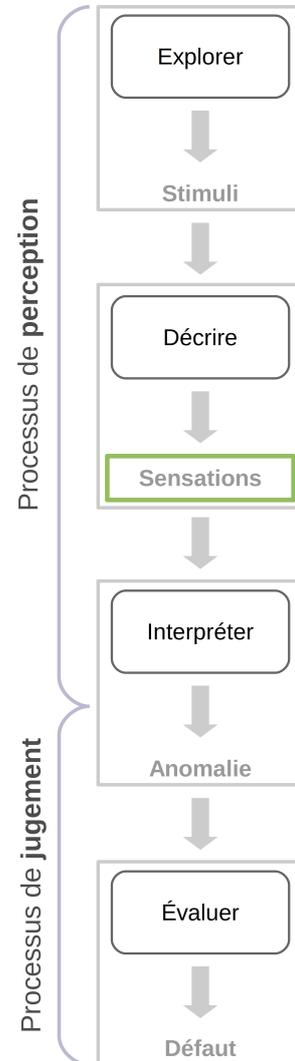


Figure 1.7 – La perception humaine dans le contrôle sensoriel

1.3 De l'exploration aux stimuli

Le processus de perception commence par un contact de la peau avec la surface d'un objet. Ce contact crée une stimulation de la peau via des stimuli thermiques, mécaniques, chimiques ou électriques. Celle-ci peut être obtenue par une stimulation cutanée qui résulte de la mise en contact d'un objet sur une main immobile – par exemple, la stimulation produite par un objet pointu placé sur la paume de la main – ou par stimulation haptique produite par des mouvements actifs d'exploration de la main en contact avec un objet – par exemple, une pression exercée avec la main sur la surface d'un objet.

Les systèmes sensoriels s'activent dès détection d'un stimulus et transforment l'énergie reçue en une énergie électrique par un changement de potentiel électrique neuronal (transduction). L'information est ainsi transmise par les voies nerveuses jusqu'au cerveau dans des zones spécifiques à chaque modalité sensorielle. Les informations ainsi codées sont ensuite traitées par les neurones du cortex cérébral pour produire une sensation. Le cerveau intègre alors l'ensemble des sensations reçues, les interprète et les complète grâce à l'intelligence et la mémoire de l'individu conditionnée par son vécu – c'est à dire, son expérience, ses souvenirs – afin d'en construire une perception.

1.3.1 Les modes d'exploration du toucher

L'obtention de stimuli relève généralement d'une démarche intentionnelle et active qui consiste à mettre en contact la surface d'un objet avec un membre du corps humain (appelé effecteur) et, selon le cas, effectuer un mouvement en maintenant ce contact (Depled, 2009). Lederman et Klatzky (S. J. Lederman & Klatzky, 1987) recensent huit modes d'exploration possibles (figure 1.8), chacun d'eux permettant d'appréhender, totalement ou en partie, certaines caractéristiques du produit touché.

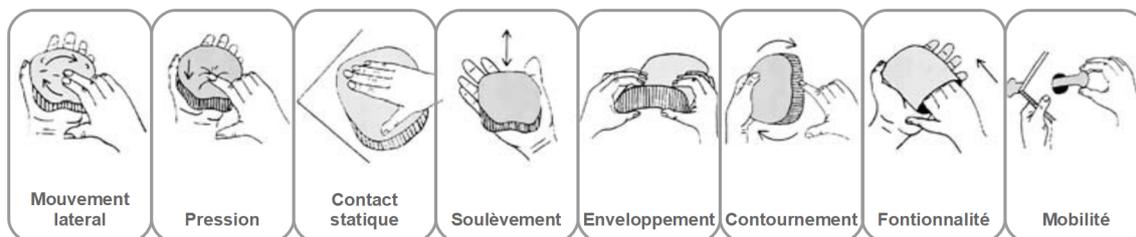


Figure 1.8 – Les procédures exploratoires du toucher (S. J. Lederman & Klatzky, 1987)

Les trois premiers modes d'exploration (*mouvement latéral*, *pression* et *contact statique*) induisent principalement des perceptions **tactiles** et permettent l'appréciation des propriétés physiques d'une surface. Les trois modes suivants (*soulèvement*, *enveloppement* et *contournement*) induisent principalement des perceptions **kinesthésiques** et permettent l'appréciation des propriétés spatiales et volumétriques d'un produit. Les deux derniers modes (*fonctionnalité* et *mobilité*) relèvent principalement de tests fonctionnels d'un produit ou d'une notion d'extension de la perception à des éléments mobiles et à leur interaction (le déplacement d'un bouton poussoir par exemple) (Depled, 2009 ; S. J. Lederman & Klatzky, 1987). Plusieurs études ont par ailleurs souligné l'influence de ces modes d'exploration sur le type de sensations générées et les différentes perceptions qui peuvent en résulter (Eterradossi, 2011 ; Hollins & Risner, 2000 ; S. Lederman & Klatzky, 2009).

Klatzky et Lederman (Klatzky, Loomis, Lederman, Wake, & Fujita, 1993) proposent de différencier ces huit procédures selon quatre paramètres :

- le mouvement de l'effecteur final (statique ou dynamique),
- la direction dans laquelle l'effecteur exerce un effort (normale ou tangentielle à la surface d'un objet),
- la région d'intérêt de l'objet (surface, angles, arrêtes,
- l'espace de travail de l'objet (contraint ou non).

Par exemple, la pression se caractérise par un mouvement dynamique, une direction normale à la surface d'un objet dans un espace de travail contraint ou non.

1.3.2 Les récepteurs et effecteurs sensoriels du toucher

La peau est composée de multiples couches de tissus, dans lesquelles sont intégrés des récepteurs sensoriels du toucher. D'autres récepteurs sont également présents à l'intérieur du corps afin de fournir des informations de **proprioception** qui concernent la position des différentes parties du corps et les efforts appliqués.

Il existe ainsi plusieurs types de récepteurs sensoriels répondant à différents types de stimuli (De Boissieu, 2010 ; Johansson & Vallbo, 1983 ; S. Lederman & Klatzky, 2009 ; S. J. Lederman & Klatzky, 1987 ; University of Washington, 2009) :

- les **mécanorécepteurs**, sensibles aux phénomènes mécaniques de contact (pression, étirement, vibrations, formes, persistance),
- les **thermorécepteurs**, sensibles aux transferts thermiques,
- les **nocicepteurs**, sensibles aux stimuli extrêmes et aux dégradations de la peau,
- les **propriocepteurs**, sensibles à la position du corps, aux mouvements et à la force.

Le tableau 1.1 synthétise l'ensemble des caractéristiques (stimuli, zone d'activation, temps de réponse et fonction) de ces récepteurs sensoriels.

Ces récepteurs sensoriels répondent donc à plusieurs types de stimuli (pression de contact, étirement de la peau, formes microscopique et macroscopique, vibration, persistance, transfert thermique, dégradation de la peau, mouvement, position dans l'espace, effort et réaction chimique). Les mécanorécepteurs prennent la forme de terminaisons nerveuses encapsulées avec les corpuscules de Meissner, de Ruffini, de Pacini, ou bien de terminaisons nerveuses libres (Chelewiak & Collins, 1991 ; Johansson & Vallbo, 1983). Les cellules de Merkel, qui s'apparentent à une configuration en terminaison libre et sont situées à la base de l'épiderme, sont très sensibles à une pression faible et très localisée, exercée sur la peau. Les corpuscules de Meissner, situés immédiatement sous l'épiderme (première couche de la peau), permettent également une perception tactile très fine et sont particulièrement sensibles aux frôlements et à une pression soutenue. Les corpuscules de Ruffini, situés dans le derme, sont sensibles à la pression et à l'étirement. Les corpuscules de Pacini, situés dans le derme profond et l'hypoderme, sont uniquement sensibles aux variations brutales de déformation (Bensmaïa & Hollins, 2005 ; De Rossi & Scilingo, 2006). Enfin, les terminaisons nerveuses libres sont activées par une variété de stimuli extrêmes (grande déformation, chaleur ou froid intenses, irritants chimiques, ...). Il existe également d'autres récepteurs sensoriels comme ceux localisés à la base des poils sensibles à leurs oscillations (University of Washington, 2009), ou encore les récepteurs de Krause, moins concernés par le contact par toucher dans un cadre industriel parce que situés sur les muqueuses, les membranes ou les lèvres.

Chapitre 1. Le contrôle haptique des produits

Capteurs	Catégorie	Image	Type d'intégration	Zones les plus sensibles	Intégration dans le corps	Surface couverte	Temps de réponse	Fonction
Cellules de Merkel	Mécanorécepteur		Derme de la peau	Doigts et bout des doigts		Zone sensible étroite (2-4 mm ²)	Adaptation lente	Sensible aux faibles pressions de contact, aux courbes, aux textures rugueuses et aux pics
Corpuscules de Ruffini	Mécanorécepteur		Derme de la peau, Articulations	Paume et doigts		Zone sensible étendue	Adaptation lente	Sensible aux variations de pression de contact, à l'étirement de la peau et à la chaleur
Corpuscules de Meissner	Mécanorécepteur		Haut derme de la peau (juste en dessous de	Doigts et bout des doigts		Zone sensible étroite (2-4 mm ²)	Adaptation rapide	Sensible aux contacts très légers, aux vibrations, aux déplacements rapides et aux pressions constantes
Corpuscules de Pacinian	Mécanorécepteur		Derme profond de la peau et hypoderme	Doigts et paume		Zone sensible étendue	Adaptation rapide	Sensible aux pressions fortes de contact, aux vibrations brutales et aux déformations de la peau
Terminaisons nerveuses libres	Thermorécepteur et nocicepteur		Derme et épiderme de la peau	/	/	Grande surface, présent sur tout le corps	Adaptation lente	Sensible à la douleur et aux variations de température
Fuseaux neuromusculaires	Propriocépteur		Muscles	/		/	Adaptation lente	Mesure la longueur des muscles
Organe tendineux de Golgi	Propriocépteur		Tendons	/		/	Adaptation lente	Mesure la force délivrée par les muscles
Corpuscules de Krause	Mécanorécepteur		Bouche, yeux, lèvres, muqueuses et membranes	/	/	?	?	Sensible au froid et aux faibles vibrations

Tableau 1.1 – Les récepteurs sensoriels – informations et illustrations tirées de (Benson & Ohta, 1986 ; Chelewiak & Collins, 1991 ; De Boissieu, 2010 ; De Rossi & Scilingo, 2006 ; Johansson & Vallbo, 1983 ; S. Lederman & Klatzky, 2009 ; S. J. Lederman & Klatzky, 1987 ; Purves et al., 2001 ; University of Washington, 2009)

Ces récepteurs cutanés se distinguent par leur zone de sensibilité à un stimulus, ainsi que par la taille de cette zone (S. Lederman & Klatzky, 2009 ; University of Washington, 2009). Les récepteurs situés à la surface de la peau (Merkel et Meissner) ont des zones de sensibilité très étroites et bien délimitées, tandis que les récepteurs sensoriels profonds (Ruffini et Pacini) couvrent des zones plus étendues dont les limites sont plus floues. Ils se distinguent également par leur vitesse de réaction aux stimuli. Ceux associés aux cellules de Merkel et aux corpuscules de Ruffini réagissent lentement aux stimuli tandis que ceux associés aux corpuscules de Meissner et de Pacini réagissent plus rapidement.

La main est souvent considérée comme le meilleur système perceptif tactile (Hatwell, Streri, & Gentaz, 2003) en raison de sa mobilité et de la concentration de récepteurs sensoriels. Bien que d'autres zones du corps humain soient également très sensibles au stimuli (voir par exemple (S. Lederman & Klatzky, 2009, illustration p.1142)), la plupart d'entre elles ne possèdent pas la liberté de mouvement nécessaire aux modes d'exploration décrits précédemment pour obtenir une perception haptique. Les zones de plus grande sensibilité des mécanorécepteurs se situant sur la paume et les doigts – de manière étendue avec les corpuscules de Ruffini et de Pacinian, ou bien de manière plus étroite avec les cellules de Merkel et de Meissner –, la main est l'effecteur à privilégier pour une perception haptique, et donc dynamique, du toucher.

1.4 Les sensations et leur description

La frontière est mince entre les termes de sensation et de perception (J.-I. Maire, 2018) puisque dès qu'une sensation est interprétée par l'individu à travers son expérience et ses connaissances, elle devient perception. La distinction entre ces termes (et même ceux décrivant les stimuli) est parfois assez floue dans la littérature (Hayward, Astley, Cruz-Hernandez, Grant, & Robles-De-La-Torre, 2004 ; Myrgiotti, Chouvardas, & Miliou, 2009) et les mots employés pour définir les deux notions ont tendance à se rejoindre. Basseureau (Basseureau, 1995) décrit la notion de perception comme une « réponse globale aux stimuli », en précisant qu'elle est « à la fois sensorielle et affective ». Passaro (Passaro, 2014, p. 11) prolonge cette définition en indiquant que la perception désigne « la capacité à organiser les sensations en informations utiles », et cela dans le but « d'interpréter l'environnement ».

La sensation représente pour nous le résultat de la transformation du signal par les récepteurs sensoriels, après pré-traitement du système nerveux, mais avant que le cerveau ne raisonne sur cette sensation pour en déduire une perception. Dit autrement, une sensation est considérée comme l'une des entrées brutes du processus d'interprétation par le cerveau (voir la figure 1.7), la perception désignant quant à elle l'un des résultats de ce processus. Cela nous amène également à considérer qu'une sensation sera a priori quasi identique pour tous les individus (si l'on exclut les possibles variations de caractéristiques physiques de la peau, comme son épaisseur par exemple) alors que la perception pourra différer d'un individu à l'autre puisque leurs expériences et leurs connaissances respectives induiront des interprétations différentes.

Maîtriser le contrôle **haptique** des produits implique en amont de parvenir à une « bonne » description de ce qui est perçu par le contrôleur, c'est à dire des sensations. Cette description doit à la fois être non ambiguë, précise, consensuelle et partageable. Cela a été souligné dans de nombreuses études (Dumenil-Lefebvre, 2006 ; Giboreau et al., 2007 ; Guerra, 2008 ; Guest et al., 2011 ; Okamoto, Nagano, & Yamada, 2013). Cette partie aborde les différentes méthodes de description sensorielle et les confronte au cas du contrôle haptique industriel. La littérature nous montre en particulier qu'une description claire des sensations améliore la perception, notamment dans un cas du contrôle sensoriel. Néanmoins, les méthodes existantes présentent certaines limites lorsqu'il s'agit d'aider les industriels à mettre en place un contrôle haptique. La méthode que nous proposons, détaillée dans le chapitre 2, tente notamment de réduire certaines de ces limites.

1.4.1 La sémantique dans le domaine sensoriel

Les mots pour décrire ce que l'on ressent au toucher d'un objet sont très nombreux. Le contact avec une surface étant indispensable à la génération des sensations haptiques, la sémantique est un moyen privilégié pour communiquer et échanger sur les sensations perçues. C'est ce que révèle notre étude sur le vocabulaire utilisé dans plusieurs domaines d'application. Le Tableau 1.2 liste les différentes sources que nous avons analysées. Nous nous sommes limités au français et à l'anglais dans la culture occidentale mais d'autres études attestent de cette même diversité dans d'autres cultures, comme par exemple (Dingemans & Majid, 2012) pour la culture africaine et (Sakamoto & Watanabe, 2017) pour la culture asiatique.

Références des textes	Domaines de recherche
(Bassereau, 1995)	Design sensoriel
(Bensmaïa & Hollins, 2005)	Recherche sur les récepteurs
(Chen, Shao, Barnes, Childs, & Henson, 2009)	Conception d'emballage
(Chen, Barnes, Childs, Henson, & Shao, 2009)	Relation avec les propriétés de surface
(Choi & Jun, 2007)	Approche systématique pour l'étude du tactile
(Darden & Schwartz, 2009)	Tribologie, qualité perçue
(Dingemanse & Majid, 2012)	Structure sémantique du vocabulaire sensoriel
(Dumenil-Lefebvre, 2006)	Analyse sensorielle
(Giboreau, Navarro, Faye, & Dumortier, 2001)	Analyse sensorielle
(Giboreau et al., 2007)	Linguistique - analyse sensorielle
(Hatwell et al., 2003)	Perception des aveugles
(Heller, 1989b)	Perception des aveugles
(Hollins, Faldowski, Rao, & Young, 1993)	Dimensions perceptuelles
(Hollins & Risner, 2000)	Dimensions perceptuelles
(Issa, Schacher, & Adolphe, 2008)	Instrumentation
(Klatzky, Lederman, & Metzger, 1985)	Notions générales sur l'haptique
(Klatzky et al., 1993)	Notions générales sur l'haptique
(S. J. Lederman & Klatzky, 1987)	Notions générales sur l'haptique
(S. Lederman & Klatzky, 2009)	Notions générales sur l'haptique
(S. J. Lederman & Klatzky, 2010)	Notions générales sur l'haptique
(Philippe, Schacher, Adolphe, & Dacremont, 2004)	Analyse sensorielle
(Picard, Dacremont, Valentin, & Giboreau, 2003)	Analyse sensorielle
(Soufflet, Calonnier, & Dacremont, 2004)	Dimensions perceptuelles dans l'industrie
(Summers, Irwin, & Brady, 2007)	Analyse sensorielle
(Okamoto et al., 2013)	Dimensions perceptuelles
(Ballesteros & Heller, 2008)	Notions générales sur l'haptique
(Shirado & Maeno, 2005)	Modélisation de la perception et instrumentation
(Tiest & Kappers, 2009)	Perception de diffusion thermique
(Yoshioka, Gibb, Dorsch, Hsiao, & Johnson, 2001)	Étude neuro-physiologique
(Guest et al., 2011)	Échelles sensorielles et émotionnelles de la perception du toucher
(Yoshida, 1968)	Dimensions perceptuelles
(Crochemore, Nesa, & Couderc, 2004)	Le sensoriel dans le domaine automobile
(Crochemore, Vergneault, & Nesa, 2003)	Le sensoriel dans le domaine automobile
(Sola, 2015)	Perception haptique générale en milieu professionnel

(Sola, 2007)	Perception haptique générale en milieu professionnel
(Watanabe, Kano, & Sakamoto, 2014)	Dimensions sensorielles et onomatopées

Tableau 1.2 – Corpus des textes (français et anglais datés entre 1968 et 2017) étudiés pour la recherche des mots utilisés dans la description des sensations du toucher

Au total, nous avons trouvé plus de 400 mots (en français et en anglais) pouvant décrire une sensation perçue lors du toucher d'un objet. Ces mots sont rassemblés dans la figure 1.9. Les mots présents dans cette figure sont ceux qui étaient clairement identifiés dans ces études comme étant associés au sens du toucher et qui ont été retrouvés dans au moins deux textes du corpus. On note la grande diversité du vocabulaire utilisé et de sa signification au regard des sensations perçues. Cette diversité peut induire des problèmes au niveau de l'interprétation. C'est ainsi une des causes principale de variabilité du contrôle de la qualité perçue et en particulier haptique.

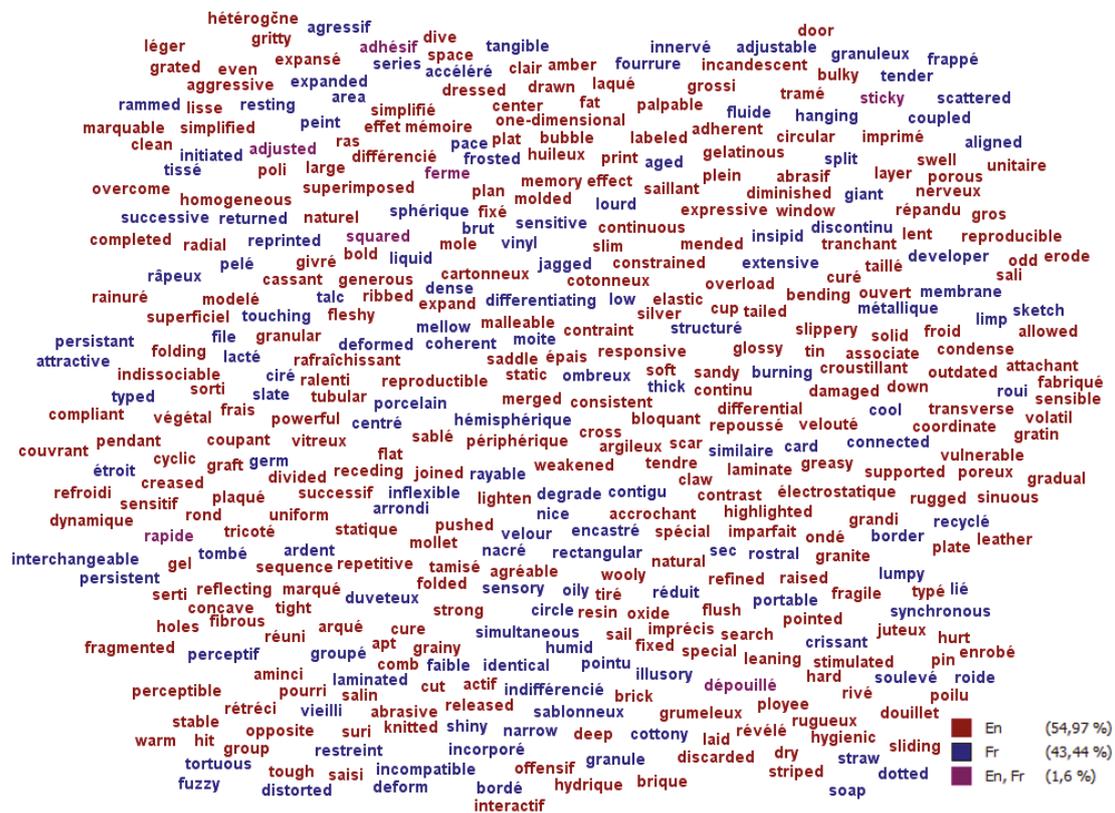


Figure 1.9 – Les mots utilisés pour décrire une sensation haptique

La figure 1.10 montre la correspondance entre les mots que nous avons trouvés et les domaines d'application et matériaux concernés – qui sont des éléments de contexte. Nous remarquons que le corpus de texte analysé est relativement complet car il est associé à quasiment tous les types de matériaux et tous les domaines d'application (seuls les domaines de la construction, de l'architecture intérieure, de l'aérospatiale et de l'agriculture ne sont pas représentés).

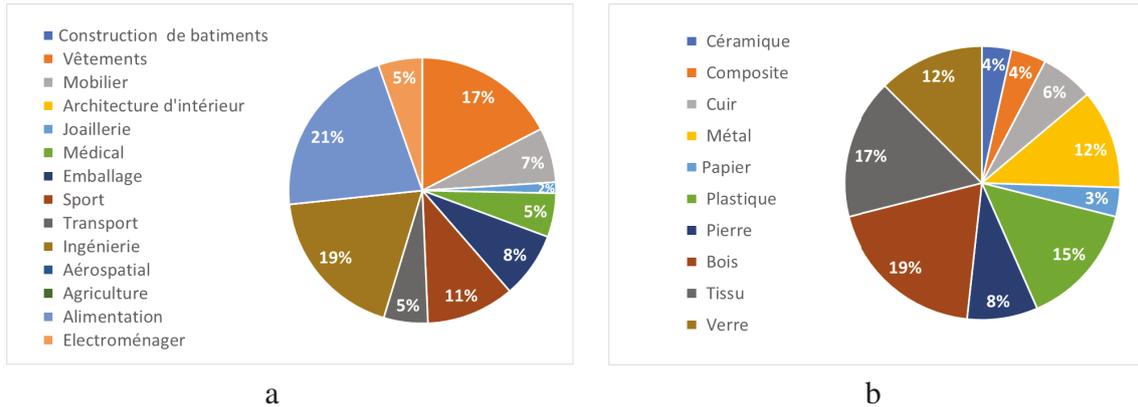


Figure 1.10 – Estimation de la correspondance entre les textes du corpus et le contexte d'application : ratio en pourcentage des textes associés à chaque élément de contexte. (a) : correspondance aux domaines d'application; (b) : correspondance aux matériaux impliqués

1.4.2 La description des sensations haptiques dans la littérature

Plusieurs études ont fourni une description réduite des descripteurs des sensations du toucher. C'est le cas d'abord de Sensotact qui est un référentiel tactile introduit par le constructeur automobile Renault (Crochemore et al., 2003) dans le but de décrire les sensations perçues au toucher dans un habitacle automobile (tableau de bord, tissu d'habillage du véhicule, etc.). Il emploie dix descripteurs (*dureté, nervosité, effet mémoire, collant, fibreux, relief, râpeux, bloquant, glissant, thermique*)⁹. En considérant uniquement les matériaux textiles, Issa, Schacher, et Adolphe (2005) proposent huit descripteurs (parfois couplés en paires d'opposés) invariants aux langues française et anglaise pour décrire les sensations tactiles perçues sur une étoffe (*souple/rigide, tombant, fin/épais, doux, froissable, nerveux*)¹⁰. Dans le même domaine d'application, Picard et al. (2003) propose quatre groupes de descripteurs¹¹ parmi un ensemble de vingt-quatre mots et Sola (2007) en liste quatorze. Pour les feuilles de papier, Summers et al. (2007) réduit la description des sensations à deux descripteurs seulement (*rugueux, raide*)¹². Dans le domaine des matériaux d'emballages, Dumenil-Lefebvre (2006) suggère d'utiliser deux groupes de descripteurs pour les sensations au contact du verre dépoli (*collant, rugueux, granuleux, glissant, frais, gras*) et au contact des produits plastiques, cartonnés, ... (*adhérent collant, souple, élastique, marquable, rugueux, granuleux, glissant, rayable, frais*). Cette dernière étude fournit également des descripteurs correspondant à la dimension visuelle et tactile (*empreintes qui restent, rayable*) et d'autres descripteurs identifiés comme uniquement visuels, mais pouvant également être identifiés au toucher (*forme, rainure*).

Ces études, et donc les descripteurs qui y sont proposés, sont souvent liés à un contexte donné, qu'il s'agisse du domaine d'application ou du type de matériaux concerné. Les descripteurs *tombant* et *froissable* sont par exemple très spécifiques aux matériaux textiles. A l'inverse, même si le descripteur *rugueux* est utilisé pour la plupart des matériaux,

9. (*hardness, nervousness, memory of shape, stickiness, fibrous, depth, roughness, braking, slippery, thermal*) en anglais

10. (*flexible/ rigid, falling, thin/thick, soft, creasable, responsive*) en anglais

11. (*soft/harsh, thin/thick, relief, hardness*) en anglais

12. (*rough, stiff*) en anglais

il n'est pas utilisé dans ces études pour les matériaux textiles. Certains descripteurs, même s'ils sont communs à plusieurs matériaux, ne décrivent pas toujours les mêmes sensations. Par exemple, le terme *gras* utilisé parfois pour le bois exprime une sensation de gras laissée sur la peau, alors qu'il peut également exprimer une sensation d'épaisseur pour un tissu (Sola, 2007).

Néanmoins, certaines études ont également travaillé à la proposition de listes réduites de descripteurs ou de catégories avec une portée plus générique. Une collaboration entre le laboratoire CPNI de l'ENSAM et l'institut IMS a par exemple mené à la proposition d'une sélection de treize descripteurs génériques tactile et visuels (*accrochant, adhérent, brillant, chaud, dur, gras, lisse, opaque, plastique, râpeux, réchauffable, reflétant, relief*). Cette liste a ensuite été réduite à dix descripteurs (*accrochant, adhérent, chaud, dur, gras, talonnant, pelliculé, marquable, couchant, relief*) (Bassereau, 1995) (voir tableau 1.3). Okamoto et al. (2013) présente une vue d'ensemble des dimensions psychologiques de la perception tactile basée sur une étude de la littérature dans le domaine. Cinq dimensions sont proposées (*friction, dureté, chaleur, rugosité fine et rugosité macroscopique*¹³). De plus, quelques mots sont associés à chaque dimension. La société SynTouch (2017), qui par ailleurs a développé un instrument de mesure des sensations tactiles, utilise également des dimensions proches de celles de Okamoto (*texture macroscopique, texture microscopique, friction, souplesse, thermique et adhésivité*¹⁴) avec en plus la dimension *adhésivité*. Bassereau (dans l'œuvre de (Depledge, 2009, extrait p.271)) souligne l'intérêt de l'utilisation d'une liste de descripteurs génériques pour un gain de temps et une capacité de suggestion d'autres éléments associés à ces mots (tels que le mode d'exploration). Néanmoins, cet extrait indique que l'utilisation d'une description plus spécifique au produit (et plus généralement au contexte d'application) peut permettre une description plus fine des grandeurs sensorielles afin de résoudre les possibles problèmes de différenciation entre échantillons.

La signification des descripteurs, et donc les sensations qu'ils décrivent, peut également varier d'une langue à l'autre. Ces différences sont notamment soulignées par Picard et al. (2003) qui indique que des différences subtiles existent entre les langues (ici le français et l'anglais). En effet, certains mots identifiés comme pertinents dans une langue auront une ou plusieurs traductions qui présentent, soit une différence en terme de signification de la sensation décrite, soient ne correspondent pas complètement. Par exemple, le descripteur *frais* en français peut se traduire par *cold* ou *cool* suivant le contexte. Les mots *doux* en français et *soft* en anglais n'ont pas exactement la même signification sensorielle (*soft* implique généralement plus de caractéristiques sensorielles que *doux*) (Picard et al., 2003). Enfin, la signification d'un même descripteur peut varier d'une culture à une autre. Par exemple, le caractère *froid* d'une surface ne sera pas forcément perçu de la même manière pour une personne issue d'un pays froid que pour une personne issue d'un pays chaud.

13. (*friction, hardness, warmth, fine roughness et macro roughness*) en anglais

14. (*macro texture, micro texture, friction, compliance, thermal et adhesive*) en anglais

Descripteur	Type	Définition
Accrochant	Tactile	Qui retient le doigt lors d'un mouvement parallèle à la surface
Adhérent	Tactile	Qui retient le doigt lors d'un mouvement perpendiculaire à la surface suite à une mise en pression
Chaud	Tactile	Qui transmet la chaleur immédiatement au contact du doigt
Dur	Tactile	Qui résiste à la pression du doigt
Gras	Tactile	Qui laisse une trace grasse sur la surface après le passage du doigt
Talonnant	Tactile	Qui après avoir cédé à la pression du doigt lui résiste brusquement
Pelliculé	Tactile et Visuel	Qui est recouvert d'une pellicule
Marquable	Tactile et Visuel	Surface qui reste marquée par les empreintes du doigt et/ou de l'ongle
Couchant	Tactile	Surface dont les fibres restent couchées après le passage du doigt
Relief	Tactile et Visuel	Surface qui possède de petites aspérités

Tableau 1.3 – Liste de dix descripteurs proposée par Bassereau (Bassereau, 1995)

1.4.3 Méthodes de catégorisation de la description

Les méthodes d'analyse sensorielle, et en particulier celles consacrées au choix du vocabulaire sensoriel (ISO 11035, 1994 ; ISO 5492, 2008), sont généralement utilisées pour sélectionner uniquement les mots (appelés descripteurs) les plus appropriés. Pour obtenir ce résultat, c'est généralement un processus itératif d'identification et d'élimination de termes qui est employé, et réalisé en consensus ou de manière statistique par un panel de personnes expertes d'un domaine d'application ciblé. Idéalement, ces méthodes préconisent de choisir des descripteurs (Depledt, 2009 ; Eterradosi, 2011 ; Guerra, 2008 ; ISO 11035, 1994) qui soient :

- exhaustifs, c'est à dire décrivant l'ensemble des sensations pouvant être perçues par une modalité sensorielle (le sens du toucher par exemple).
- pertinents, c'est à dire appropriés au contexte, par exemple à un produit ou un matériau.
- précis, c'est à dire n'induisant pas d'ambiguïté dans la description afin d'être compréhensible et partageable.
- indépendants : c'est à dire ne se recouvrant pas (ou le moins possible) en termes de sensation décrite.
- discriminants, c'est à dire permettant de différencier au maximum les objets décrits entre eux.

Bien que la sélection de descripteurs peut constituer un moyen d'identifier des catégories de description des sensations, certaines études se sont appuyées (de manière complémentaire à l'analyse sensorielle, ou indépendamment) sur d'autres méthodes de catégorisation ou de classification des mots. Celles-ci peuvent parfois en effet apporter un niveau d'abstraction ou de généralité plus élevé et permettre une structuration des informations.

Crochemore et al. (2003) et Dumenil-Lefebvre (2006) classent les descripteurs sélectionnés suivant trois modes d'exploration majeurs : *dynamique orthogonal*, *dynamique tangentiel* et *statique* (appelé également *thermique*) – correspondant respectivement aux modes d'exploration *pression*, *mouvement latéral* et *contact statique*. Pour ce référentiel tactile, chaque descripteur de sensation est ainsi associé à un mouvement particulier dérivé du mode d'exploration.

David (1997) et Sola (2007) se sont tournés vers les origines des mots et leur signification vis-à-vis des connaissances impliquées et des conséquences des perceptions sensorielles pour un individu. La classification utilisée se décompose en trois axes : l'axe *source*, l'axe *effet* et l'axe *propriétés physiques*. Ces axes sont décrits ci-dessous pour le sens du toucher. L'axe *source* fait référence aux mots qui décrivent des sensations interprétées grâce aux connaissances propres sur un objet source ou référent. Par exemple, *huileux* fait référence à l'huile dont la sensation au toucher a été obtenue par expérience. L'axe *effet* fait référence aux mots qui décrivent les sensations obtenues par réaction de la surface touchée, ou en conséquence du contact – par exemple, *plaisant* ou *fragile*. Cet axe implique souvent un jugement de la part de l'individu, qui peut donc directement indiquer une certaine subjectivité dans l'expression d'un individu, ou même un caractère *hédonique*. L'axe *propriété physique* fait référence aux mots qui décrivent les propriétés d'une surface, comme celles qui pourraient être directement mesurées. Cet axe renvoie plus directement à des notions objectives de la description : le descripteur *rugueux* peut par exemple renvoyer à la mesure de rugosité d'une surface.

Par ailleurs, un autre type de catégorisation utilisant la structure sémantique du vocabulaire sensoriel peut par exemple être observé dans les études de Dingemanse et Majid (2012) et de Choi et Jun (2007). Le caractère systématique et le potentiel d'automatisation de ces approches leur procure un grand avantage dans le but de rendre générique la description des sensations. En particulier, l'emploi de méthodes de regroupement sémantique (ou *clustering*) basées sur les notions de similarité sémantique présente un grand intérêt dans le cadre de nos travaux.

1.5 L'interprétation des sensations pour la perception des anomalies

L'interprétation des sensations qui forme la perception fait appel à une opération cognitive complexe du cerveau humain. Comme nous l'avons introduit précédemment, cette opération vise à analyser les sensations perçues et à les comparer, soit à des états mentaux préalablement enregistrés dans le cortex cérébral (grâce à l'expérience de l'individu), soit à des sensations perçues simultanément (par exemple lorsque l'individu touche deux objets en même temps). La plupart du temps, cette action cognitive est inconsciente et peut amener l'individu à reconnaître des similitudes ou des différences entre deux perceptions, mais également à ressentir des préférences.

Utiliser la perception d'un opérateur lors du contrôle au toucher d'un produit pour en vérifier sa qualité et sa **conformité**, en accord avec des exigences attendues, peut ainsi s'avérer très complexe. En effet, il est impossible pour une personne d'éviter le passage de sensation à perception, car l'implication de l'expérience ou du vécu des individus (préférences, culture, etc.) est inconsciente. Dans le cadre du contrôle de la qualité sensorielle, il faut donc parvenir à cadrer ce passage afin d'obtenir des résultats qui soient les plus objectifs possibles. Le fait de se baser sur les sensations est un premier point dans ce sens. En plus d'une bonne description des sensations, parvenir à réaliser cette tâche de contrôle de manière **répétable** (plusieurs fois pour un même individu) et **reproductible** (d'un individu à un autre) nécessite au préalable une bonne maîtrise de la perception humaine dans le contrôle. La méthode que nous proposons, détaillée dans le chapitre 4, s'appuie sur certains points majeurs de la littérature et propose de nouveaux éléments pour améliorer les performances de contrôle.

1.5.1 La perception sensorielle des produits

La perception humaine constitue à la fois un moteur et un frein dans la définition de la qualité sensorielle d'un produit. Elle peut en effet participer de manière bénéfique à la conception d'un produit en vue de mieux satisfaire les attentes du client (par exemple, dans le cas du bracelet d'une montre, la perception du concepteur va l'aider à adapter les spécifications géométriques du bracelet pour le rendre confortable lorsqu'il sera au poignet du client). En revanche, la subjectivité qui découle des préférences d'un individu, peut être à l'origine de nombreux dysfonctionnements lorsqu'elle intervient au moment du contrôle ou de la validation du produit. Lors d'un contrôle par toucher, un même bracelet pourra ainsi être jugé conforme par un contrôleur et non conforme par un autre parce que les deux contrôleurs n'ont pas la même interprétation de leurs sensations dû à leur préférences respectives. Il ne partagent donc pas la même perception.

Les méthodes d'analyse sensorielle, décrites par une série de normes ISO et AFNOR (Depledge, 2009 ; ISO 11035, 1994 ; ISO 5492, 2008 ; ISO 8586, 2012 ; ISO 13299, 2016 ; ISO 6658, 2017) proposent des cadres méthodologiques avec deux buts principaux : analyser les préférences et mesurer les sensations. L'analyse des préférences s'intéresse à l'évaluation de l'appréciation, du caractère hédonique des produits vis à vis des utilisateurs potentiels. L'évaluation des sensations vise plutôt à caractériser les sensations perçues de la manière la plus objective possible, afin d'effectuer une mesure sensorielle. Pour ce faire l'analyse sensorielle propose un certain nombre de directives pour le choix du vocabulaire (nous en avons vu certaines dans la section 1.4), la conduite d'expérimentations

avec panels d'utilisateurs, etc. Ces méthodes sont employées plus ou moins directement dans de nombreuses études, souvent à des fins de conception de produits (Avanzini, Mantelet, & Aoussat, 2017; Avanzini, Mantelet, Aoussat, & Jeanningros, 2018; Dumenil-Lefebvre, 2006; Passaro, 2014), ou parfois dans un cadre de contrôle de la qualité perçue (Guerra et al., 2006; Pillet, Guerra, & Maire, 2009). Dans ce deuxième cas, c'est la mesure sensorielle objective qui a un intérêt car elle vise à éviter la prise en compte des préférences des individus (ici les personnes contrôlant un produit) afin d'améliorer les performances de contrôle.

1.5.2 Parallèles entre contrôle visuel et contrôle haptique

Dans le domaine du contrôle visuel, plusieurs études récentes ont mis en évidence les problèmes induits par la subjectivité de la perception humaine. Les travaux réalisés au laboratoire SYMME (Baudet, 2012; Desage, 2016; Guerra, 2008; Le Goic, 2012; Pitard, 2016) ont par exemple abouti à des avancées majeures dans l'amélioration des performances du contrôle esthétique des produits en proposant des méthodes ayant pour objectif de réduire l'implication des préférences des individus en maîtrisant le processus de perception.

Nous avons donc cherché à voir si ces résultats pouvaient s'appliquer au contrôle par toucher des produits. La vue et le toucher permettent tous deux l'acquisition d'informations provenant de notre environnement, et plus spécifiquement d'informations spatiales et de caractéristiques physiques des objets. Bien que de nombreuses études insistent sur l'impact de la perception visuelle du produit sur la satisfaction du client et ses préférences (Baudet et al., 2013; Dumenil-Lefebvre, 2006; Guerra, 2008; Passaro, 2014), d'autres études montrent également l'importance de la perception tactile ou visio/tactile. L'étude de Passaro (Passaro, 2014, p. 161) montre par exemple dans le cadre d'une analyse des préférences des clients concernant les produits plastiques grainés d'un habitacle automobile que le terme *toucher* est deux fois plus utilisé que le terme *visuel*.

Dans le cas du contrôle de la surface des produits, les sens impliqués sont généralement la vue et le toucher, utilisés distinctement ou ensemble. Plusieurs études ont comparé la perception visuelle et la perception haptique. Elles révèlent que malgré une précision moindre de l'information haptique comparée à la vision pour la caractérisation des propriétés spatiales des objets (Simonnet, Guinard, & Tisseau, 2005) (la vue fournissant en effet une approche plus globale), le toucher permet une sensibilité accrue aux caractéristiques plus fines d'une surface (Heller, 1989a, 1989b; Klatzky et al., 1985). Par exemple, la perception tactile se révèle plus appropriée dans le but de discriminer des papiers abrasifs dont le grain est très fin (entre P1000 et P6000). La littérature montre également une bonne complémentarité des deux sens lorsqu'ils sont sollicités ensemble, simultanément ou successivement, pour construire une perception globale d'un objet (Heller, 1989a; Lebaz, 2011; S. J. Lederman, Klatzky, Chataway, & Summers, 1990).

Ces études confirment la supériorité du toucher dans la discrimination des textures, mais n'indiquent pas que le toucher serait plus performant que les deux associés, en considérant le contrôle global d'un produit. De plus, certaines propriétés des surfaces sont uniquement accessibles à la perception humaine au travers d'un contact physique. De ce fait, le sens du toucher est nécessaire dans la perception de ces éléments, qui sont par ailleurs souvent essentiels aux interactions humain-objet (par exemple la fermeté d'un gobelet en plastique, le caractère collant d'une surface, etc.).

Comme la perception visuelle, la perception haptique peut ne pas refléter de manière

exacte la réalité. De même qu'il existe des illusions qui peuvent tromper l'individu examinant visuellement la surface d'un objet, il existe des illusions qui peuvent le tromper au moment du contact avec un objet (Révész, 1950 ; Suzuki & Arashida, 1992). Chaque perception peut également être erronée et cela même en l'absence d'illusions visuelles et haptiques. Par exemple, la perception visuelle de la masse d'un objet peut être altérée par la taille, le type de matériau ou la densité apparente de cet objet. La notion de perception prend une nouvelle fois tout son sens car il ne s'agit pas d'une sensation haptique qui est élaborée par l'individu mais bien d'une perception résultant de son interprétation de cette sensation. La perception émanant d'un autre sens peut ainsi jouer un rôle déterminant pour la correction d'éventuelles erreurs d'interprétation. Ainsi, la perception visuelle de la masse sera corrigée si cet objet en question est pris en main et soupesé par l'individu (Hatwell et al., 2003), la perception haptique corrigeant la perception visuelle. Nous retenons également de ces études que le sens du toucher trompe globalement moins que la vue. Dans un contexte de contrôle de la qualité sensorielle, le toucher permet de confirmer et, dans certains cas, de corriger la perception visuelle (Klatzky et al., 1993).

1.5.3 Perception des anomalies haptiques

Bien que la perception visuelle soit souvent la plus sollicitée, certains types de contrôle requièrent l'utilisation de la perception haptique, notamment dans le cas où les caractéristiques souhaitées ne peuvent pas être perçues visuellement (ou pas assez précisément) et relèvent du sens du toucher. Les contrôleurs sont alors parfois amenés à effectuer des mouvements exploratoires avec leurs mains sur les produits pour obtenir une perception et déduire si cette perception correspond à un état normal ou anormal. L'état normal correspondant à la cible des caractéristiques souhaitées pour la surface du produit, tandis que l'état anormal constitue un écart par rapport à cette cible. Ce sont la détection et la mesure de cet état anormal qui constituent le point critique de la tâche de contrôle, car si la méthode utilisée ne permet pas de mettre suffisamment de côté les préférences d'un individu pour cette tâche, le résultat du contrôle est impacté par la subjectivité des opérateurs. Tout d'abord, la manière de décrire les anomalies est essentielle. Dans le contrôle visuel les études de Guerra (2008) et Baudet (2012) ont permis d'aboutir à la proposition d'une liste réduite d'anomalies visuelles communes à différents domaines d'application tels que la joaillerie et l'ameublement. Les anomalies proposées sont au nombre de quatre : la *marque*, l'*hétérogénéité*, la *pollution* et la *déformation*. Couplées à une maîtrise de l'exploration, les méthodes proposées ont permis de réduire la variabilité de détection et de jugement des anomalies sur les cas d'étude menés, c'est à dire d'augmenter la *répétabilité* et la *reproductibilité* du contrôle.

Bien que ces anomalies puissent être transposées au sens du toucher – on imagine par exemple aisément la capacité de détection d'une *marque* au toucher –, elles ne seraient pas suffisantes à la description complète des anomalies haptiques. Elles répondent en effet au cas d'un écart local sur la surface, par opposition à l'écart par rapport à une référence et à l'écart par rapport aux intentions du concepteur mentionnés par Baudet (2012). La définition des anomalies haptiques présupposent en général d'avoir une bonne connaissance de l'état normal ou souhaité de la qualité de surface. Par exemple, pour une surface dont une caractéristique souhaitée est d'être *lisse*, la perception d'un état de surface *rugueux* sera anormal. Par contre si cette caractéristique souhaitée est d'être *rugueux*, alors la perception d'un état de surface *lisse* sera anormal.

1.6 De l'anomalie au défaut

La différenciation entre anomalie et défaut est encore peu intégrée dans l'industrie. Cela est montré par l'utilisation courante de **défauts** qui pourraient en réalité s'appeler des « **anomalies** » car elles répertorient des anomalies qui peuvent devenir des défauts en cas de non acceptabilité. Ces notions sont pourtant essentielles à la réduction de la variabilité de contrôle car elles relèvent directement de la manière dont les informations sont traitées lors du processus de perception.

Un défaut est défini dans les normes comme « une déviation d'une caractéristique [sensorielle] par rapport à son niveau ou état visé (généralement spécifié), et qui est suffisamment importante pour entraîner la non satisfaction d'une exigence » (AFNOR BP X10-040, 2003). La première moitié de cette phrase correspond en réalité à la notion d'anomalie (Baudet, 2012 ; Guerra, 2008) qui traduit une différence par rapport à un état cible de la perception d'un individu. La seconde partie de cette phrase précise la notion de défaut qui résulte de l'interprétation de l'anomalie au regard de la **conformité** d'un produit. C'est la mesure de cette déviation qui donne la gravité de l'anomalie et permet de juger de l'acceptabilité d'un produit. Généralement dans le domaine du contrôle qualité, la définition de tolérances permet de préciser la notion de « déviation suffisamment importante » exprimée dans la norme. Néanmoins, la mesure de déviation et la définition précise de bornes d'acceptabilité ne sont pas faciles à réaliser en considérant la perception humaine.

Les recherches menées au laboratoire SYMME ont apporté plusieurs réponses pour l'amélioration du contrôle esthétique des surfaces. La distinction entre anomalie et défaut, ainsi que la séparation du processus de contrôle en plusieurs étapes distinctes (l'exploration, l'évaluation et la décision : voir la figure 1.11) constituent deux points de réponse importants. En particulier, les trois étapes de ce processus de contrôle proposé par Guerra (2008) correspondent aux étapes de perception, de quantification et de jugement de l'anomalie. Un autre point de réponse concerne la maîtrise de l'exploration grâce à une analyse des facteurs d'influence de la perception. La proposition de grilles d'évaluation modulant l'exploration visuelle afin de quantifier l'intensité des anomalies est le résultat pratique de ces propositions afin de fournir des outils directement utiles au contrôleurs et efficaces pour l'amélioration des performances du contrôle.

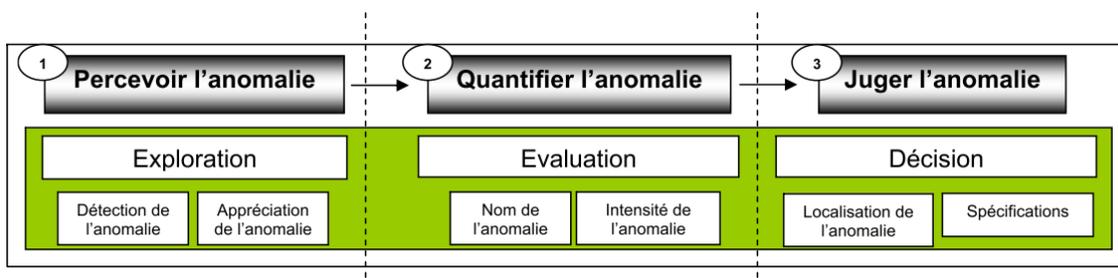


Figure 1.11 – Segmentation du processus de contrôle visuel (Guerra, 2008, p.86)

L'application de ces techniques au contrôle haptique est possible car elles correspondent au processus de perception pour le contrôle sensoriel décrit en figure 1.7. Il s'agit en effet d'explorer une surface afin de générer des sensations. Il s'agit ensuite de détecter des anomalies et d'évaluer leur gravité en fonction des sensations perçues et des spécifications de contrôle préalablement définies (qui incluent notamment une description de l'état cible de la surface). Enfin, il s'agit de décider de la conformité du produit en analysant les résultats de l'évaluation des anomalies au regard des tolérances qui sont les limites d'acceptabilité préalablement définies.

1.7 Conclusion

Dans un contexte de contrôle sensoriel dans l'industrie, nous avons vu dans ce chapitre que le lien entre, d'une part les notions de perception sensorielle, et d'autre part la définition d'exigences de qualité claires et objectives, est difficile à établir. Nous avons ainsi identifié la nécessité d'apporter aux industriels des méthodes et des outils pouvant les aider à formuler ces exigences et à mettre en place le contrôle sensoriel, en particulier concernant le sens du toucher.

Par conséquent, les points majeurs développés dans cette étude sont :

1. une formalisation des connaissances du toucher et en particulier une modélisation de la description des sensations,
2. une organisation et une représentation de ces connaissances,
3. une exploitation des deux premiers points dans le but de mettre en place des spécifications de contrôle et de juger de la conformité des produits,
4. un outil logiciel constitué d'un système à base de connaissances, visant à synthétiser la démarche.

Vers une formalisation des connaissances du contrôle haptique

La littérature a montré la possibilité de structurer la description des perceptions sensorielles. Les méthodes existantes ne fournissent cependant pas une représentation complète et générique du vocabulaire correspondant au sens du toucher. Les liens pouvant exister entre les mots de ce vocabulaire et les possibles catégories de sensations ne sont pas non plus établis. De plus, l'application manuelle des méthodes d'analyse sensorielle est coûteuse et particulièrement chronophage pour une utilisation sur de nombreux produits. Nous souhaitons mieux exploiter la complexité et la richesse de la description sémantique des sensations afin de proposer un modèle qui puisse aider les industriels à définir des spécifications adaptées et standardisées pour le contrôle haptique. La formalisation des connaissances nécessaires au contrôle haptique est la première étape de ce travail. Nous proposons ainsi une méthode pour formaliser et structurer la description sensorielle afin de créer un modèle sémantique permettant de rendre systématique l'application du contrôle haptique. D'autres connaissances utiles à ce type de contrôle sont également abordées, tels que les modes préférentiels d'exploration manuelle, ou encore les capteurs qui pourraient être adaptés à une mesure instrumentée.

Vers une organisation des connaissances et un système d'enrichissement

Avec la volonté de structurer, de rendre générique l'application des méthodes proposées et de créer des outils qui apportent une expertise pouvant être enrichie, nous proposons une organisation et une représentation des connaissances du contrôle haptique. Les technologies sémantiques, avec en particulier la notion d'**ontologie**, fournissent des méthodes particulièrement appropriées pour la représentation des connaissances.

Vers une exploitation du modèle de connaissances pour le contrôle

L'exploitation de ces connaissances, au travers de cette représentation, a pour but la mise en place de méthodes de contrôle permettant de juger de la conformité des produits. Il s'agit donc, grâce à une maîtrise du processus de perception, de passer des sensations aux anomalies puis aux défauts en maximisant l'objectivité des opérateurs et en minimisant la variabilité du contrôle. C'est l'objet de notre troisième proposition. Si certaines méthodes instrumentées commencent à émerger, la majeure partie des cas de contrôle par toucher actuels sont encore réalisés manuellement. Nous nous sommes donc concentrés sur la proposition de méthodes adaptées à l'humain. Les principes introduits dans cette étude, notamment concernant la modélisation et l'organisation des connaissances, permettent néanmoins une anticipation des perspectives d'instrumentation et d'automatisation de ce type de contrôle.

Vers le développement d'un outil à base de connaissances

Enfin, nous développons un système informatique intégrant les méthodes proposées et s'appuyant sur une base de connaissances, dans le but d'aider les industriels dans la démarche de mise en œuvre du contrôle haptique. Couplé à un système de gestion des connaissances, le déploiement de cet outil logiciel permettra également de valider la modélisation proposée ainsi que de l'enrichir.

Introduction des modules outils proposés

Nos propositions sont résumées par les modules présentés sur la figure 1.12 et sont détaillées successivement dans les chapitres 2, 3 et 4. Ces modules constituent également des outils intégrés au système informatique développé dans le cadre de ces travaux et décrit dans le chapitre 5.

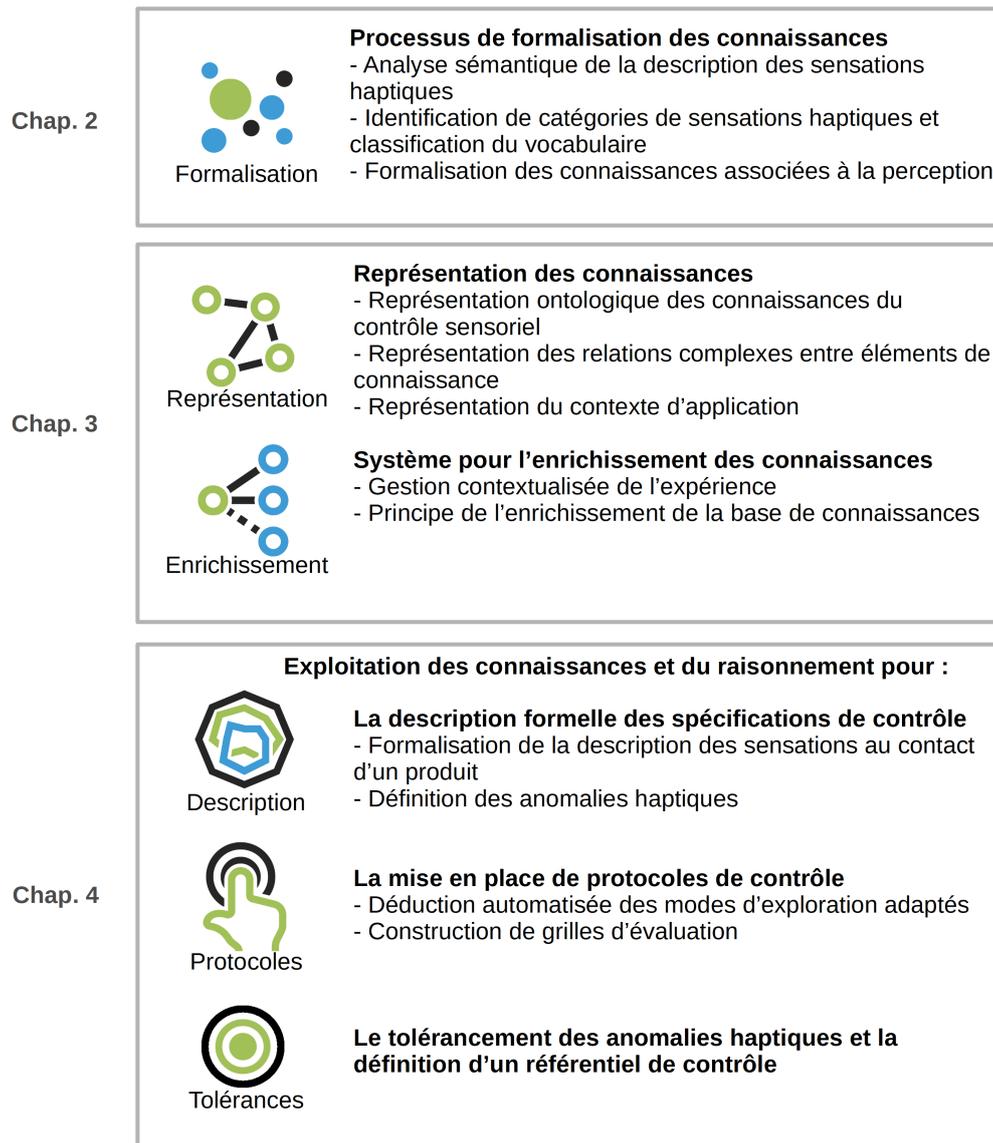


Figure 1.12 – Synthèse des éléments présentés dans les chapitres 2, 3 et 4

2

Définition et formalisation des connaissances haptiques

Sommaire

2.1	Introduction	34
2.2	Un modèle de description des sensations haptiques	36
2.2.1	Analyse de sources sémantiques	38
2.2.2	Pré-filtrage par pertinence et précision	41
2.2.3	Clustering : regroupement sémantique	44
2.2.4	Post-filtrage par indépendance et discriminance	47
2.2.5	Sensations haptiques élémentaires	48
2.2.6	Critères pour l'exploration manuelle des surfaces associés aux sensations élémentaires	51
2.2.7	Quantification de la description sensorielle	52
2.2.8	Modèle de description et classification	54
2.2.9	Synthèse du modèle obtenu	58
2.3	Validation du processus de formalisation	59
2.3.1	Généricité du modèle	59
2.3.2	Indépendance des catégories de sensation	60
2.3.3	Robustesse de la méthode	61
2.3.4	Cohérence et intérêt par rapport aux méthodes existantes	64
2.4	Conclusion	67

2.1 Introduction

Nous avons vu, dans le chapitre précédent, que le contrôle haptique implique une bonne compréhension des éléments de connaissances composant le processus de perception, ainsi qu'une sélection rigoureuse des attributs à percevoir en fonction de la problématique de contrôle visée. Nous avons en particulier insisté sur la notion de **sensation** parce qu'elle occupe un rôle central dans ce processus de perception.

La description des sensations, essentielle pour l'analyse sensorielle, l'est tout autant pour le contrôle sensoriel d'un produit. L'obtention d'une mesure sensorielle la plus objective possible passe en effet par une bonne connaissance de ce qui doit être contrôlé sur la surface d'un produit. Il est important que l'ensemble des personnes concernées par la qualité du produit partagent une même compréhension des sensations à percevoir et donc des anomalies à détecter. Plus précisément, et dans le cas spécifique du toucher, la mise en place du contrôle sensoriel d'un produit implique de savoir quelles sensations haptiques doivent être contrôlées et comment les décrire. Elle suppose de disposer d'une méthode de quantification de l'intensité de ces sensations pour être en mesure de définir les anomalies et de pouvoir ensuite correctement les détecter. Enfin, elle implique également d'autres connaissances indispensables pour la mise en place du contrôle, qui doivent être adaptées aux sensations à percevoir et donc aux anomalies à détecter.

Ce chapitre détaille une méthode d'analyse semi-automatisée que nous proposons pour décrire les sensations haptiques de manière formalisée, les liens qui s'établissent entre le vocabulaire et les sensations haptiques élémentaires identifiées, ainsi que les éléments de connaissances nécessaires au contrôle haptique d'un produit.

Les cas industriels sur lesquels nous avons travaillé nous ont montré que la manière de décrire les sensations a un impact déterminant sur la qualité des résultats d'un contrôle haptique. Dans le cas d'étude réalisé en joaillerie sur des bracelets de montres de luxe, les différents services travaillant sur les produits (marketing, méthodes et qualité) ne s'appuyaient pas sur le même vocabulaire pour décrire la qualité attendue ou pour décrire les anomalies. A titre d'exemple, la figure 2.1 donne la liste des mots utilisés et leurs fréquences respectives d'utilisation. En plus de la grande diversité de mots, nous avons noté que certains échantillons étaient décrits de manière différente (par exemple, un échantillon était décrit comme *creusé* par un contrôleur alors qu'il était décrit comme *agressif* par un autre contrôleur). Certains des mots exprimaient plutôt une préférence (par exemple *agréable*) ou une appréciation subjective du produit (*viril* par exemple). Certains mots s'attachaient plutôt à décrire une caractéristique physique du produit (par exemple *profond*). Enfin, les termes étaient également souvent associés à des adverbes pour apporter une précision supplémentaire à la description (par exemple, *trop lisse*). Ce vocabulaire et la manière de l'utiliser avaient pour conséquence une variabilité importante des résultats du contrôle que nous avons mesurée à l'aide du test R^2 & E^2 (J.-L. Maire et al., 2013a) (l'annexe A donne un extrait des résultats de ce test ainsi que les mots fournis par les contrôleurs).

En vue d'améliorer la description des sensations, ainsi que celles des anomalies présentes sur un produit, la plupart des méthodes utilisées en analyse sensorielle recommandent qu'un groupe d'experts soit constitué et que ce groupe élabore de manière consensuelle une liste de mots qui soit à la fois la plus réduite possible, la mieux adaptée à la caractérisation souhaitée et la plus objective. En pratique, cette phase se révèle cependant parfois difficile et longue à réaliser. Souvent spécifique à un produit, elle doit de plus

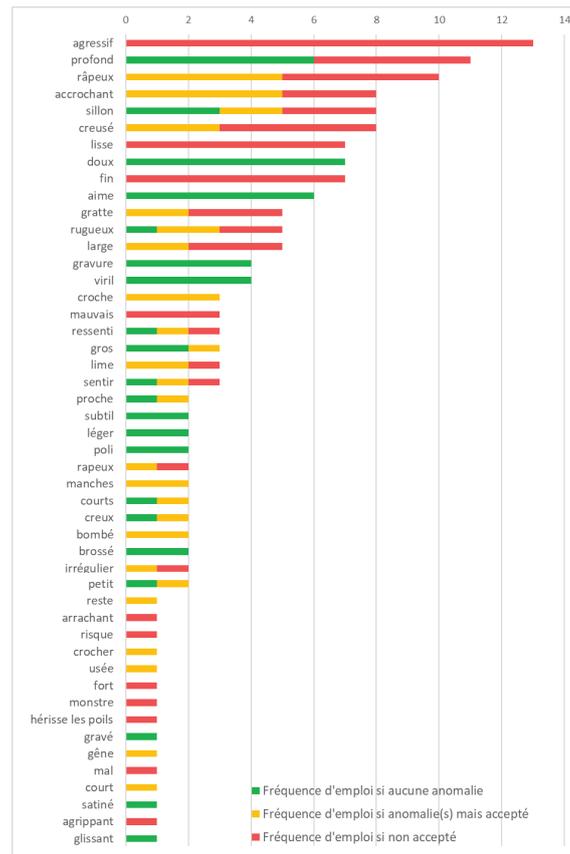


Figure 2.1 – Fréquence d'utilisation des mots (cas d'étude sur les bracelets de montres de luxe)

être appliquée à nouveau pour chaque type de produit à décrire. Nous nous sommes donc interrogés sur la manière de simplifier et d'accélérer cette phase de définition du vocabulaire à utiliser. Cela nous a amené à développer **un modèle de connaissances** sur lequel s'appuyer pour spécifier les connaissances nécessaires à la mise en place d'un contrôle haptique. Les objectifs à atteindre que nous nous sommes fixés pour ce modèle étaient les suivants :

- Définir les connaissances nécessaires à une mise en place systématique du contrôle haptique dans un contexte industriel,
- Fournir une description de l'ensemble des sensations haptiques,
- Être suffisamment générique pour être utilisable dans le cas de la mise en place d'un contrôle haptique de tous types de produits, ainsi que dans d'autres cas d'utilisation (définition des spécifications haptiques lors de la conception d'un nouveau produit par exemple),
- Donner des éléments de description répondant aux critères définis par l'analyse sensorielle (exhaustivité, pertinence, précision, indépendance et discriminance),
- Faire le lien entre les sensations haptiques et d'autres éléments de connaissances du contrôle sensoriel (modes et zones d'exploration, effecteurs à privilégier, capteurs, etc.).

Pour répondre à ces objectifs et pour construire ce modèle, nous avons fait le choix de nous appuyer sur des méthodes et techniques de l'analyse sémantique. Nous détaillons dans la prochaine section les différentes étapes de construction de ce modèle.

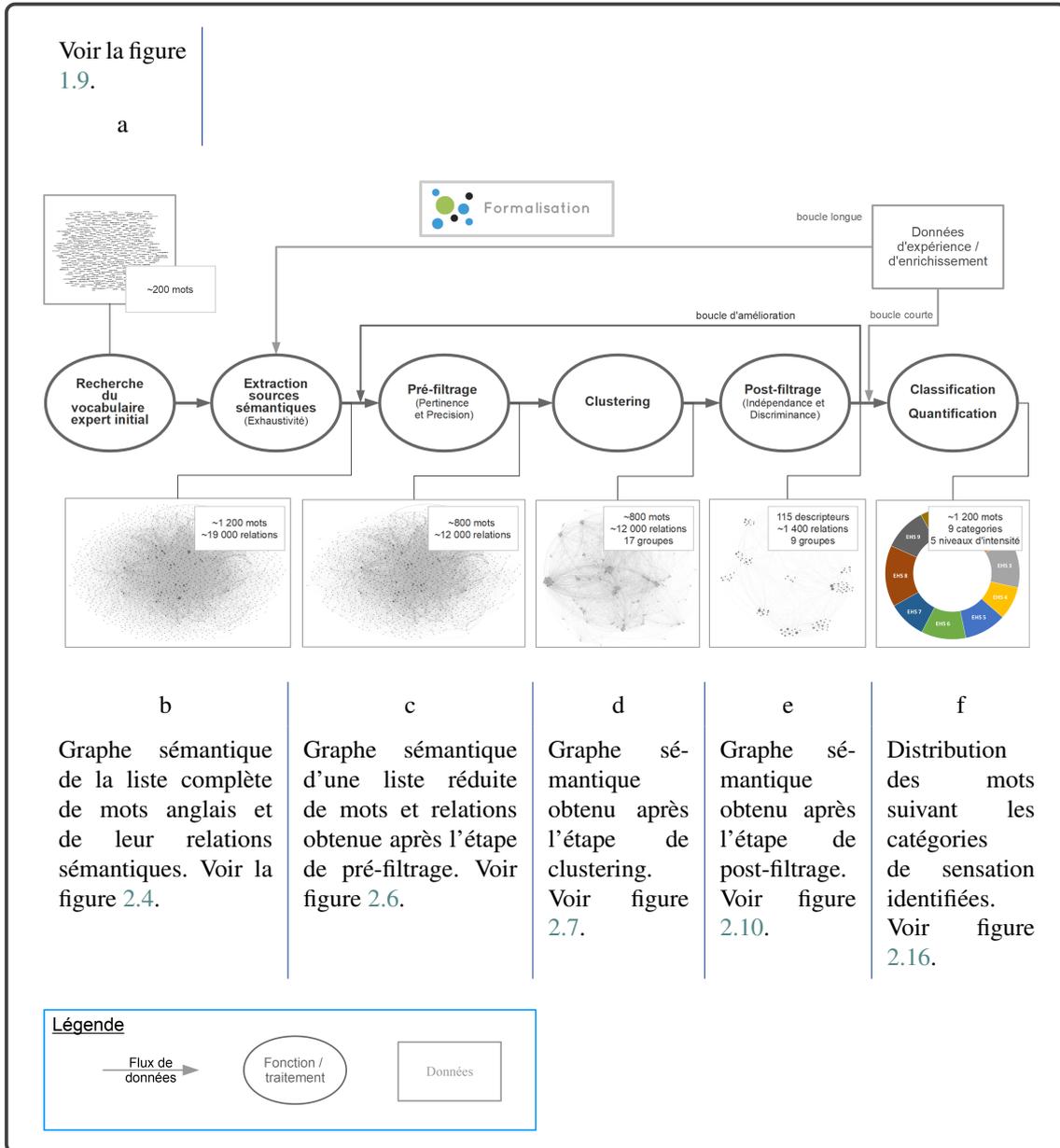
2.2 Un modèle de description des sensations haptiques

Pour construire un modèle de description des sensation haptiques, nous avons cherché à prendre en compte l'ensemble du vocabulaire utilisé pour décrire les sensations perceptibles lors du toucher d'un produit. La méthode que nous avons utilisée s'appuie notamment sur une analyse sémantique semi-automatisée des mots proposés dans la littérature et relatifs au sens du toucher. Cette analyse construit des groupes de mots en fonction de leurs proximités sémantiques, chacun de ces groupes correspondant dans notre cas à une sensation haptique élémentaire spécifique. Au-delà de cette liste de sensations, le modèle obtenu permet une classification du vocabulaire sur ces sensations élémentaires, ainsi que sur une échelle d'intensité de ces sensations, tout en conservant la trace des relations sémantiques qui s'établissent entre les mots. Enfin, ce modèle met en relation ces mots et sensations avec les autres éléments de connaissances nécessaires au contrôle. Nous proposons donc un processus complet visant à construire un modèle robuste pour la formalisation de la description de l'ensemble des sensations perceptibles lors d'un contrôle au toucher. La figure 2.2 résume et illustre l'enchaînement des différentes étapes de construction de ce modèle. Ce processus constitue le module **Formalisation** de l'outil développé. La clé de lecture est donnée en dessous de ce diagramme et fait référence au formalisme de la méthodologie CommonKads (Schreiber et al., 2000).

Cette section détaille les différentes étapes de ce processus, depuis la recherche exhaustive de vocabulaire et de relations sémantiques, jusqu'à la classification et la quantification des mots suivant les catégories identifiées. Les étapes du processus répondent aux recommandations de l'analyse sensorielle (ISO 8586, 2012) concernant les critères de sélection des descripteurs : *exhaustivité*, *pertinence*, *précision*, *indépendance* et *discriminance*.

Dans un premier temps, différentes sources sont explorées dans le but de rassembler, de la manière la plus exhaustive possible, le vocabulaire correspondant, directement ou indirectement, à la description des sensations haptiques. Pour parvenir à une liste ne comportant que les mots les plus appropriés à une description sensorielle, un pré-filtrage est réalisé pour ne retenir que les mots pertinents et précis. Un algorithme de regroupement sémantique¹⁶ est ensuite appliqué pour établir des groupes de mots. Un filtrage des groupes par pertinence est alors également appliqué, pour ne conserver que ceux en relations avec le sens du toucher. L'étape suivante du processus consiste à sélectionner les mots les plus indépendants et discriminants au regard des groupes obtenus. Au final, chaque groupe retenu à la fin du processus correspond à ce que nous désignons comme une **sensation haptique élémentaire** (EHS pour *Elementary Haptic Sensation*) constituée d'un ensemble de mots représentatifs de chaque sensation et que nous désignons comme des descripteurs de référence (ces descripteurs sont utilisés pour la classification de l'ensemble des autres mots relatifs au toucher).

16. *clustering* en anglais



Les illustrations (b), (c), (d) et (e) de cette figure sont obtenues en utilisant l'outil graphique Gephi¹⁵.

Figure 2.2 – Les étapes de la méthode de construction du modèle de description des sensations haptiques - module formalisation

2.2.1 Analyse de sources sémantiques

La première étape de ce processus (figure 2.2) consiste à rechercher, de la manière la plus exhaustive possible, l'ensemble des mots liés à la description des sensations perçues au toucher. Une première liste de près de 400 mots (en français et en anglais) a d'abord été obtenue à partir d'une étude bibliographique menée sur un ensemble d'articles publiés entre 1968 et 2017, dont la liste est détaillée dans le tableau 1.2 du chapitre 1. Cette liste a ensuite été étendue grâce à l'utilisation d'autres sources sémantiques plus généralistes. Les dictionnaires en ligne Wordnet¹⁷ et le Thesaurus¹⁸ pour les mots anglais, la base Wolf (Sagot & Darja, 2008) ainsi qu'un dictionnaire dédié au sensoriel pour les mots français (Bassereau & Charvet-Pello, 2011), ont ainsi permis d'élargir le champ de recherche de vocabulaire. D'une part, plus de 2400 mots français et anglais ont été ajoutés à cette liste (pour rester dans le domaine du toucher, seuls les mots en relation avec les mots de la liste initiale ont été ajoutés). D'autre part, les relations sémantiques entre ces mots ont été extraites (*synonymes*, *antonymes*, *holonymes*, *méronymes*, *hyperonymes* et *hyponymes*).

Une analyse de co-occurrence a également été réalisée sur les textes du corpus listés dans le tableau 1.2 afin de mettre en évidence d'autres relations possibles entre les mots, que nous désignons comme des relations de correspondance textuelle. Celles-ci sont obtenues en analysant la proximité des mots dans les textes. Les mots identifiés comme étant proches les uns des autres dans ces textes ont ainsi été considérés comme ayant un lien sémantique potentiel, mais a priori non identifié (sauf si deux mots possèdent déjà une relation identifiée auparavant). Nous avons considéré que deux mots sont proches s'ils ont été trouvés dans la même phrase. Étant donné les différentes sources utilisées, deux mots peuvent être reliés par plusieurs relations de différents types.

Par ailleurs, dans le but d'exprimer un niveau de confiance sur les relations sémantiques identifiées, un coefficient flou a été introduit pour chaque relation. En effet, la définition des associations floues donnée par Zadeh (1965) fait parfaitement sens dans ce contexte d'analyse sémantique, en raison de la nature parfois incertaine des relations obtenues. On attribue les niveaux de confiance les plus élevés (coefficient proche de 1) aux relations obtenues soit manuellement des textes, soit automatiquement à partir des dictionnaires. À l'inverse, des niveaux de confiance plus faibles ont été attribués aux relations obtenues via les analyses textuelles automatisées en raison des possibles erreurs du calcul de co-occurrences. La proximité et le nombre de co-occurrences (nombre de fois que deux mots sont trouvés à proximité l'un de l'autre), donne une indication du niveau de confiance que l'on peut avoir dans la relation de correspondance textuelle.

La figure 2.3 illustre le type de graphe sémantique utilisé dans le cadre de nos travaux (pour plus de détails, Schaeffer (2007) donne une bonne introduction à la théorie des graphes). Dans notre cas, un point (aussi appelé *node* ou *vertex* dans la littérature) représente un mot (*word* en anglais) tandis qu'une ligne (aussi appelée *edge*) représente une relation sémantique entre deux mots. La taille du point et de la police d'écriture donne également une indication sur le degré de relation sémantique du mot, aussi appelé *degré sémantique*, celui-ci résultant du nombre de relations et de l'intensité des relations (liens ou *edges* en anglais) que ce mot possède avec les autres mots du graphe. L'épaisseur de chaque ligne exprime l'intensité des relations sémantiques entre les mots. Les différents types de relations ne sont pas ici différenciés visuellement.

17. WordNet : <https://wordnet.princeton.edu/>.

18. Thesaurus : <http://www.thesaurus.com/>.

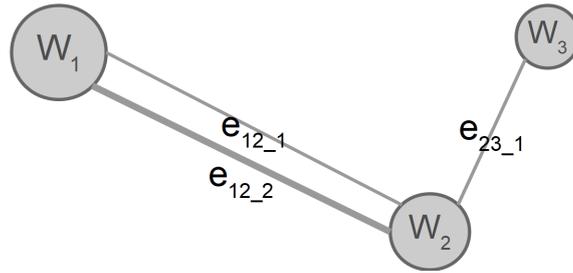


Figure 2.3 – Graphe sémantique (simplifié) des mots et des relations entre mots

L'équation 2.1 donne le calcul du **degré sémantique** d_i pour le mot w_i , c'est à dire le nombre de relations d'un mot vers les autres mots du graphe, pondérés par l'intensité de chaque relation.

$$d_i = \sum_{\forall j} [Ie_{ij}] \quad (2.1)$$

Avec :

- i et j respectivement l'indice des mots w_i et w_j ,
- d_i le **degré sémantique** du mot w_i ,
- Ie_{ij} l'intensité du lien entre deux mots w_i et w_j .

L'équation 2.2 exprime le calcul de l'intensité Ie_{ij} du lien entre deux mots w_i et w_j , en fonction des coefficients de confiance individuels ce_{ijk} de chaque relation existant entre ces deux mots. Nous utilisons en effet les coefficients de confiance pour calculer l'intensité des relations car, en considérant indifféremment les différents types de relation, ces coefficients expriment également une notion de proximité entre les mots. Ainsi, plus le nombre et le coefficient de confiance des relations entre deux mots sont élevés (plus la confiance dans le lien entre deux mots est élevée), plus l'intensité de la relation entre ces deux mots est élevée.

$$Ie_{ij} = Ie_{i-j} = Ie_{j-i} = \sum_{\forall k} ce_{ijk} \quad (2.2)$$

Avec :

- Ie_{ij} l'intensité du lien entre deux mots w_i et w_j ,
- k l'indice des relations entre ces deux mots.

L'équation 2.3 donne par ailleurs le calcul du coefficient de confiance global du lien entre deux mots w_i et w_j . Il correspond à la valeur maximum parmi les coefficients de confiance de toutes les relations entre ces deux mots. Contrairement à l'intensité de sensation qui peut être supérieure à 1, le coefficient de confiance global du lien entre deux mots est un coefficient flou variant entre 0 et 1.

$$Ce_{ij} = Ce_{i-j} = Ce_{j-i} = \max_{\forall k} (ce_{ijk}) \quad (2.3)$$

Avec :

- Ce_{ij} le coefficient de confiance global du lien entre deux mots w_i et w_j .

Au total, plus de 2.800 mots (en français et en anglais) et 39.000 relations ont été identifiés durant cette première étape.

Si le processus a été appliqué de manière séparée pour chaque langue de manière à éviter le doublement de signification sémantique, une correspondance est toutefois possible entre les deux bases en ajoutant des liens de traduction. Dans cette section, nous ne décrivons que le travail réalisé sur la base de mots en langue anglaise. La figure 2.4 montre le graphe sémantique obtenu (1.233 mots, 18.927 relations sémantiques). Parmi les relations sémantiques, on compte 1.340 synonymies, 518 antonymies, 177 hypernymies, 177 hyponymies, 6 holonymies, 6 méronymies et 16.703 correspondances textuelles (dont les coefficients flous sont plus faibles que les autres types de relations). La méthode de Fruchterman et Reingold (1991) a été utilisée afin d’organiser les mots sur ce graphe sans recouvrement et avec une zone plus dense au centre et moins dense sur les bords.

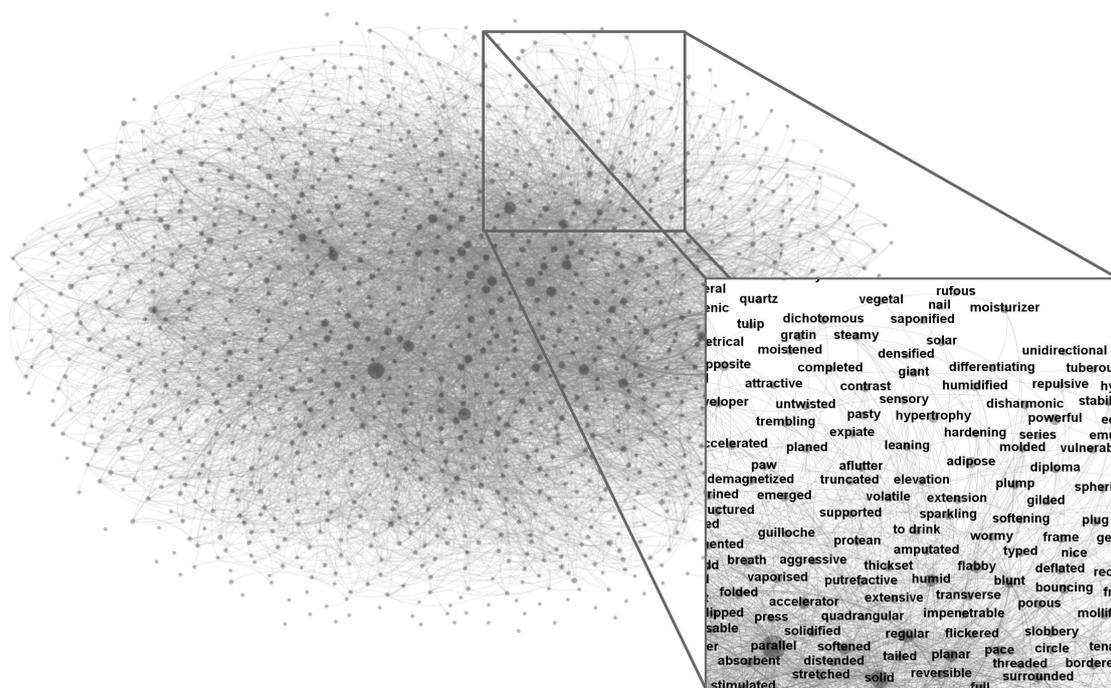


Figure 2.4 – Graphe sémantique de la liste de mots (langue anglaise)

2.2.2 Pré-filtrage par pertinence et précision

L'étape suivante du processus de construction du modèle vise à effectuer un pré-filtrage de la base de mots de manière à ne conserver que les mots les plus pertinents et précis pour la description des sensations haptiques. L'objectif est de retirer les mots qui ne sont pas suffisamment pertinents (n'étant pas appropriés au contexte de description des sensations haptiques), ainsi que ceux qui ne sont pas suffisamment précis (ne fournissant pas une description suffisamment claire et explicite des sensations haptiques).

La base de mots ayant été initialement construite à partir d'études dans le domaine du toucher, celle-ci a été considérée comme étant globalement pertinente vis-à-vis du sens du toucher. En revanche, il s'agissait d'enlever certains de ces mots qui ne sont pas en lien avec le contexte plus spécifique de la description des sensations haptiques. Il s'agissait également d'enlever les mots exprimant des préférences. Par ailleurs, si la quasi-totalité des mots sont pertinents lorsqu'ils sont associés à d'autres mots, ils ne le sont pas nécessairement lorsqu'ils sont examinés de manière individuelle et devaient donc être retirés de la liste. Enfin, il s'agissait d'éliminer la redondance de certains mots ayant le même sens mais ayant une forme grammaticale différente (adjectif et verbe par exemple). Nous décrivons ici plus en détail l'ensemble des actions de pré-filtrage qui ont été effectuées sur la liste initiale.

Filtrage des verbes et adverbes

Un premier filtrage a consisté à retirer les verbes de la liste car ils impliquent généralement une action (par exemple, *déformer* ou *alléger*) et non l'état d'une sensation à un instant donné. L'information fournie par les verbes est souvent redondante avec celle donnée par les adjectifs et les noms associés (par exemple *déformé* ou *léger*). Les adverbes sont également éliminés car ils se limitent le plus souvent à l'expression d'une précision par rapport à un autre mot (par exemple, *plus doux*).

Filtrage des mots à caractère hédonique

Le deuxième filtrage a consisté à éliminer les mots à caractère **hédonique**, c'est à dire ceux indiquant des préférences. Cette opération a d'abord été effectuée de manière globale en étiquetant les mots reconnus classiquement comme relevant de l'hédonisme (par exemple *plaisant/déplaisant* ou *agréable/désagréable*), puis en enlevant les mots en relation avec ces mots hédoniques (par exemple *agressif*).

Filtrage par degré sémantique

Le troisième type de filtrage a été effectué en utilisant la notion de **degré sémantique**, c'est-à-dire en utilisant le nombre pondéré de relations de chaque mot. Les hypothèses suivantes ont été considérées :

- Un mot qui a peu de relations avec les autres mots (un mot dont le degré sémantique est faible) est peu pertinent.
- Un mot ayant de très nombreuses relations avec les autres (un mot dont le degré sémantique est élevé) est peu précis.
- Le coefficient de confiance appliqué aux relations est utilisé comme un coefficient de pondération des relations.

Le retrait des mots non pertinents a donc été réalisé en recherchant les mots ayant des degrés sémantiques trop faibles. Pour déterminer le degré seuil en dessous duquel les mots peuvent être considérés comme non pertinents, il s'agit simultanément de maximiser le nombre de mots enlevés et de minimiser le nombre de relations retirées suite à la suppression de ces mots (les relations ne peuvent pas être retirées seules puisqu'elles dépendent des mots). Cela revient finalement à maximiser la valeur de pertinence R (*relevance* en anglais) donnée par la formule 2.4 pour le seuil de pertinence (d_R) (ou seuil bas de degré sémantique). Selon la littérature, ce calcul de pertinence peut être assimilé à l'inverse de la densité du graphe filtré (Schaeffer, 2007).

$$R(d_R) = \frac{\frac{W_{total} - W_{remaining}(d_R)}{W_{total}}}{\frac{E_{total} - E_{remaining}(d_R)}{E_{total}}} \quad (2.4)$$

Avec :

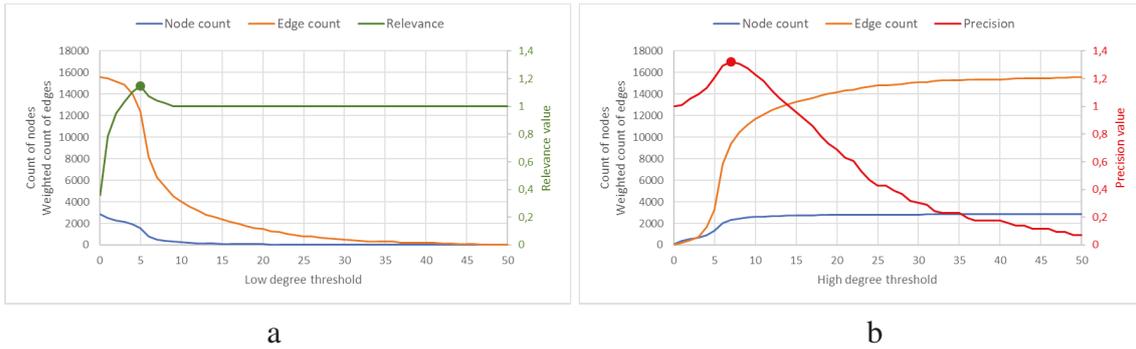
- W le nombre de mots (ou *words*) d'un ensemble considéré,
- E le nombre pondéré de relations (ou *edges*), c'est-à-dire la somme des Ie_{ij} pour un ensemble défini de mots,
- W_{total} et E_{total} respectivement les nombres de mots et de relations pondérées avant soustraction des mots non pertinents,
- $W_{remaining}$ and $E_{remaining}$ respectivement les nombres de mots et de relations pondérées restant après soustraction.

Le retrait des mots non suffisamment précis a été réalisé grâce à un procédé similaire, mais cette fois en inversant la formule précédente. En effet, il s'agit d'éliminer les mots ayant un degré sémantique trop élevé, c'est-à-dire ayant trop de relations avec les autres mots. Pour déterminer le degré seuil au dessus duquel les mots peuvent être retirés, il s'agit simultanément de minimiser le nombre de mots enlevés et de maximiser le nombre de relations qui sont éliminées suite à la suppression de ces mots. Cela revient à maximiser la valeur de précision P donnée par la formule 2.5 pour le seuil de précision (d_P) (ou seuil haut de degré sémantique). De plus, d_P doit être supérieur à d_R . Selon la littérature, ce calcul de précision peut être assimilé à la densité du graphe filtré (Schaeffer, 2007).

$$P(d_P) = \frac{\frac{E_{total} - E_{remaining}(d_P)}{E_{total}}}{\frac{W_{total} - W_{remaining}(d_P)}{W_{total}}} \quad (2.5)$$

La figure 2.5 illustre l'évolution du nombre de mots et de relations (pondérées), ainsi que les valeurs de pertinence R (équation 2.4) et de précision P (équation 2.5), en fonction de la variation des valeurs des seuils bas et haut d'éliminations des mots. Les points sur les courbes correspondent aux valeurs maximales de pertinence et de précision. Leurs coordonnées donnent les seuils à retenir pour le filtrage des mots.

2.2. Un modèle de description des sensations haptiques



Ces courbes sont obtenues pour l'ensemble des mots en français et en anglais (2.838 mots au total).

Figure 2.5 – (a) Nombre de mots et relations pondérées pour la recherche du seuil bas de degré sémantique (filtrage des mots non pertinents); (b) Nombre de mots et relations pondérées pour la recherche du seuil haut de degré sémantique (filtrage des mots non précis)

La figure 2.6 montre le graphe sémantique obtenu après suppression des mots non pertinents et non précis suivant la méthode proposée. Par rapport à l'étape précédente (figure 2.4), le graphe ne comporte plus les mots ayant les degrés les plus élevés (les gros points) et les degrés les faibles (les petits points).

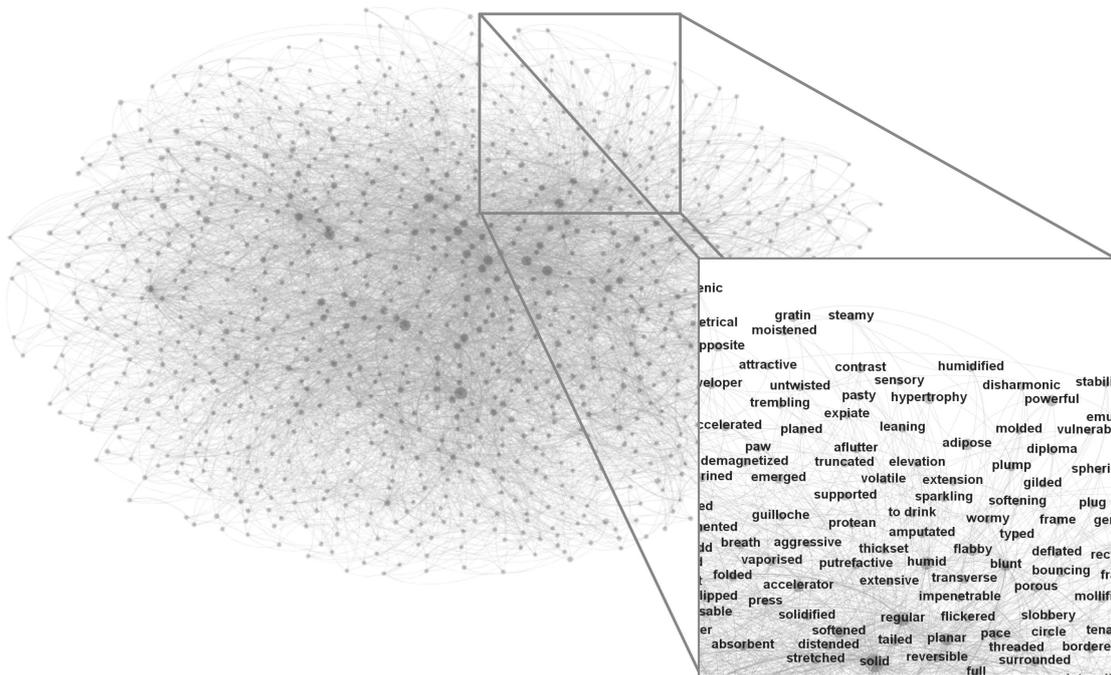


Figure 2.6 – Graphe sémantique après pré-filtrage des mots non pertinents et non précis

2.2.3 Clustering : regroupement sémantique

Le processus se poursuit par la création de groupes de mots (clusters) avec pour objectif de définir des catégories de sensations haptiques. Cette étape a été réalisée sans supervision, c'est à dire sans recourir à des connaissances initiales sur ce que pourraient être ces groupes et sans utiliser les groupements proposés dans la littérature (le plus souvent associés à un domaine d'application spécifique ou à un type de produit). Notre objectif de formalisation nous a amené à chercher, parmi l'ensemble des mots, des sous-ensembles qui auraient des points communs dans le cadre de la description des sensations haptiques.

Il existe différentes méthodes permettant d'obtenir un regroupement d'éléments en se basant sur les relations qu'ils ont entre eux. Les étapes précédentes ayant permis de collecter et de pré-filtrer les mots et relations pouvant être associés au sens du toucher, les méthodes s'appliquant à des données sous la forme de réseaux sont très pertinentes. Il s'agit donc de trouver des proximités sémantiques au sein de ce réseau de mots et de relations, puis d'effectuer des regroupements. Le réseau obtenu après l'étape de filtrage précédente est composé de liens non dirigés et très probablement cycliques. Le but d'un algorithme de clustering est de séparer le graphe en *clusters* ou groupements en fonction des connections qui existent entre les éléments du graphe (Milligan & Cooper, 1987; Schaeffer, 2007). Il convient ensuite de vérifier la validité des groupes au niveau mathématique et leur pertinence dans le contexte d'application. La plupart des méthodes de clustering s'appuient sur des mesures de distances entre les éléments du graphe (Schaeffer, 2007), ces mesures pouvant prendre plusieurs formes selon le type de graphe impliqué et l'algorithme utilisé. Lorsque l'on considère les méthodes de clustering s'appliquant à des visualisations de graphes (le plus souvent en deux dimensions), la mesure utilisée est la distance euclidienne des points du graphe. Les algorithmes dirigés par la force des liens (*force-directed*) sont alors particulièrement efficaces pour organiser les éléments suivant leurs connections.

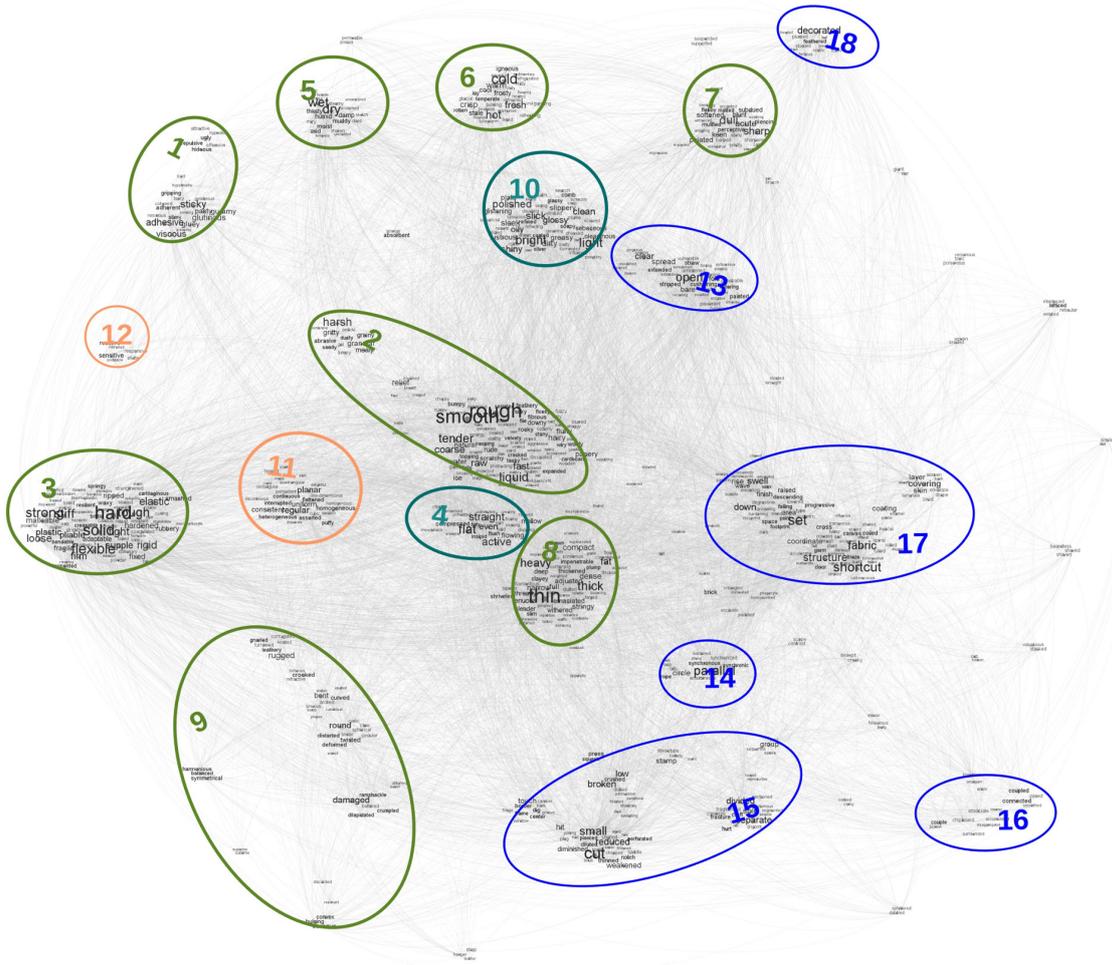
La méthode graphique OpenOrd (Martin, Brown, Klavans, & Boyack, 2011), basée sur l'algorithme Fruchterman-Reingold (Fruchterman & Reingold, 1991), rapproche tous les mots ayant de fortes relations, c'est-à-dire les mots ayant beaucoup de relations les uns avec les autres ou ayant des relations avec des coefficients de confiance élevés. Inversement, elle éloigne les mots ayant des relations plus faibles ou même inexistantes, c'est-à-dire les mots ayant peu de relations les uns avec les autres ou ayant des relations avec des coefficients de confiance faibles. L'algorithme utilisé par cette méthode consiste, de manière itérative, à minimiser le résultat de la formule suivante :

$$\sum_{i=1..nw} (A_{w_i} + R_{w_i}) \quad (2.6)$$

Avec :

- nw le nombre de mots,
- A le terme d'attraction entre les mots,
- R le terme de répulsion entre les mots.

Appliqué grâce à l’outil Gephi ¹⁹ à notre base de mots pré-filtrée, l’algorithme a abouti à un rapprochement des mots sémantiquement proches et à un éloignement des mots sémantiquement différents. La figure 2.7 donne le résultat graphique à l’issue de l’exécution de cet algorithme. Comme pour les représentations précédentes, la taille des points et de la police d’écriture des mots affichés sur la figure est proportionnelle au degré sémantique des mots.



Paramètres de l’algorithme OpenOrd : EdgeCut = 0.97, 1000 itérations, 1 processeur d’ordinateur.

Figure 2.7 – Résultat du regroupement des mots avec la méthode OpenOrd (Martin et al., 2011)

19. Gephi : Open graph visualization platform, <https://gephi.org/>

Le graphe est composé de 765 mots et de 11.854 relations. Les relations sémantiques trouvées dans cette étude (synonymes, antonymes, etc.) ont toutes été impliquées de la même manière dans cette analyse sémantique en tant que liens non dirigés, puisqu'elles expriment toutes une notion de proximité de signification sensorielle (même les antonymes dont on suppose qu'ils expriment des oppositions sur un même axe sensoriel). Les coefficients flous (de confiance dans les relations) ont été utilisés pour pondérer les liens, de sorte que la distance entre deux mots soit réduite lorsque la confiance dans une relation entre ces mots est élevée, et que cette distance soit augmentée dans le cas contraire.

L'algorithme qui a été utilisé comporte plusieurs phases ayant pour but d'opérer des regroupements et d'ajuster progressivement leur visualisation. Plusieurs paramètres permettent d'optimiser le résultat et la représentation graphique obtenue. C'est le cas tout particulièrement du paramètre *edge-cut* qui agit directement sur la séparation des clusters. Une valeur de *edge-cut* à 0 signifie qu'aucun regroupement ne sera réalisé, tandis que qu'une valeur à 1 signifie qu'un regroupement agressif sera effectué (des groupes visuellement très séparés). Dans notre cas, le nombre de clusters identifiés restait similaire pour des valeurs du paramètre *edge-cut* entre 0,8 et 1 (en dessous de ces valeurs, les groupes n'étaient pas visuellement différenciables). Nous avons évalué la valeur optimale de ce paramètre à 0,97.

Les groupes obtenus sont entourés et numérotés sur la figure 2.7. Ils ont été identifiés en observant les zones de plus forte densité de points, qui contiennent un nombre suffisant de mots. Étant donné que nous ne connaissons pas le nombre de groupes à obtenir, nous avons analysé plus finement les groupes obtenus. Les groupes numérotés de 1 à 3 et de 5 à 9 ont été identifiés comme étant directement associés à la description des sensations haptiques (par comparaison aux mots contenus dans notre liste initiale). Les groupes 4 et 10 nous semblaient également être pertinents pour la description des sensations haptiques, même si leur positionnement sur la représentation ne marque pas très clairement leur indépendance par rapport aux autres groupes. Les groupes 11 et 12 définissent des caractéristiques plus générales de la description des sensations, telles que la régularité ou la sensibilité. Enfin, les groupes numérotés de 13 à 18 regroupent quant à eux des mots qui sont, soit liés à la structure des objets, soit très liés à des caractéristiques visuelles des produits. Nous avons donc fait le choix de ne retenir que les 12 premiers groupes pour les étapes suivantes de construction du modèle.

2.2.4 Post-filtrage par indépendance et discriminance

Cette quatrième étape du processus a pour but de filtrer les groupes restants afin de conserver uniquement les mots les plus indépendants et discriminants vis-à-vis de ces groupes (mots que l'on appellera ensuite descripteurs), ainsi que de définir leur placement précis au sein des groupes.

En premier lieu, nous avons réalisé un filtrage par **indépendance** en retirant les mots situés en dehors des groupes principaux ou dans les interstices entre ces groupes. La valeur du seuil bas de degré sémantique a été augmentée, afin d'éliminer les mots isolés sans réduire le nombre de mots au sein des groupes. Cela est possible car, si un mot est isolé, c'est qu'il n'a pas suffisamment de relations avec les autres mots. Cela permet donc d'ajuster la valeur de seuil bas précédemment obtenue par pré-filtrage. De plus, nous avons retiré les mots figurant dans les interstices entre les groupes. Ces mots relèvent en effet de plusieurs groupes et ne permettent pas de décrire chaque groupe de manière indépendante d'un autre.

Dans un deuxième temps, nous avons filtré les mots suivant le critère de **discriminance** en retirant les mots ayant trop de relations avec les mots figurant dans d'autres groupes. Pour cela, nous avons calculé le ratio entre, d'une part le nombre de relations qu'un mot possède avec les autres mots du même groupe et, d'autre part, le nombre de relations que ce mot possède avec les mots figurant dans d'autres groupes. Ce calcul a été réalisé sur l'ensemble de mots des 12 groupes identifiés durant l'étape précédente et après filtrage par indépendance. Par exemple, comme le montre la figure 2.8, le mot *waxy* (qui signifie *cireux*) contenu dans le groupe 3 a été retiré car il a davantage de relations avec des mots extérieurs à son groupe qu'avec les mots y figurant.

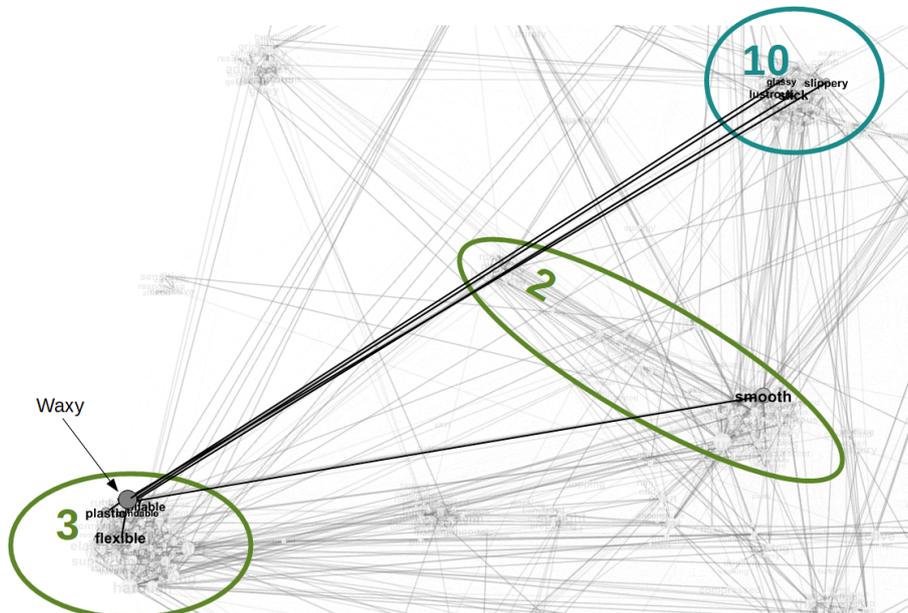


Figure 2.8 – Le mot *waxy* et ses relations

La figure 2.9 montre le graphe sémantique obtenu à l'issue de cette étape de post-filtrage (115 mots et 1.385 relations).

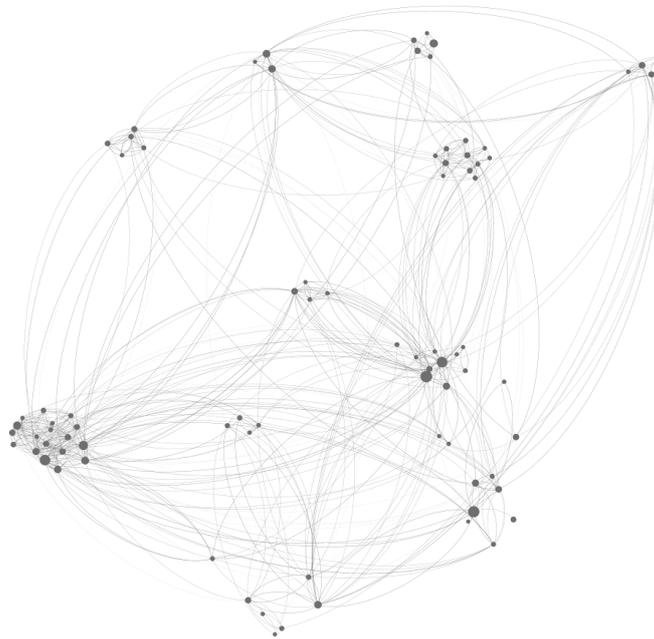


Figure 2.9 – Graphe sémantique obtenu après post-filtrage par indépendance et discrimination

2.2.5 Sensations haptiques élémentaires

Nous avons fait le choix d'appliquer à nouveau l'algorithme de clustering sur les descripteurs de référence précédemment identifiés avec l'objectif, d'une part, d'améliorer encore le positionnement de ces mots et, d'autre part, de confirmer la constitution des groupes obtenus à l'étape précédente. La figure 2.10 montre le résultat obtenu après réalisation de cette étape.

Cette figure montre les groupes obtenus (de 1 à 11) contenant les descripteurs de référence. Par rapport à la figure 2.7, quelques différences sont visibles. Ainsi, le groupe 4, identifié précédemment comme un groupe potentiel à cause de sa proximité avec les autres groupes, apparaît désormais clairement séparé des autres groupes. Le groupe 12 a en revanche complètement disparu.

Le groupe 11 est par ailleurs toujours présent sur ce graphe et il y occupe une position centrale. Étant donné la diversité de sources sémantiques utilisées, il est normal de retrouver des mots plus généraux tels que ceux contenus dans ce groupe à ce stade de l'analyse. En effet, bien qu'ils ne décrivent pas directement des sensations, ces mots donnent des indications sur des caractéristiques plus générales telles que l'uniformité et la régularité. Ce groupe est donc écarté pour la définition de catégories de sensations haptiques, mais il pourrait avoir un intérêt pour préciser la manière dont les sensations évoluent (le long d'une surface par exemple).

Le groupe 10 constitue un groupe particulier dans ce graphe, car il contient des mots se référant à des sensations visuelles pouvant induire des sensations haptiques. Par exemple, le mot *lustrous*, qui décrit le caractère lustré d'une surface, exprime en premier lieu une

caractéristique perceptible visuellement. Bien que cette caractéristique fournisse également certaines indications sur la perception haptique résultante, nous considérons que ce groupe ne permet pas de décrire une sensation haptique à part entière. Il s’agit plutôt d’un ensemble de mots ayant une pertinence certaine dans le cadre de la perception haptique, qui se retrouvent rapprochés sémantiquement grâce à la perception visuelle qu’ils décrivent. Ainsi, ce groupe est également écarté à ce stade, mais il aurait un intérêt dans un modèle combinant perceptions visuelles et haptiques.

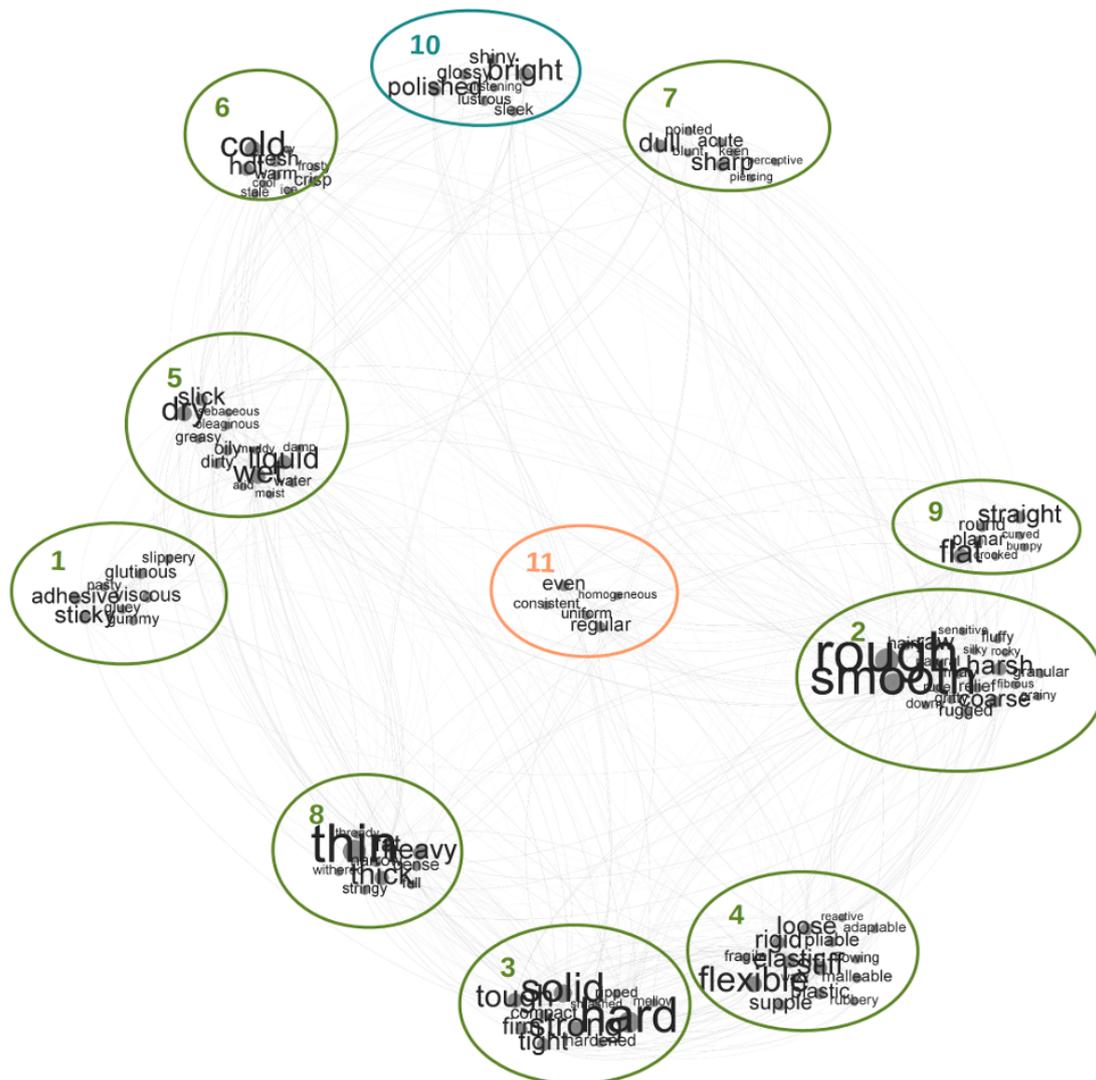


Figure 2.10 – Graphe obtenu après seconde application de l’algorithme de clustering sur les descripteurs de référence

Au final, nous avons retenu les groupes numérotés de 1 à 9 comme les plus pertinents pour décrire des sensations haptiques. Chaque groupe correspond à une catégorie de **sensations haptiques élémentaires** (ou EHS, *Elementary Haptic Sensations* en anglais) et comprend un ensemble de **descripteurs de référence** de la sensation. En effet, nous considérons que ces mots décrivent de manière référente et unique les groupes qui les contiennent. Ils forment une base de référence pour l’étape suivante de classification.

Le tableau 2.1 donne, pour chaque sensation élémentaire, les quatre descripteurs de référence dont les degrés sémantiques sont les plus élevés.

Code	Descripteurs			
EHS 1	<i>sticky</i> (collant)	<i>viscous</i> (visqueux)	<i>adhesive</i> (adhésif)	<i>slippery</i> (glissant)
EHS 2	<i>smooth</i> (lisse)	<i>rough</i> (rugueux)	<i>coarse</i> (râpeux)	<i>harsh</i> (rude)
EHS 3	<i>solid</i> (solide)	<i>hard</i> (dur)	<i>tight</i> (tendu)	<i>tough</i> (résistant)
EHS 4	<i>flexible</i> (flexible)	<i>stiff</i> (raide)	<i>rigid</i> (rigide)	<i>pliable</i> (pliable)
EHS 5	<i>liquid</i> (liquide)	<i>dry</i> (sec)	<i>wet</i> (mouillé)	<i>clean</i> (propre)
EHS 6	<i>cold</i> (froid)	<i>hot</i> (chaud)	<i>warm</i> (réchauffé)	<i>fresh</i> (frais)
EHS 7	<i>sharp</i> (tranchant)	<i>dull</i> (émoussé)	<i>blunt</i> (atténué)	<i>acute</i> (aigu)
EHS 8	<i>thin</i> (fin)	<i>dense</i> (dense)	<i>light</i> (léger)	<i>thick</i> (épais)
EHS 9	<i>flat</i> (plat)	<i>straight</i> (droit)	<i>round</i> (rond)	<i>planar</i> (plan)

Les traductions en français sont données à titre indicatif.

Tableau 2.1 – Les 9 sensations élémentaires haptiques identifiées et leurs 4 principaux descripteurs de référence

Pour aider à comprendre ce que sont les 9 sensations haptiques élémentaires (codées de EHS 1 à EHS 9) que nous avons identifiées, le tableau 2.2 donne les dénominations que nous proposons (en français et en anglais) ainsi que leurs descriptions.

Code	Dénomination	Définition
EHS 1	Sensation d' Adhérence (<i>Grip</i>)	Sensation de retenue ou d'étirement de la peau lors d'un contact avec la surface de l'objet.
EHS 2	Sensation de Relief (<i>Relief</i>)	Sensation de formes inférieures à la taille d'un doigt, ou de vibrations lors d'un contact à la surface d'un objet.
EHS 3	Sensation de Dureté (<i>Hardness</i>)	Sensation de déformation de la surface d'un objet lors d'un contact avec celle-ci.
EHS 4	Sensation de Réactivité (<i>Reactivity</i>)	Sensation de déformation résiduelle ou d'interaction avec la surface d'un objet après contact avec celle-ci.
EHS 5	Sensation de Résidu (<i>Residue</i>)	Sensation de matière restant sur la peau après contact avec la surface de l'objet.
EHS 6	Sensation de Chaleur (<i>Warmth</i>)	Sensation d'échange thermique entre la peau et la surface d'un objet lors d'un contact avec celle-ci.
EHS 7	Sensation de Douleur (<i>Pain</i>)	Sensation de dégradation de la peau au contact de la surface et des arrêtes de l'objet.
EHS 8	Sensation de Poids (<i>Weight</i>)	Sensation de masse d'un objet par rapport à sa taille
EHS 9	Sensation de Forme (<i>Shape</i>)	Sensation de forme générale de la surface et des arrêtes d'un objet

Tableau 2.2 – Les sensations haptiques élémentaires (dénominations et définitions)

Chaque dénomination a été choisie de manière à être la plus représentative possible des descripteurs de référence contenus dans la sensation et la plus neutre par rapport à l'intensité de cette sensation. Par exemple, nous avons choisi la dénomination de **chaleur/warmth** pour la sensation **EHS 6** (dont les quelques descripteurs de références donnés dans le tableau 2.1 sont *froid, chaud, réchauffé, frais*), parce que c'est une dénomination qui est à la fois générique (non spécifique à un domaine d'application ou un matériau), objective et neutre en ce qui concerne l'intensité de la sensation décrite. Enfin, chaque dénomination a également été choisie en fonction de sa proximité avec des notions de propriétés physiques (*adhérence, relief, dureté, chaleur, poids, forme*) ou de stimuli (*réactivité, résidu, douleur*).

2.2.6 Critères pour l'exploration manuelle des surfaces associés aux sensations élémentaires

La mise en place du contrôle sensoriel d'un produit implique également d'autres connaissances. Pour un contrôle réalisé par des opérateurs, il s'agit de définir quels modes d'exploration doivent être utilisés pour percevoir au mieux ces anomalies. Le tableau 2.3 détaille les relations pouvant être établies entre les sensations élémentaires, les stimuli du toucher, les mouvements exploratoires associés et les effecteurs à utiliser préférentiellement pour générer les stimuli.

Code	Sensation élémentaire	Type de stimulus	Mouvement exploratoire	Effecteur préférentiel
EHS 1	Adhérence	Étirement de la peau	Tangentiel ou orthogonal	Doigt (pulpe ou doigt en entier), paume, poignet
EHS 2	Relief	Vibration, Forme microscopique	Tangentiel ou contact statique	Doigt (ongle, pulpe ou doigt en entier), paume
EHS 3	Dureté	Pression	Orthogonal	Doigt (pulpe ou doigt en entier)
EHS 4	Réactivité	Pression, Forme macroscopique	Orthogonal et tangentiel	Doigt (pulpe ou doigt en entier), main.
EHS 5	Résidu	Persistance	Tangentiel, orthogonal ou contact statique	Doigt (ongle, pulpe ou doigt en entier)
EHS 6	Chaleur	Transfert thermique	Statique	Doigts, paume ou main
EHS 7	Douleur	Dégradation de la peau	Tangentiel, orthogonal ou contact statique	Doigts, paume
EHS 8	Poids	Masse, Taille	Enveloppement et soulèvement	Doigts et main. Bras (impliqué indirectement)
EHS 9	Forme	Forme macroscopique	Tangentiel et orthogonal, ou Enveloppement	Doigts ou main. Bras (impliqué indirectement)

Tableau 2.3 – Relations entre catégories de sensation, stimuli impliqués, mode d'exploration et effecteurs préférentiels

Pour obtenir ces relations, nous avons appliqué une méthode similaire à celle utilisée pour établir les relations entre les mots. Nous avons ainsi analysé les sources listées dans le tableau 1.2 (et plus particulièrement (Bensmaïa & Hollins, 2005 ; Crochemore et al., 2003 ; De Boissieu, 2010 ; Jones & Lederman, 2006 ; S. Lederman & Klatzky, 2009)) en cherchant dans ces textes les liens entre les descripteurs de référence (de chaque sensation élémentaire) et les différents attributs de stimuli, mouvements ou effecteurs. Par exemple, les descripteurs *smooth* et *rough* ont été retrouvés associés dans ces textes aux stimuli de *forme microscopique* et de *vibration*, ainsi qu'à un *mouvement tangentiel* ou un *contact statique*. Les effecteurs préférentiels ont été déduits de la même manière ou en croisant les informations du tableau 1.1 (du chapitre 1) avec les stimuli et mouvements identifiés. Ces analyses permettent également d'établir des liens directs entre vocabulaire et exploration.

2.2.7 Quantification de la description sensorielle

Les mots de notre base décrivent des sensations haptiques. Mais ils apportent également parfois une indication sur le niveau de l'intensité perçue pour cette sensation. Cela a été notamment montré dans les études qui utilisent un couple de descripteurs pour décrire une sensation et parfois représenter les extrémités d'une échelle d'intensité (par exemple Issa et al. (2005), Picard et al. (2003), Guest et al. (2011) ou Okamoto et al. (2013)). En revanche, utiliser uniquement un mot pour exprimer une intensité peut être à l'origine d'un manque de précision dans la description et, dans certains cas, être à l'origine d'une confusion dans la description. Nous avons donc fait le choix d'associer à chaque mot un intervalle d'intensités pour chaque sensation élémentaire dont dépend ce mot.

Pour y parvenir, nous avons d'abord sélectionné le type d'échelle d'intensité la plus appropriée. Différents types d'échelle peuvent être utilisés dans le domaine sensoriel. Les plus classiques sont celles proposées par Stevens (Stevens, 1946) : les échelles nominales, ordinales, d'intervalles et de ratio. Bien que l'affectation des mots aux différentes sensations élémentaires corresponde à une échelle nominale, la quantification de l'intensité d'une sensation correspond plutôt aux autres types d'échelles (leur utilisation est courante dans les études d'analyse sensorielle comme, par exemple, dans les études de (Bassereau & Charvet-Pello, 2011 ; Dumenil-Lefebvre, 2006)). Néanmoins, ces types d'échelles sont généralement utilisés pour caractériser les sensations perçues au contact d'échantillons, tandis que, dans notre cas, nous souhaitons quantifier les sensations pour chaque mot. L'échelle d'intervalle nécessite une distance invariante entre les différents niveaux de l'échelle d'intensité, ce qui n'est pas forcément le cas en considérant des données sémantiques. En effet, le contexte peut influencer sur les rapports d'échelles, mais nous verrons que le positionnement hiérarchique entre les mots reste cependant constant.

Nous avons donc fait le choix d'utiliser l'échelle de type ordinal. Notre but était de fournir une indication du positionnement hiérarchique des mots suivant la sensation élémentaire considérée, tout en définissant un niveau numérique de l'intensité de cette sensation. Pour exemple, la figure 2.11 montre l'échelle d'intensité utilisée pour la sensation élémentaire *relief* (code EHS 2). Quelques descripteurs de référence de cette sensation ont également été positionnés sur les différents niveaux de cette échelle (nous justifions plus loin leur positionnement).

L'échelle utilisée comporte cinq niveaux. Chacun de ces niveaux quantifie l'intensité de la sensation perçue au toucher pour la sensation élémentaire considérée, c'est-à-dire l'intensité des stimuli permettant de générer la sensation considérée au contact avec une surface. Par exemple, dans le cas de la sensation *relief* (figure 2.11), il s'agit de quantifier

Sensation élémentaire n°2 Relief Echelle d'intensité de sensation	Niveau d'intensité le plus bas ← → Niveau d'intensité le plus haut				
	1	2	3	4	5
Exemples d'associations de descripteurs	Smooth (Lisse)	Silky (Soyeux)	Granular (Granuleux) Sandy (Sableux)	Rough (Rugueux)	Harsh (Rude) Coarse (Râpeux)

Figure 2.11 – Échelle d'intensité de la sensation élémentaire relief (EHS 2)

une sensation perçue qui va de faiblement perçue à fortement perçue.

Afin de d'assurer une base de référence pour la quantification de l'intensité des sensations haptiques, nous avons positionné les descripteurs de référence sur les niveaux d'intensité de 1 à 5 des échelles de chaque sensation élémentaire. Ce positionnement a été réalisé en fonction de la hiérarchie pouvant exister entre les mots, selon la sensation élémentaire considérée (par construction, un même descripteur de référence n'est rattaché qu'à une seule sensation élémentaire). Ces liens hiérarchiques n'étant pas immédiatement disponibles dans les sources sémantiques habituelles (dictionnaire, thésaurus, etc.), une analyse des textes a été réalisée en se focalisant sur les comparaisons possibles entre descripteurs de référence. Par exemple, les études d'Okamoto et al. (2013), de Picard et al. (2003), de Guest et al. (2011) et d'Issa et al. (2005) mettent en évidence des comparaisons entre plusieurs couples de mots. Pour la sensation de relief, les couples rough/smooth, relief/silky, harsh/rough, ou encore relief/smooth) peuvent être cités.

Bien que ces couples expriment clairement une opposition dans l'intensité de la sensation perçue, le signe de cette opposition dépend de la définition de chaque sensation. Pour nos travaux, nous avons considéré les stimuli comme base de la génération des sensations. Le signe positif de l'opposition correspond donc à des stimuli dont l'intensité est plus élevée. Par exemple, pour le couple rough/smooth, le descripteur rough implique des stimuli (dans ce cas des formes microscopiques ou des vibrations) dont l'intensité est plus élevée que le descripteur smooth.

Nous avons ensuite utilisé la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process ou procédure d'analyse hiérarchique) (Saaty, 2008) pour compiler ces résultats d'opposition individuelle et obtenir un classement des descripteurs de référence sur une échelle d'intensité par catégorie de sensation. Le tableau 2.4 montre par exemple le résultat obtenu à l'aide du logiciel Ellistat²⁰ pour huit descripteurs de référence (ayant les degrés sémantiques les plus élevés) associés à la sensation élémentaire relief (code EHS 2).

N°	Poids	Classement	Intitulé	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0%	8	Smooth								
2	69%	3	Rough	-							
3	100%	1	Coarse	-	-						
4	100%	1	Harsh	-	-	=					
5	46%	5	Granular	-	+	+	+				
6	54%	4	Fibrous	-	=	+	+	=			
7	15%	7	Silky	-	+	+	+	+	+		
8	46%	5	Sandy	-	+	+	+	=	=	-	

Tableau 2.4 – Analyse hiérarchique de huit descripteurs de référence de la sensation relief (code EHS 2)

20. Logiciel Ellistat, Pillet consulting : <https://ellistat.com/>

La partie droite du tableau 2.4 fournit la matrice d'opposition deux à deux de ces descripteurs par rapport à leur intensité de sensation (par exemple, le signe - pour la comparaison entre les descripteurs *rough* et *smooth*). Ces comparaisons permettent de calculer un poids pour chaque descripteur sur la partie gauche du tableau et ainsi d'établir un classement entre eux. C'est ce classement qui nous a permis ensuite de positionner chaque descripteur sur l'échelle d'intensité de la sensation à laquelle il appartient (par exemple, les descripteurs *smooth* et *coarse* sont respectivement positionnés sur les valeurs 1 et 5 de l'échelle d'intensité de la sensation *relief*, tandis que le descripteur *rough* est associé à la valeur 4 d'intensité).

Ce même procédé a été utilisé (lorsque cela était possible), pour placer les descripteurs de référence sur les échelles d'intensité des autres sensations élémentaires. On peut noter que les positionnements obtenus sont invariants suivant le contexte étant donné la diversité des domaines industriels représentés par les textes et qu'aucune contradiction n'a été relevée entre les textes (inversion de signe d'un document à un autre par exemple).

2.2.8 Modèle de description et classification

L'étape de classification vise ensuite à positionner l'ensemble des 2.800 mots identifiés lors de la première étape du processus par rapport aux sensations élémentaires et aux niveaux d'intensité associés. Il s'agit en effet de construire un modèle qui formalise la description de chacun de ces mots. Ce modèle doit permettre d'obtenir automatiquement une description réduite et structurée des sensations haptiques à partir de mots de vocabulaire donnés en entrée de ce modèle. Dans le domaine de la représentation mathématique linguistique, plusieurs méthodes existent pour modéliser les mots afin de pouvoir les utiliser plus facilement dans un processus de raisonnement ou de calcul informatique. Citons par exemple les méthodes Word2Vec (Mikolov, Chen, Corrado, & Dean, 2013) et « 2-tuple fuzzy linguistic representation » (Herrera & Martínez, 2000 ; Martínez & Herrera, 2012). La première, bien qu'utile à la représentation et au calcul de distance entre les mots, n'est pas appropriée pour notre besoin de classification et de modélisation suivant des catégories de sensation. La seconde méthode présente une approche intéressante en termes de modélisation floue de la granularité d'un domaine sémantique avec des mots (par exemple de faible à élevé en passant par moyen), mais ne permet pas réellement de donner un positionnement des mots sur des catégories.

Approche de modélisation proposée

L'approche de modélisation que nous proposons combine la possibilité de classification floue aux catégories de sensation et la quantification des mots au sein de ces catégories. Tout d'abord, concernant la partie classification, nous proposons une modélisation régie par une combinaison de coefficients flous. L'équation 2.7 présente la modélisation d'un mot vis-à-vis des catégories de sensation. Pour chaque sensation élémentaire, un coefficient flou d'association α_{a_i} compris entre 0 et 1 est défini (le calcul de ce coefficient est détaillé dans les paragraphes suivant).

$$\forall i = 1..nw : W_i = \left\{ \alpha_{1_i} S_{1_i}(x); \alpha_{2_i} S_{2_i}(x); \dots; \alpha_{ns_i} S_{ns_i}(x) \right\} \quad (2.7)$$

Avec :

- w_i un mot,
- W_i la représentation formalisée de ce mot,
- α_{a_i} le coefficient de confiance de l'association entre w_i et la sensation s_a . ($0 \leq \alpha_{a_i} \leq 1$),
- S_{a_i} la fonction d'association entre le mot w_i et les niveaux d'intensité de la catégorie de sensation s_a ,
- nw le nombre de mots,
- ns le nombre de catégories de sensation.

Concernant la quantification de l'intensité de sensation, nous proposons une modélisation par intervalle, grâce à la fonction S_{a_i} présentée dans l'équation 2.8 et illustrée par la figure 2.12. Bien que les descripteurs de référence aient été positionnés sur des niveaux entiers d'intensité de sensation (de 1 à 5) afin de simplifier dans un premier temps la tâche de hiérarchisation de ces mots, nous ne nous sommes pas limités à cette modélisation restreinte pour la construction du modèle. Il s'agit en effet de prendre en compte le possible flou d'association d'un mot sur l'échelle d'intensité de sensation. Pour ce faire, nous considérons donc un intervalle d'association plus ou moins étendu (donné par la valeur de δ_{a_i}) suivant la confiance dans le niveau d'association cible (donné par γ_{a_i}).

$$\forall i = 1..nw, \forall a = 1..ns : S_{a_i}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } \gamma_{a_i} - \delta_{a_i} \leq x \leq \gamma_{a_i} + \delta_{a_i} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.8)$$

Avec :

- x le niveau d'intensité de sensation,
- γ_{a_i} la valeur centrale d'intensité de sensation ($1 \leq \gamma \leq 5$),
- $2\delta_{a_i}$ l'étendue de l'intervalle d'intensité de sensation.

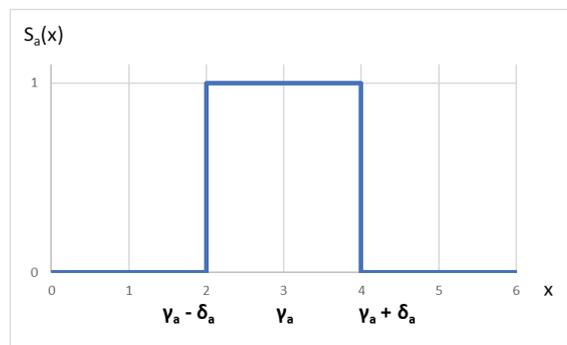


Figure 2.12 – Exemple d'illustration de la fonction $S_a(x)$ d'association binaire aux niveaux d'intensité de la catégorie de sensation s_a

Modélisation des descripteurs de référence

Chaque descripteur de référence est associé avec un coefficient $\alpha = 1$ à la sensation élémentaire dont il dépend. Comme nous l'avons vu, le positionnement des descripteurs de référence sur l'échelle d'intensité a été réalisé par analyse hiérarchique des mots suivant la sensation considérée. Nous les associons donc à des niveaux entiers d'intensité ($1 \leq \gamma \leq 5$) avec une étendue δ réduite de 0,5 autour de ce niveau γ central. Par exemple, le descripteur *rough* est associé à la sensation **relief** (code EHS 2) avec α égal à 1 et avec γ égal à 4. Le descripteur *smooth* est également associé à la sensation **relief** avec α égal à 1 et avec γ égal à 1. Le descripteur *tough* est associé à la sensation **dureté** avec α égal à 1 et avec γ égal à 4.

Modélisation des autres mots de la base

La classification des autres mots de la base est effectuée en utilisant leurs relations sémantiques avec les descripteurs de référence. Chaque mot ayant une relation sémantique (de type **synonyme**, **holonyme**, **méronyme**, **hyperonyme**, **hyponyme** ou une correspondance textuelle) avec un descripteur de référence intègre la sensation élémentaire associée à ce descripteur dans sa modélisation, ainsi que son intervalle d'intensité. Par exemple, le mot *rugged* est associé, tout comme le descripteur *rough* dont il est un synonyme, à la sensation élémentaire **relief** (EHS 2) avec α égal à 1 (car la relation entre *rugged* et *rough* a été donnée par une source sûre), avec γ égal à 4 et δ égal à 0,5. Pour cet exemple, *rugged* n'avait qu'une relation avec un descripteur associé à la sensation élémentaire **relief**. Un mot ayant des relations de ce type avec plusieurs descripteurs de référence associés à une même sensation, celui-ci intègre alors les intervalles d'intensité de chacun de ces descripteurs, à hauteur de la confiance établie pour chaque relation.

Concernant les relations de type **antonyme**, l'intervalle d'intensité intégré à la modélisation correspond à l'opposé de celui du descripteur de référence (obtenu en utilisant le symétrique de γ par rapport au centre de l'échelle d'intensité (le niveau 3) et en conservant la même étendue δ). Par exemple, le mot *rugged* est antonyme du descripteur *flat* qui est associé à la sensation élémentaire **forme** (EHS 9) avec γ égal à 1 et δ égal à 0,5. *Rugged* sera donc également associé à cette sensation avec par contre γ égal à 5 et δ égal à 0,5.

Ainsi, de manière générale, en considérant l'ensemble des relations d'un mot w_i que l'on souhaite formaliser, on calcule ses coefficients de confiance α_{a_i} de l'association aux sensations élémentaires grâce à la formule 2.9. Ceux-ci seront inférieurs ou égaux à 1 suivant les coefficients appliqués aux relations sémantiques de ce mot avec les descripteurs de référence. De plus, on obtient la fonction $S_{a_i}(x)$ d'association aux niveaux d'intensité de chaque sensation grâce à la formule 2.10.

$$\alpha_{a_i} = \sum_{\forall r} (C_{e_{i-r}} \cdot \alpha_{a_r}) / n_r \quad (2.9)$$

$$S_{a_i} = \left[\sum_{\forall rs} (C_{e_{i-rs}} \cdot S_{a_{rs}}) + \sum_{\forall ro} (C_{e_{i-ro}} \cdot S_{a_{ro}}^t) \right] / \left[\sum_{\forall rs} C_{e_{i-rs}} + \sum_{\forall ro} C_{e_{i-ro}} \right] \quad (2.10)$$

Avec :

- r l'indice des descripteurs de référence liés au mot i , rs ceux liés avec des relations impliquant une similarité d'intensité de sensation, ro ceux liés avec des relations impliquant une intensité de sensation opposée,
- $S^t(x)$ la fonction opposée à $S(x)$ sur l'échelle d'intensité (obtenue en utilisant le symétrique de γ par rapport au centre de l'échelle d'intensité (le niveau 3) et en conservant la même étendue δ),
- n_r le nombre total de descripteurs r ,
- Ce_{i-j} le coefficient de confiance du lien entre deux mots w_i et w_j .

Exemple de description formelle obtenue

Par exemple, le mot *leathery* qui signifie « tanné » (en référence au cuir tanné) est synonyme des descripteurs *rough* (avec Ce égal à 0,8) et *tough* (avec Ce égal à 1), ainsi qu'antonyme du descripteur *smooth* (avec Ce égal à 1). Afin de simplifier cet exemple nous ne considérons que ces trois relations. Connaissant les modélisations de ces trois descripteurs de référence (données précédemment), le mot *leathery* est par conséquent associé aux sensations EHS 2 et EHS 3. Le coefficient α_2 est égal à 0,9. Il est obtenu en calculant la moyenne des coefficients Ce des relations avec *rough* et *smooth*, car les coefficients α des descripteurs de référence sont égaux à 1. Le coefficient α_3 est égal à 1. Concernant l'intensité de sensation, on a γ_2 égal à 4,55 (arrondi à 4,5 par la suite) et δ_2 égal à 1, ainsi que γ_3 égal à 4 et δ_3 égal à 0,5. La figure 2.13 illustre le résultat de la modélisation du mot *leathery* sur ces deux catégories.

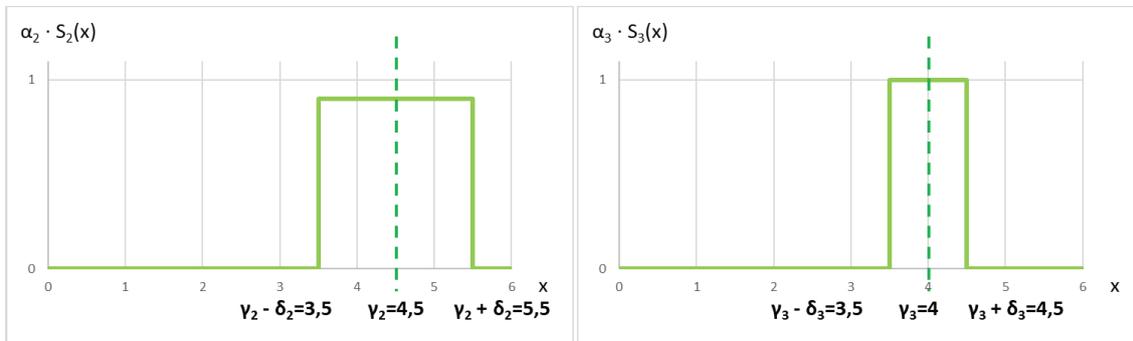


Figure 2.13 – Quantification du mot *leathery* sur les sensations EHS 2 et EHS 3 :
 $W_{leathery} = \{ \alpha_2 S_2(x); \alpha_3 S_3(x) \}$

Afin de simplifier la représentation, nous utilisons un format de diagramme radar présenté sur la figure 2.14. Si la surface d'un objet est décrite à l'aide du mot *leathery*, cela indique que les sensations EHS 2 et EHS 3 seront à considérer lors d'un processus de perception. Dans le contexte d'un contrôle de la qualité haptique, ce sont donc ces deux sensations qu'il faudra contrôler, en considérant les niveaux d'intensité associés.

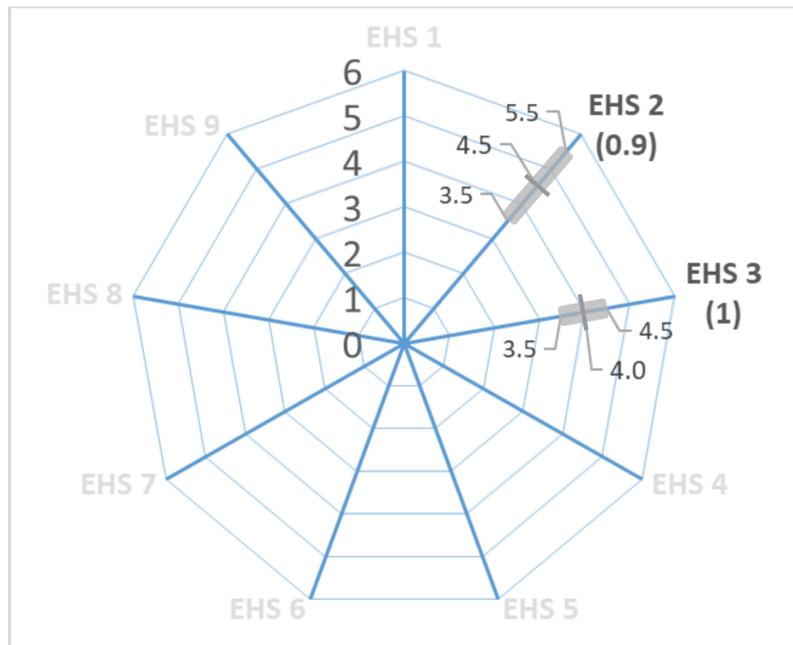


Figure 2.14 – Description formelle du mot leathery

2.2.9 Synthèse du modèle obtenu

Le modèle obtenu, après classification de tous les mots de la base en utilisant les descripteurs de référence, permet la formalisation de 978 mots en anglais, soit 79,3% des mots. En moyenne, chaque mot a des relations avec 4,4 descripteurs de référence.

Les descripteurs non classés (20,7% de mots en anglais) correspondent principalement aux mots non pertinents dans ce contexte de perception haptique (il s'agit notamment pour la plupart des mots filtrés au début du processus d'analyse sémantique).

Par ailleurs, ce modèle a été obtenu grâce aux mots et aux sources actuellement inclus dans le processus de formalisation. Bien que nous ayons souhaité fournir une vue qui soit la plus générale possible de la sémantique liée à la perception haptique, il sera toujours possible d'inclure de nouveaux mots ou de nouvelles sources afin de compléter le modèle. Ainsi, il s'agit surtout de valider le processus de formalisation qui a abouti à ce modèle, afin de s'assurer qu'il répond aux objectifs que nous nous sommes fixés, notamment concernant les critères de généralisation de la description et de robustesse de construction.

2.3 Validation du processus de formalisation

Plusieurs points de validation du modèle de description et de la démarche de construction de ce modèle sont détaillés dans cette partie. Il s'agit notamment de vérifier le caractère générique de la méthode, l'indépendance des catégories de sensation obtenues et la robustesse de la méthodologie aux changements possibles dans la base de mots.

2.3.1 Généricité du modèle

Pour vérifier le caractère générique du processus de formalisation et du modèle de description résultant, nous avons examiné les correspondances existant entre les mots et les différents contextes d'application, puis observé la distribution des mots sur les catégories de sensation identifiées. La figure 2.15 montre une synthèse des domaines d'application et des matériaux représentés par la base de mots. Ces deux graphes ont été obtenus d'une part à partir de l'association des mots avec les textes du corpus utilisé (tableau 1.2) et d'autre part à partir de la correspondance entre ces textes et les éléments de contexte (figure 1.10).

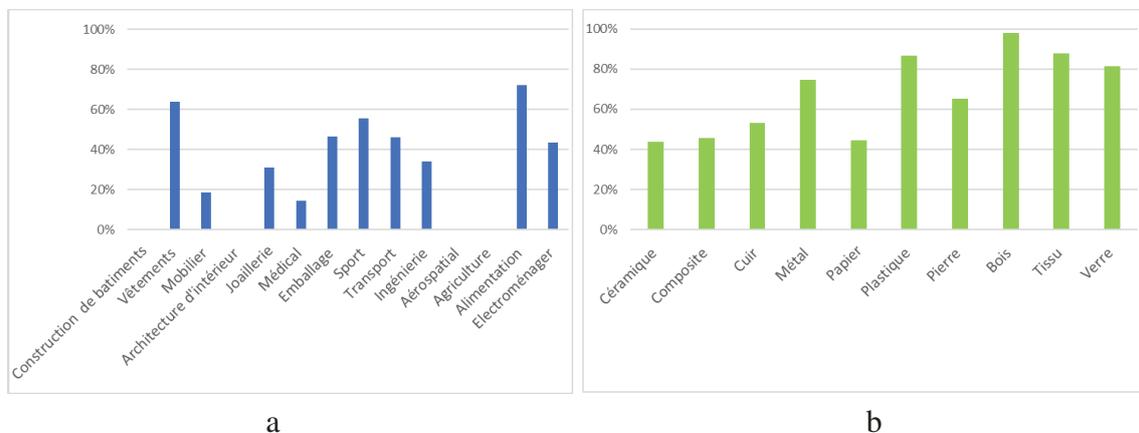
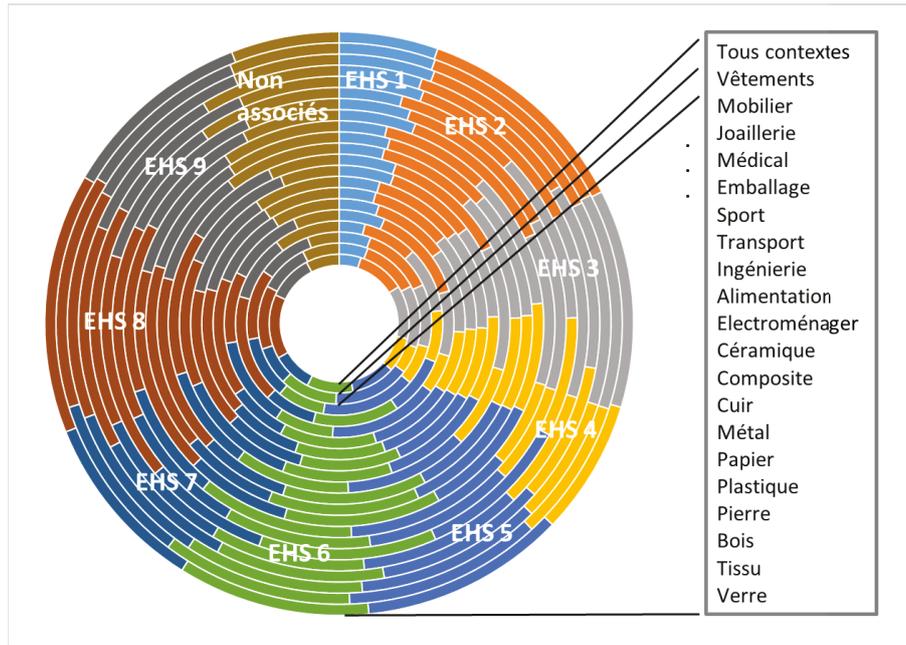


Figure 2.15 – (a) : Correspondance entre les mots de la base et les domaines d'application; (b) : Correspondance entre les mots et les matériaux impliqués

Nous pouvons voir que l'ensemble des catégories de matériaux de l'industrie est représenté, ainsi que la plupart des domaines d'application, dans la limite de ceux concernés par les sources d'information considérées (voir figure 1.10).

La figure 2.16 donne la distribution des mots sur les sensations élémentaires, pour l'ensemble de la base de mots ainsi que pour les mots associés à chaque contexte (domaine d'application ou matériau). Nous observons que les 9 sensations élémentaires sont présentes dans tous les contextes d'application et que la répartition des mots sur les sensations élémentaire est quasiment similaire.



Chaque anneau donne la distribution suivant un contexte d'application particulier excepté l'anneau le plus au centre qui donne la représentation de manière globale (pour tous les contextes confondus).

Figure 2.16 – Distribution des mots sur les catégories de sensation (EHS)

2.3.2 Indépendance des catégories de sensation

Afin de vérifier l'indépendance des catégories de sensation identifiées lors de la construction du modèle de description, nous avons également examiné le ratio du nombre de relations internes et externes aux groupements de descripteurs de référence ayant permis de générer ces catégories. Selon la littérature, il s'agit en réalité de calculer le ratio de densité *intra-cluster* (interne à un cluster) et *inter-cluster* (externe à un cluster), pour chacun des clusters (Schaeffer, 2007). Le tableau 2.5 présente les résultats de cette analyse. Les pourcentages pour une catégorie sont calculés en divisant le nombre de relations des descripteurs de cette catégorie vers les autres descripteurs du graphe (appartenant à cette même catégorie ou à d'autres catégories) par le nombre total de relations des descripteurs de cette catégorie. De plus, comme déjà réalisé au cours du processus de formalisation, chaque relation est pondérée par un coefficient de confiance. Dans le tableau, les valeurs affichées sont normalisées par colonnes, pour chaque sensation élémentaire. C'est pour cela que le tableau n'est pas symétrique.

		EHS 1	EHS 2	EHS 3	EHS 4	EHS 5	EHS 6	EHS 7	EHS 8	EHS 9
	Sensations	Grip	Relief	Hardness	Reactivity	Residue	Warmth	Pain	Weight	Shape
EHS 1	Grip	59.20%	3.68%	1.87%	4.44%	11.95%	0.14%	0.43%	2.90%	0.24%
EHS 2	Relief	9.91%	52.65%	16.59%	26.41%	12.21%	11.83%	8.91%	7.96%	27.69%
EHS 3	Hardness	3.07%	10.13%	41.88%	20.16%	10.10%	8.17%	2.44%	11.72%	13.91%
EHS 4	Reactivity	2.59%	5.74%	7.18%	32.26%	1.52%	0.56%	0.57%	3.23%	2.66%
EHS 5	Residue	21.34%	8.11%	10.99%	4.64%	42.77%	10.14%	11.78%	16.88%	1.69%
EHS 6	Warmth	0.12%	3.68%	4.17%	0.81%	4.75%	63.10%	0.43%	3.44%	0.97%
EHS 7	Pain	0.35%	2.72%	1.22%	0.81%	5.41%	0.42%	57.33%	4.19%	10.52%
EHS 8	Weight	3.18%	3.24%	7.83%	6.05%	10.36%	4.51%	5.60%	42.80%	7.74%
EHS 9	Shape	0.24%	10.04%	8.26%	4.44%	0.92%	1.13%	12.50%	6.88%	34.58%

Tableau 2.5 – Pourcentage de relations entre chaque catégorie de sensation

Les résultats montrent que les catégories ont toutes un nombre plus élevé de relations internes que de relations externes. Nous pouvons donc considérer que les groupements sont indépendants. Il existe cependant quelques relations entre les descripteurs appartenant aux différentes catégories (par exemple, due à des stimuli ou modes exploratoires communs). Les sensations *relief* (EHS 2) et *forme* (EHS 9) ont par exemple plus de liens entre elles que vers les autres catégories. Cela est illustré par la proximité de leurs positions sur le graphe sémantique de la figure 2.10. Les stimuli et modes exploratoires impliqués dans la génération de ces deux catégories sont en effet assez proches.

2.3.3 Robustesse de la méthode

La robustesse de la méthode proposée pour construire un modèle de connaissances peut être vérifiée de plusieurs manières. Le plus souvent, pour vérifier la robustesse d'une méthode d'apprentissage, il s'agit de construire le modèle avec une sous-partie des données disponibles (généralement entre 70 et 80%) et de le valider grâce à la partie restante des données (généralement entre 20 et 30%). Cette démarche, bien que très utile pour un apprentissage supervisé – pour lequel on aurait des données d'entrée dont il serait possible de connaître la classification – ne fonctionne pas dans le cas où ces données ne peuvent a priori pas être classées sans l'aide de la méthode proposée (apprentissage non supervisé).

Nous avons donc choisi d'adapter cette démarche en comparant plusieurs résultats de modèles obtenus après application de notre méthode. Notre modèle a tout d'abord été comparé au modèle construit à partir d'une base réduite de mots anglais (obtenue en soustrayant 20 % des mots aléatoirement). Le modèle complet anglais a ensuite été comparé à celui construit à partir d'une base de mots dans une autre langue (ici le Français). Deux critères ont été principalement observés lors de cette comparaison : le nombre et la composition des groupements sémantiques et leurs correspondances aux catégories de sensation identifiées, ainsi que le taux de similarité dans la classification de l'ensemble de la base aux catégories obtenues.

Robustesse à une modification aléatoire des sources sémantiques

Une suppression aléatoire de 20 % des mots anglais de la liste complète a été réalisée afin d'obtenir une base sémantique réduite. L'objectif était de construire un modèle de la même manière que celui construit à partir de la base complète, pour ensuite comparer les résultats obtenus et vérifier ainsi la robustesse de notre méthode à une modification de la base. La base réduite est composée de 986 mots anglais (au lieu de 1.233 initialement) et de 12.125 relations. Un résultat graphique de l'application du processus de formalisation sur cette base réduite est donné dans la figure 2.17.

Ce graphe est composé de 112 mots et les groupes ont été numérotés de la même manière que précédemment en comparant les descripteurs trouvés dans les groupes de chaque graphe. On peut observer un résultat très similaire à celui obtenu en utilisant la base complète. Les catégories de sensation identifiées précédemment ont toutes été trouvées (le groupement numéro 11 n'est pas apparu, mais il n'était pas considéré comme une sensation élémentaire). Parmi les descripteurs de référence commun aux deux modèles, 91,6% ont une classification identique sur les catégories de sensation.

Après classification de tous les mots de la base réduite, on observe une classification globale identique à 84,8% avec le modèle complet. L'écart d'environ 15 % entre les résultats de ces deux modèles indique une légère modification du résultat qui n'impacte pas le modèle dans son ensemble. Cela tend à prouver la robustesse globale du processus de formalisation et de classification à une modification du nombre de mots de la base. Par ailleurs, le modèle final peut bénéficier du nouveau modèle obtenu. C'est en partie ce que la boucle longue d'enrichissement de la figure 2.2 permet d'effectuer. En cas d'ajout de nouvelles informations sémantiques (nouveaux mots ou nouvelles relations), le modèle peut être reconstruit et amélioré en identifiant les invariants des modèles et les associations à améliorer.

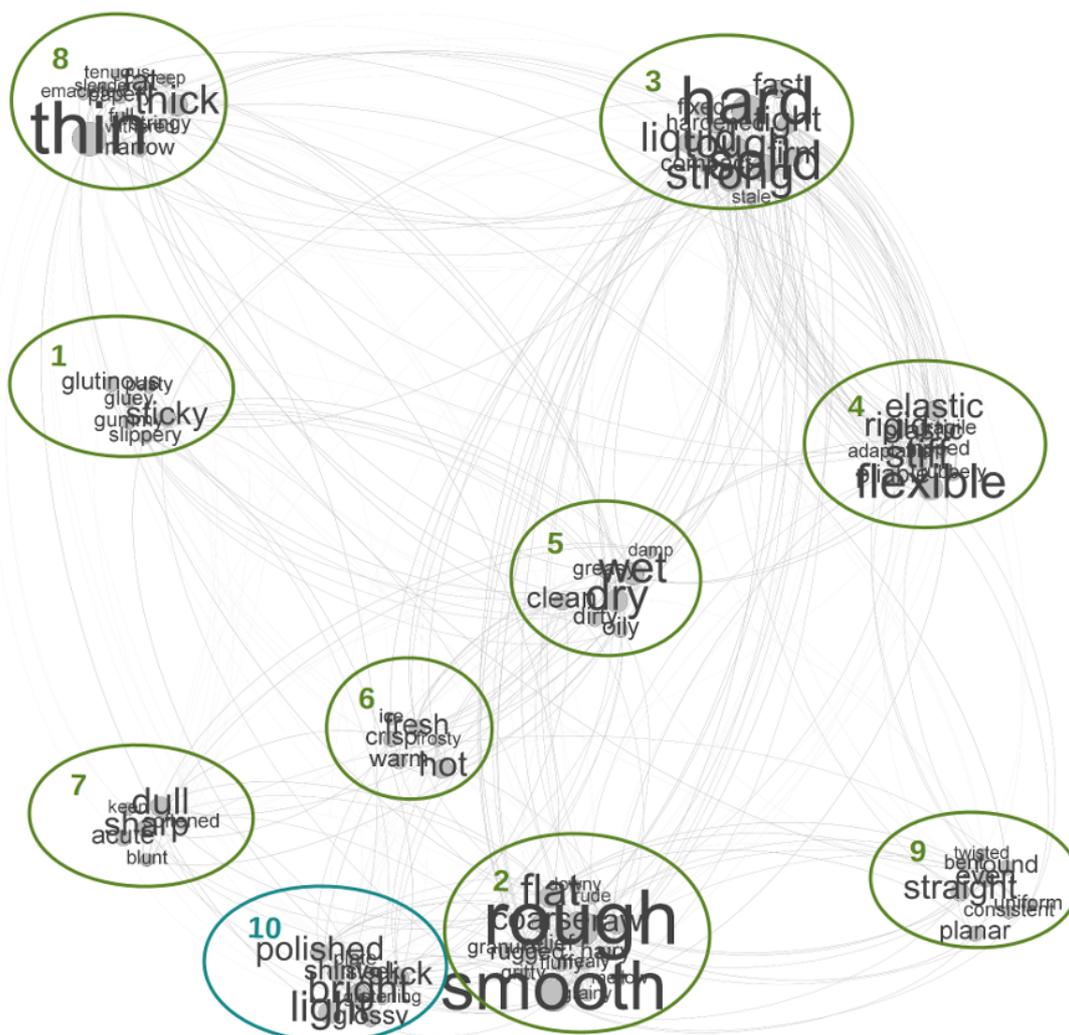


Figure 2.17 – Résultat du regroupement sémantique obtenu en n'utilisant que 80% de mots en anglais de la base

Robustesse au changement de langue

Le modèle obtenu grâce à la base complète de mots en anglais a également été comparé au modèle construit pour une base de mots en français. Celle-ci est composée de 1.605 mots en langue française et de 20.173 relations. Un résultat graphique du résultat du processus de formalisation est donné dans la figure 2.18.

Ce graphe est composé de 110 mots. Afin de pouvoir comparer les modèles obtenus en anglais et en français, des traductions anglaises des mots français ont été utilisées. Les groupes ont ainsi été numérotés en comparant les descripteurs du modèle en français à leur traduction en anglais. On observe une grande similarité entre les deux modèles obtenus. Les catégories de sensations ont toutes été à nouveau trouvées. Parmi les descripteurs communs aux deux modèles, 82,1% ont une classification identique sur les catégories de sensation identifiées. Après classification de tous les mots de la base en français, on observe une classification globale identique à 76,5% avec le modèle en anglais, ce qui prouve la robustesse du processus de formalisation et de classification pour les langues anglaise et française (l'écart entre ces résultats pouvant s'expliquer par les subtilités propres à chaque langue, ainsi que par les opérations de traduction effectuées pour obtenir les correspondances anglais-français).

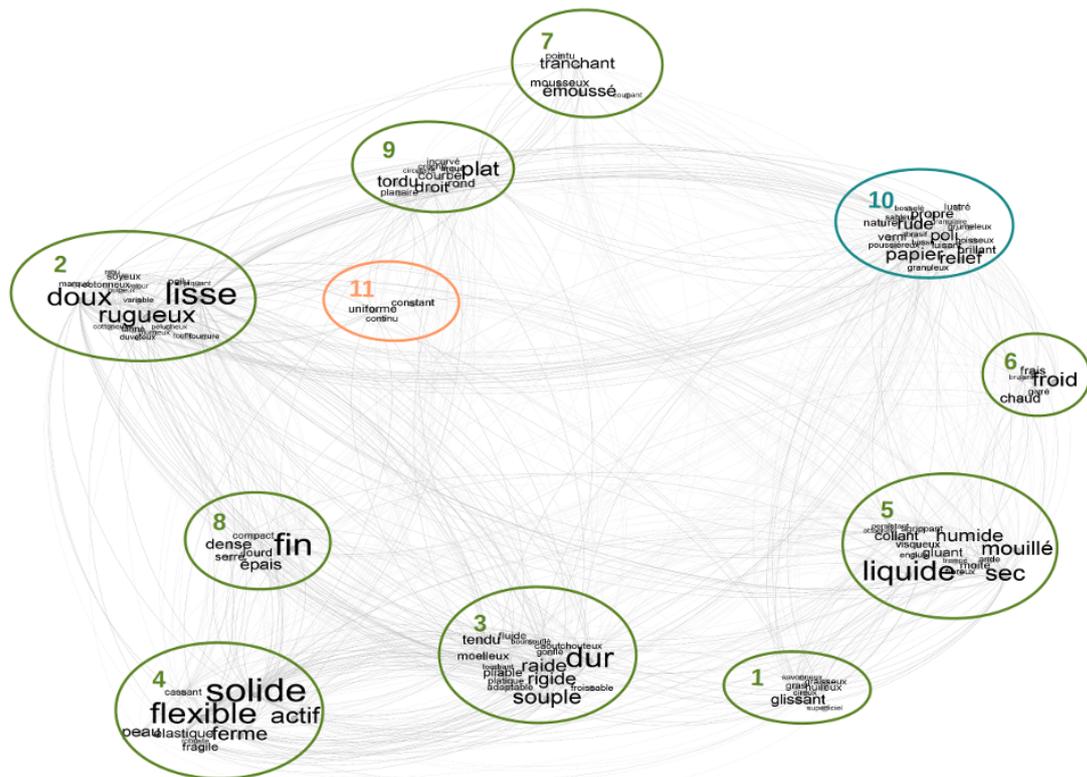


Figure 2.18 – Résultat du regroupement sémantique obtenu en utilisant les mots de la base en français

2.3.4 Cohérence et intérêt par rapport aux méthodes existantes

Nous avons par ailleurs souhaité compléter la validation de notre méthode en la confrontant à certaines méthodes existantes de description des sensations haptiques. Les méthodes de Okamoto et al. (2013), de Sensotact (Crochemore et al., 2003) et de SynTouch (2017) ont été choisies pour cette comparaison. Le modèle de description obtenu a d'abord été utilisé pour donner une représentation des mots employés dans ces sources. Nous avons ensuite comparé notre modèle à des modèles construits sur la base des catégories proposées par ces autres méthodes.

Positionnement d'autres méthodes par rapport à notre modèle

Pour positionner les méthodes de description de Okamoto et al. (2013), Sensotact (Crochemore et al., 2003) et SynTouch (2017) par rapport à notre modèle de description, nous avons tout d'abord listé les mots de ces sources qui sont présents dans notre base de mots. Le tableau 2.6 présente un extrait de ces listes. Les mots de ce tableau sont classés par ordre d'occurrence (les mots situés en haut de la liste apparaissent plus de fois que ceux situés en bas).

Nous avons ensuite positionné les mots de chaque méthode sur les 9 catégories de sensation proposées et leurs différents niveaux d'intensité, et cela afin d'observer le recouvrement obtenu par rapport à notre méthode. La figure 2.19 montre les représentations graphiques obtenues. Les labels sur les graphes sont les mots principalement utilisés par ces trois méthodes pour décrire leurs axes sensoriels.

Nous tirons plusieurs observations de ces figures. Tout d'abord, les catégories EHS 1 à 3 sont également représentées dans les méthodes existantes. La méthode Sensotact dispose de plusieurs axes pour décrire certaines catégories proposées, principalement en raison de la classification par mode d'exploration utilisée par Crochemore (Crochemore et al., 2003). Par exemple, les dimensions de Sensotact *Roughness*, *Relief* et *Fibrous* sont associées à la catégorie EHS 2. Nous pouvons également observer que les catégories numérotées de 4 à 6, ainsi que celle

Okamoto	Sensotact	Syntouch
Rough	Sensitive	Texture
Texture	Rough	Deformed
Hard	Light	Sliding
Smooth	Skin	Cool
Soft	Regular	Coarse
Warm	Nervous	Thermal
Rope	Slippery	Smooth
Slipper	Fibrous	Rough
Sticky	Raw	Warm
Moist	Hard	Low
Cold	Deep	Small
Dry	Active	Skin
Strucure	Strong	Rope
Skin	Flat	Regular
Stiff	Cut	Raw
Flat	Clear	Icy
Even	Warm	Even
Contrast	Thin	Damp
Oily	Soft	Adhesive
Thick	Firm	Uniform
...

Tableau 2.6 – Liste des 20 premiers mots (classés par nombre d'occurrences) trouvés dans les sources (Crochemore et al., 2003; Okamoto et al., 2013; SynTouch, 2017) et présents dans notre base de mots

numérotée 9, sont cohérentes avec au moins deux de ces trois méthodes, mais leur représentation ne couvre cependant pas la plage entière d'intensité de sensation disponible dans notre modèle. Les catégories EHS 7 et 8 ne sont par contre pas mentionnées par ces méthodes, celles-ci se focalisant davantage sur les aspects **tactiles** de la perception au toucher et n'abordant pas forcément les notions de kinesthésie ou de douleur au toucher.

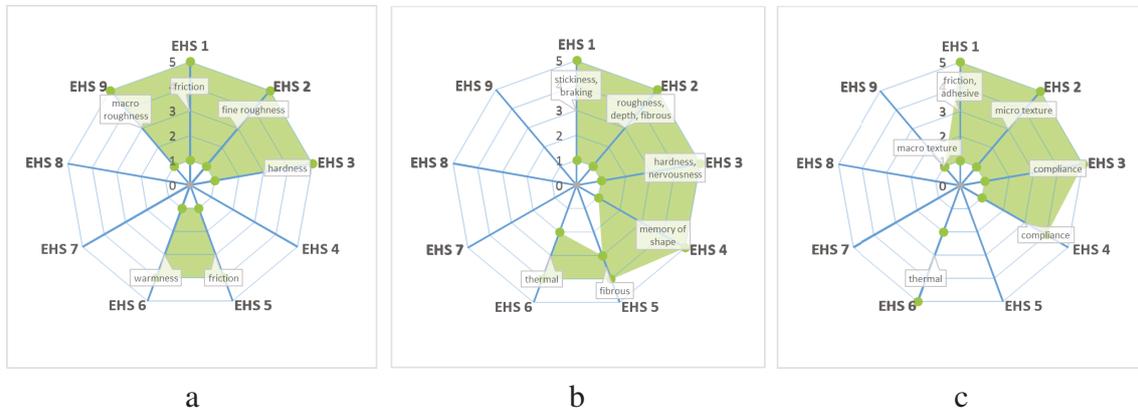


Figure 2.19 – Représentation formalisée des méthodes de description de Okamoto (Okamoto et al., 2013) (a), Sensotact (Crochemore et al., 2003) (b) et Syntouch (SynTouch, 2017) (c) dans l'espace de description proposé

Positionnement de notre modèle par rapport à d'autres méthodes

Les méthodes existantes ne disposant pas d'un modèle établissant des relations entre les mots et les catégories proposées, il est difficile de positionner notre modèle par rapport à ces méthodes. Nous avons toutefois réalisé cette comparaison en considérant les catégories proposées par ces méthodes pour appliquer l'étape de classification. Nous construisons donc pour chacune de ces méthodes un modèle qui se limite à l'association des mots de notre base aux catégories données par ces méthodes en se basant sur les relations sémantiques de chacun des mots. Le tableau 2.7 donne les descripteurs principaux décrivant les catégories proposées par ces trois méthodes.

Okamoto	Sensotact	Syntouch
friction	stickiness	friction
fine roughness	braking	adhesive
hardness	roughness	micro texture
warmness	depth	compliance
macro roughness	fibrous	thermal
	hardness	macro texture
	nervousness	
	memory of shape	
	fibrous	
	thermal	

Tableau 2.7 – Liste des descripteurs principaux des méthodes existantes (Crochemore et al., 2003 ; Okamoto et al., 2013 ; SynTouch, 2017)

Les tableaux en 2.8 montrent les résultats de comparaison entre notre modèle et les modèles reconstruits des trois autres méthodes. Les pourcentages affichés indiquent le ratio de mots relevant de chaque sensation élémentaire qui sont également associés aux catégories des autres méthodes.

		Catégories Okamoto				
		Friction	Fine Roughness	Hardness	Warmness	Macro Roughness
Catégories de sensations élémentaires identifiées	EHS 1 Grip	82%	4%	1%	4%	0%
	EHS 2 Relief	9%	90%	30%	33%	12%
	EHS 3 Hardness	9%	32%	84%	30%	19%
	EHS 4 Reactivity	6%	21%	14%	12%	3%
	EHS 5 Residue	33%	8%	31%	9%	7%
	EHS 6 Warmth	0%	7%	24%	93%	3%
	EHS 7 Pain	3%	3%	3%	3%	0%
	EHS 8 Weight	6%	5%	21%	18%	22%
	EHS 9 Shape	9%	21%	7%	10%	91%

a

		Descripteurs Sensotact									
		Stickiness	Nervousness	Hardness	Memory	Slippery	Roughness	Fibrous	Braking	Relief	Thermal
Catégories de sensations élémentaires identifiées	EHS 1 Grip	89%	0%	1%	0%	29%	2%	11%	93%	4%	0%
	EHS 2 Relief	14%	38%	29%	17%	3%	73%	39%	0%	93%	10%
	EHS 3 Hardness	7%	0%	80%	17%	6%	22%	28%	0%	25%	20%
	EHS 4 Reactivity	4%	75%	10%	83%	6%	7%	6%	7%	16%	3%
	EHS 5 Residue	29%	25%	30%	0%	17%	9%	6%	7%	12%	0%
	EHS 6 Warmth	0%	0%	27%	0%	0%	3%	0%	0%	11%	87%
	EHS 7 Pain	4%	13%	2%	0%	0%	4%	11%	7%	3%	3%
	EHS 8 Weight	14%	0%	18%	0%	0%	9%	33%	33%	14%	0%
	EHS 9 Shape	7%	0%	7%	0%	9%	20%	0%	7%	22%	7%

b

		Catégories Syntouch					
		Friction	Adhesive	Micro texture	Compliance	Thermal	Macro texture
Catégories de sensations élémentaires identifiées	EHS 1 Grip	29%	88%	4%	0%	0%	1%
	EHS 2 Relief	3%	8%	90%	20%	10%	15%
	EHS 3 Hardness	6%	8%	32%	20%	20%	17%
	EHS 4 Reactivity	6%	0%	21%	80%	3%	4%
	EHS 5 Residue	17%	28%	8%	0%	0%	8%
	EHS 6 Warmth	0%	0%	7%	0%	87%	3%
	EHS 7 Pain	0%	4%	3%	0%	3%	0%
	EHS 8 Weight	0%	8%	5%	0%	0%	20%
	EHS 9 Shape	9%	4%	21%	0%	7%	85%

c

Comme certains mots peuvent avoir plusieurs associations, la somme des pourcentages par ligne ou colonne est parfois supérieure à 100%.

Tableau 2.8 – Résultats de comparaison des associations aux catégories du modèle proposé et des modèles reconstitués des méthodes de Okamoto et al. (2013) (a), Sensotact (Crochemore et al., 2003) (b) et SynTouch (2017) (c)

Nous observons une grande proximité avec les résultats obtenus précédemment, ce qui conforte l'analyse effectuée sur les mots relevés dans ces sources. Nous notons par ailleurs que, de par les liens sémantiques des mots impliqués, certaines catégories de ces méthodes trouvent également une part de correspondance sur d'autres catégories EHS. Par exemple, la catégorie *Adhesive* de la méthode Syntouch a une correspondance à hauteur de 28% avec la catégorie EHS 5 alors que la figure 2.19 n'indiquait pas de correspondance. Comme vu précédemment, certaines catégories des autres méthodes ont des associations proches sur les catégories proposées. Par exemple, les catégories *Roughness* et *Relief* de Sensotact ont des associations très proches. La catégorie *Fibrous* est par contre plus répartie sur les catégories EHS ce qui indiquerait que le modèle proposé ne serait pas aussi précis que celui de Sensotact pour ce qui est de la description de cette sensation.

Synthèse de l'analyse de cohérence

Le modèle obtenu au travers du processus de formalisation proposé est donc cohérent avec ces trois méthodes bien connues de la littérature car il existe une nette correspondance au niveau de la description des sensations haptiques. Ces méthodes ont été construites par des experts de l'analyse sensorielle et en utilisant des échantillons concrets, tandis que notre modèle s'appuie principalement à ce stade sur des sources sémantiques. Néanmoins, la cohérence observée vis-à-vis de ces méthodes tend à indiquer que notre approche est valide et offre une description effective des sensations haptiques.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthode dans le but de répondre aux besoins de définition et de formalisation des connaissances du contrôle haptique. Nous y avons ainsi décrit la construction d'un modèle intégrant l'ensemble de ces connaissances.

Tout d'abord, la volonté de structuration et de réduction de la complexité de description des sensations haptiques a été concrétisée en proposant, grâce à un processus d'analyse sémantique, un regroupement par catégories de sensation (9 EHS : *Adhérence, Relief, Dureté, Réactivité, Résidu, Chaleur, Douleur, Poids, Forme*). Le modèle auquel nous sommes parvenus associe le vocabulaire communément utilisé pour décrire les sensations haptiques à une représentation plus formelle. Ce modèle est générique car nous l'avons construit indépendamment d'un contexte spécifique de mise en place de contrôle haptique. Nous avons également montré sa correspondance avec différents domaines d'application et matériaux. La mise en relation des catégories de sensation avec les mouvements exploratoires, les effecteurs et les stimuli apporte également de précieuses informations, en particulier lorsqu'il s'agit de décider de la manière de toucher un produit lors d'un contrôle.

Le processus utilisé pour construire le modèle intègre également la possibilité d'ajouter de nouveaux mots ou de nouvelles relations. Notre modèle pourra donc être enrichi et corrigé au fil de son utilisation (autres matériaux ou domaines d'application). En particulier, les mots dont la modélisation aura été validée par une utilisation dans un cas d'étude constitueront une nouvelle base de descripteurs de référence qui pourra être à son tour utilisée pour affiner la classification des autres mots.

Plusieurs points concernant la validation du modèle, ainsi de sa méthode de construction, ont également été abordés dans ce chapitre. L'indépendance des catégories de sensation a ainsi été vérifiée, ainsi que la robustesse de sa construction par rapport à des modifications pouvant être apportées dans la base de mots. De plus, notre méthode apporte plusieurs améliorations par rapport à certaines méthodes existantes. Le principal apport concerne la possibilité d'établir des liens entre le vocabulaire et une description formalisée. Notre méthode fournit également des aspects de la perception au toucher non abordés dans les méthodes existantes, comme les connaissances liées des propriétés dynamiques du toucher ou celles liées à la sensation de douleur au toucher. Si les méthodes existantes peuvent fournir des informations plus détaillées sur un contexte d'application donné (Sensotact par exemple dans le domaine automobile), notre méthode élargit la portée de l'application, avec l'utilisation d'un vocabulaire plus étendu. Sa capacité d'évolu-

tion est également un atout important dont ne disposent pas les autres méthodes.

Ce modèle a été utilisé dans la suite de nos travaux pour passer d'une expression informelle des attentes de qualité haptique à une description plus formelle. Il sert ainsi de base à la définition de spécifications de contrôle standardisées et adaptées aux problématiques de contrôle qualité rencontrées. Les informations contenues dans le modèle (mots, sensations, modes d'exploration, ...) sont en effet très importantes à connaître lors de la mise en place d'un contrôle haptique des produits.

Étant donné le nombre très important d'informations de ce modèle et la complexité des relations qui s'établissent entre ces informations, nous nous sommes posés la question de leur représentation et de leur organisation. Il s'agit en particulier de disposer d'un système qui rend ces informations rapidement accessibles, utilisables dans des contextes d'application différents et modifiables dans le temps. Le chapitre 3) détaille le système que nous proposons pour organiser ces connaissances, raisonner à partir de ces connaissances et les enrichir au fil du temps.

3

Organisation et gestion des connaissances haptiques

Sommaire

3.1	Introduction	70
3.2	État des lieux de l'organisation des connaissances pour le contrôle haptique	71
3.2.1	Les techniques d'organisation des connaissances	71
3.2.2	La structuration ontologique des connaissances	73
3.2.3	Les systèmes existants pour la gestion des connaissances	77
3.3	Une représentation ontologique des connaissances du contrôle sensoriel	80
3.3.1	Architecture ontologique générale	80
3.3.2	Ontologie de contexte d'application	82
3.3.3	Ontologie de perception sensorielle haptique	84
3.3.4	Ontologie d'instrumentation	90
3.3.5	Autres ontologies de domaine implémentées	91
3.3.6	Validation de la représentation ontologique	92
3.4	Un système pour la gestion évolutive et contextuelle des connaissances	94
3.4.1	Schéma général de gestion des connaissances	94
3.4.2	Enrichissement et évolution de la base de connaissances	95
3.4.3	Gestion du contexte d'utilisation	97
3.4.4	Synthèse	98
3.5	Conclusion	99

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons défini et modélisé l'ensemble des connaissances à détenir pour mettre en place un contrôle haptique des produits. Il s'agit maintenant de s'interroger sur le système à utiliser pour organiser, représenter et faire évoluer ces connaissances. Pour cela, plusieurs objectifs ont été définis :

- **Représenter de manière abstraite et structurée l'ensemble de ces connaissances**, afin qu'elles puissent être utilisées par un système informatique pour aider à la mise en place du contrôle.
- **Représenter le modèle de description des sensations précédemment créé**, ainsi que les relations avec l'exploration, pour fournir un accès simplifié à ces connaissances tout en conservant la complexité d'expression.
- **Rendre cette représentation vivante** en permettant son enrichissement continu et son évolution par l'expérience.
- **Rendre possible la contextualisation de ces connaissances** (suivant le domaine d'application par exemple), en particulier lorsqu'il s'agit de connaissances acquises par l'expérience d'utilisation.

Pour répondre à ces objectifs, nous faisons d'abord, dans ce chapitre, un état des lieux rapide sur les systèmes existants d'organisation et de gestion des connaissances (section 3.2). Nous nous intéressons plus spécifiquement aux systèmes basés sur une structuration par ontologies des connaissances. Nous rappelons le principe général d'une structure de ce type ainsi que les différents types d'ontologies qui peuvent être construites. Puis, nous présentons notre proposition de représentation ontologique des connaissances du contrôle sensoriel (section 3.3). Nous terminons ce chapitre en proposant un système pour la gestion de ces connaissances, en insistant tout particulièrement sur sa capacité à les faire évoluer et à leur associer un contexte d'utilisation (section 3.4).

3.2 État des lieux de l'organisation des connaissances pour le contrôle haptique

En raison de la manière qualitative dont les êtres humains représentent et communiquent les sensations, le domaine de la perception sensorielle fait largement appel à la sémantique. L'utilisation de systèmes sémantiques et, par extension, de systèmes à base de connaissances, s'avère donc très appropriée dans le domaine de la qualité perçue. Le monde industriel voit un intérêt grandissant à l'utilisation de technologies permettant la capture, la représentation, la récupération et la réutilisation des connaissances (Davenport & Prusak, 1998; Zanni-Merk, 2014), notamment dans des domaines où la prise de décision est importante. Les technologies des connaissances²¹ ont ainsi été développées et adaptées aux applications industrielles et organisationnelles. Elles incluent en particulier les systèmes à base de connaissances, les technologies sémantiques, le traitement du langage naturel ainsi que les techniques d'exploration de données et d'extraction de connaissances à partir de cas observés (Milton, 2010). La gestion des connaissances dans un but applicatif comprend généralement trois étapes principales : l'acquisition des connaissances, leur modélisation puis leur mise en œuvre. On peut noter que, dans le but du développement d'un système à base de connaissances, il est primordial que les techniques employées puissent être utilisables par des systèmes informatisés afin d'accéder aux connaissances et au besoin de pouvoir les manipuler.

3.2.1 Les techniques d'organisation des connaissances

Depuis le développement et la généralisation des systèmes informatiques, différentes techniques ont été proposées pour représenter et organiser les connaissances. Dans les dernières décennies, les systèmes experts modélisaient les connaissances et leur comportement à l'aide de règles de production, et cela dans le contexte particulier de la résolution d'un problème. Dans le domaine plus spécifique de l'haptique, Klatzky et al. (1985) mentionnait déjà en 1985 la notion de système expert pour rendre compte de la capacité de l'être humain de reconnaître des objets par le toucher. Les travaux plus récents de Dutu (2015) visaient à concevoir un modèle de règles dédié à la mise en relation de caractéristiques de signaux vibratoires et de quelques caractéristiques sensorielles (la notion d'enfoncement par exemple) et hédoniques (la notion de confort par exemple) sur des écrans tactiles. Si cette modélisation permet effectivement une représentation et une prédiction de notions expertes à partir de caractéristiques physiques du produit en lien avec des éléments sémantiques (par exemple, enfoncement, propriété du signal, confort, ...), elle ne permet pas en revanche une généralisation des connaissances à d'autres domaines d'application. De plus, l'évolution du modèle n'est pas gérée de manière systématique. Même si les règles identifiées se sont montrées utiles dans deux contextes proches (automobile et aéronautique), l'auteur indique en effet qu'une modification est nécessaire pour une adaptation à un autre contexte.

Les notions de structuration, la contextualisation et la gestion évolutive de connaissances généralisées et génériques apparaissent ainsi comme des défis majeurs dans le développement de ce type de systèmes. Parmi les technologies sémantiques, la conceptualisation des connaissances se révèle être une approche très intéressante pour structurer

21. *Knowledge Technologies* en anglais.

et formaliser les éléments d'un domaine scientifique, afin de permettre leur accès et leur réutilisation. Au début des années 2000, l'association d'une logique de description et d'une structuration en réseau sémantique conduisent au développement de langages et de formats décrivant formellement des connaissances, notamment en ce qui concerne le développement d'*ontologies* dans le cadre du *web sémantique*. En sciences informatiques, une « *ontologie* » est un modèle abstrait formel basé sur la logique de description (un sous-ensemble de la logique de premier ordre). Cette logique fait appel à des méthodes et à des règles pour conceptualiser et modéliser les connaissances. Couplée à une représentation numérique des informations contenues dans l'ontologie, un système à base d'ontologies vise généralement à partager des connaissances et à effectuer des raisonnements automatisés à partir des connaissances. Comparé aux notions de *taxonomie* et de *thesaurus*, l'*ontologie* propose un niveau de formalisme plus élevé (Sparna, 2016).

Le cadre de description des ressources RDF (1999) (Carroll & Klyne, 2004) (*Ressource Description Framework*), puis plus récemment le langage OWL (2002) (*Ontology Web Language*)²² sont des exemples de l'effort de standardisation mis en œuvre autour de l'échange et la représentation des connaissances (notamment grâce aux directives du W3C²³, dont le logo est visible en figure 3.1. L'utilisation de ces techniques, et notamment des *ontologies*, s'avère donc particulièrement pertinente lorsqu'un système est amené à manipuler des connaissances sémantiques (Grimm, Hitzler, & Abecker, 2007; Zanni-Merk, 2014). De nombreuses études ont montré leur intérêt sur des sujets aussi variés que la médecine (Ayadi et al., 2017), le diagnostic d'entreprise (Gartiser, Zanni-Merk, Boullosa, & Casali, 2014), le diagnostic de pannes (Karaouzene & Cheikh, 2015), l'analyse des phénomènes géospatiaux (Roda & Musulin, 2014) ou encore le management de la qualité dans l'industrie (Kim, Fox, & Grüniger, 1999).

Le web sémantique fait de manière générale l'hypothèse d'un monde ouvert. Ainsi, le fait de ne pas décrire un élément (concept ou relation) du monde dans cette représentation ne signifie pas que cet élément n'y existe pas. Cela signifie que l'on ne saura pas forcément donner d'information à propos de cet élément. En conséquence, les représentations formelles du web sémantique, ainsi que les systèmes de gestion des connaissances, sont par définition sujets à des changements continuels qui les amènent à s'enrichir et à évoluer (Maedche, Motik, Stojanovic, Studer, & Volz, 2003). Les ontologies, qui sont des supports à la représentation de ces connaissances, sont donc également appropriées pour le développement de systèmes intelligents pour l'industrie.



Figure 3.1 –
Logo du W3C
(World Wide Web
Consortium)

22. RDF et OWL sont basés sur la structure de fichiers XML (Extensible Markup Language) : <https://www.w3.org/XML/>

23. W3C (World Wide Web Consortium) : <https://www.w3.org/>

3.2.2 La structuration ontologique des connaissances

La figure 3.2 montre les différents types d'ontologies selon leur niveau de généralisation.

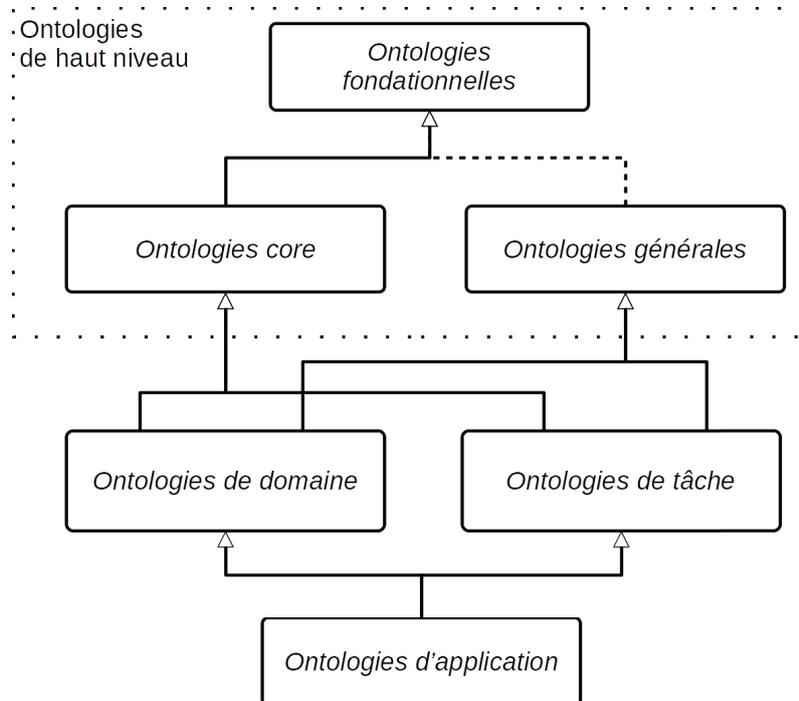


Figure 3.2 – Synthèse des types d'ontologies suivant le niveau de généralisation : de bas en haut, du plus spécifique au plus générique

La structuration classique d'une représentation à base d'ontologies (Guarino, 1997; Roussey, Pinet, Kang, & Corcho, 2011) se compose principalement de trois niveaux (donnés par ordre décroissant de généralisation) :

- les ontologies de haut niveau,
- les ontologies de tâche,
- les ontologies d'application.

Différents types d'ontologies de haut niveau peuvent être distingués. Les ontologies fondationnelles (ou ontologies de plus haut niveau²⁴) définissent une base formelle ayant le plus haut degré de généralité. Un nombre réduit d'ontologies atteignent ce niveau de généralité (Zanni-Merk, 2014, p.108). A ce niveau, on trouve l'ontologie DUL (2010) (DOLCE Ultra-Lite) qui est une évolution plus synthétique de l'ontologie DOLCE (2006) (Descriptive Ontology for Linguistic and Cognitive Engineering), l'ontologie GFO (2006) (General Formal Ontology), l'ontologie SUMO (2001) (Suggested Upper Merged Ontology) ou encore l'ontologie BFO (2015) (Basic Formal Ontology).

Les ontologies *core*²⁵, se situent à un niveau intermédiaire de généralisation. Parfois, selon le type de domaine, il n'existe pas de distinction claire entre ontologie core et fondationnelle. Néanmoins, plus le domaine s'éloigne d'un domaine purement théorique,

24. *Top-level ontology* en anglais

25. *Core*, qui peuvent ici être traduites par noyaux ou cœurs

plus il est intéressant de choisir une ontologie ayant un degré de généralité approprié à ce domaine. Dans ce contexte, les ontologies *core* trouvent leur place en complétant les ontologies fondationnelles. Elles forment un noyau générique rendant cohérentes les ontologies de domaine et de tâche impliquées dans la représentation des connaissances d'un domaine plus spécifique ou d'un processus. Un certain nombre d'ontologies *core* ont été développées afin de répondre à ce besoin. On peut d'ailleurs noter que plus le niveau de généralisation est bas, plus la littérature est fournie. Le nombre d'ontologies *core* est ainsi plus important que celui des ontologies fondationnelles, mais plus faible que le nombre d'ontologies de domaine (le diagramme de la source (Abele, McCrae, Buiteelaar, Jentzsch, & Cyganiak, 2017) en donne un exemple). L'augmentation de la spécificité implique néanmoins l'utilisation de critères de sélection plus stricts lors de la recherche d'ontologies pouvant convenir à une problématique précise. Dans le cas du contrôle de la qualité sensorielle, l'utilisation de l'ontologie *core* SSN (Semantic Sensor Network²⁶) (Compton et al., 2012) se révèle pertinente. Nous la détaillons ci-après.

Les ontologies générales correspondent à des modèles décrivant des concepts génériques pouvant être directement appliqués. Par exemple, l'ontologie temporelle *Time Ontology* pour décrire les phénomènes de temps est un bon exemple (Hobbs & Pan, 2017). Ces ontologies complètent parfois également celles de plus haut niveau.

Les ontologies de domaine représentent des connaissances liées à un domaine d'utilisation. Bien que très souvent spécifiques, ces connaissances peuvent être généralisées grâce aux ontologies de plus haut niveau qui leur procurent ainsi un "squelette" formel. La construction de ce type d'ontologies requiert souvent une grande expertise dans le domaine concerné et nécessite l'utilisation de méthodes pour acquérir et modéliser des connaissances. Les ontologies qui correspondent le mieux à notre domaine, le contrôle sensoriel, sont détaillées ci-après. Les ontologies de tâche décrivent quant à elles les processus réalisant les tâches impliquées dans le domaine (par exemple le processus de fabrication d'un produit). Enfin, les ontologies d'application se positionnent au plus près de l'utilisation des connaissances dans un cas très concret d'application. Par rapport aux ontologies de domaine et les ontologies de tâche, elles particularisent encore un peu plus les connaissances pour les faire coller aux besoins de l'application.

L'ontologie *core* SSN

L'ontologie « core » SSN (Compton et al., 2012) a été développée dans le cadre du W3C (initialement entre 2009 et 2011, puis révisée et améliorée entre 2015 et 2017). Cette ontologie apporte une structure formelle à la description des réseaux de capteurs, les procédures impliquées, les propriétés observées et les caractéristiques d'intérêt. Dans la révision la plus récente, la structure proposée se présente sous la forme d'un ensemble de modules, avec notamment un module appelé SOSA intégrant les notions de capteur, d'observation, d'échantillon et d'actionneur²⁷. La structure comprend également un module système (SSN-system) intégrant les propriétés du système de mesure. La figure 3.3 donne une vue d'ensemble de cette ontologie. Celle-ci s'appuie sur les fondements de l'ontologie DUL (2010), mais sa récente amélioration simplifie son utilisation en évitant l'intégration de DUL.

26. SSN : *Semantic Sensor Network*, Réseau de capteurs sémantiques en français

27. *Observation-Actuation-Sampling* en anglais

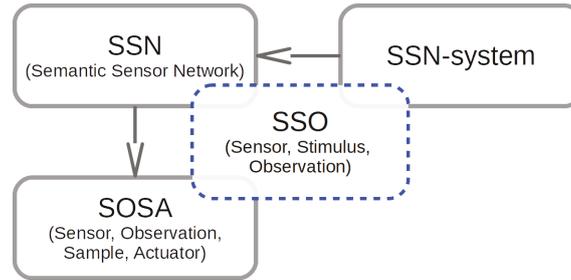


Figure 3.3 – Vue d'ensemble de l'ontologie SSN (2017)

Dans le cadre de ces recherches, nous nous sommes plus spécifiquement intéressés au motif *Stimulus-Capteur-Observation* (SSO²⁸) qui constitue la base de l'ontologie proposée par Janowicz et al. (Janowicz & Compton, 2010). Ce motif est intégré aux parties plus génériques SOSA, SSN et SSN-system (voir la figure 3.3). La figure 3.4 présente quant à elle un extrait simplifié de la partie nommée SSO.

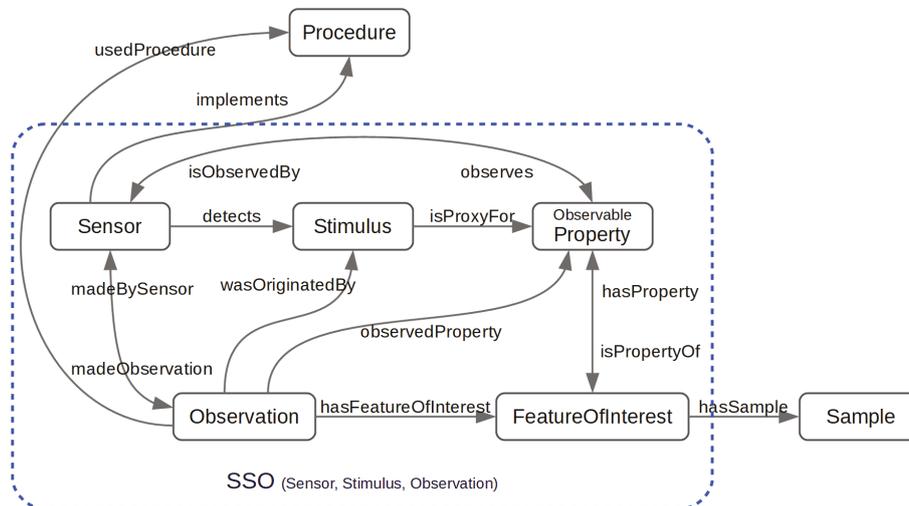


Figure 3.4 – Extrait de l'ontologie SSN focalisé sur le motif SSO (Compton et al., 2012; Janowicz & Compton, 2010)

La figure 3.3 montre une représentation des concepts utilisés dans le cadre de l'observation de propriétés d'un objet à l'aide de capteurs et de stimuli. Ces propriétés observables (au sens large, et non pas uniquement à la vue) sont des propriétés de caractéristiques d'intérêt. Ce schéma décrit ainsi de manière formelle la mesure des propriétés relatives à des caractéristiques à mesurer ou à observer. On note une forte similitude avec le processus de perception humain, le corps humain étant composé de capteurs (récepteurs) détectant et analysant des stimuli pour les transformer en sensations perçues (les propriétés observées).

Cependant, en tant qu'ontologie de haut niveau, SSN (2017) n'intègre pas les détails nécessaires à la description sensorielle, ni au contrôle sensoriel. Les éléments de contexte d'application n'y sont pas non plus présents. Ce modèle doit donc être complété par des ontologies de domaine représentant de manière plus précise les connaissances dont nous avons besoin.

28. *Stimulus-Sensor-Observation pattern* en anglais

Les ontologies de domaine d'intérêt pour le contrôle de la qualité sensorielle

Même si la conceptualisation des connaissances sous forme d'ontologies a connu de nombreuses applications (Abele et al., 2017), peu d'entre elles se sont directement attachées à représenter les connaissances liées à la qualité sensorielle et plus particulièrement au sens du toucher. Un des rares exemples d'ontologie proposée dans ce domaine concerne le domaine du développement de logiciels pour les interfaces à retour haptique (permettant de reproduire virtuellement les sensations du toucher) (Myrgiotti, Bassiliades, & Miliou, 2013 ; Myrgiotti et al., 2009). Cette ontologie propose une définition formelle des informations tactiles nécessaires à ce type d'interfaces et intègre notamment certaines caractéristiques des surfaces, ainsi que les éléments du corps humain impliqués dans la perception tactile. Par exemple, les notions liées à la biologie du corps humain y sont détaillées (récepteurs, nerfs, etc.), de même que certaines propriétés des objets ayant un lien avec le sens du toucher, ainsi que les stimuli et certains éléments de description de la perception tactile. Si cette ontologie intègre plusieurs éléments intéressants pour notre problématique de structuration des connaissances du contrôle haptique, elle ne dispose cependant pas en l'état de la structure qui serait nécessaire pour une description complète des sensations et de toute la sémantique qui y est associée.

Par ailleurs, le modèle proposé par Myrgiotti et al. (2009) s'appuie sur l'ontologie de haut niveau BFO (2015) qui se compose principalement des concepts de *continuant* et de *occurrent*. Le premier désigne les éléments qui ont une existence continue dans le temps et une capacité à perdurer quelque soient les changements effectués. Ils sont par contre liés à la notion d'espace. Les *occurrents* ont quant à eux, en plus de leur relation à l'espace, une dimension temporelle. Il peut s'agir par exemple de processus, d'évènements, etc. Même si cette structure est intéressante, son niveau de généralisation étant très élevé, une adaptation serait nécessaire pour être utilisée dans le domaine du contrôle sensoriel. En comparaison, la structure proposée par l'ontologie SSN (2017) fait office d'intermédiaire plus adapté à l'utilisation que nous souhaitons en faire.

Un certain nombre d'ontologies proposées dans d'autres domaines d'application de l'industrie peuvent également apporter des réponses à notre problématique de modélisation des connaissances du contrôle haptique. Par exemple, plusieurs ontologies représentant les connaissances liées aux matériaux de fabrication ont été proposées dans (Ashino, 2010 ; Usman et al., 2011 ; Y. Zhang, Luo, Zhao, & Zhang, 2015). Celles-ci pourraient notamment répondre à un besoin de mise en contexte de l'application du contrôle sensoriel. De plus, concernant la représentation des connaissances d'un système de mesure qui pourrait être utile pour le contrôle, l'ontologie SSN dispose de la partie (*SSN-system*) dédiée à la description des éléments d'un système instrumenté et à la gestion de caractéristiques de capteurs.

3.2.3 Les systèmes existants pour la gestion des connaissances

L'utilisation d'un modèle de connaissances, mais également sa capacité d'évolution et d'enrichissement, dépendent des outils et des systèmes qui rendent ces opérations possibles. Dans une certaine mesure, il est parfois possible de réaliser ces actions manuellement. Mais lorsqu'on s'intéresse à la gestion de données de masse et en considérant la complexité potentielle des connaissances, il est généralement approprié de mettre en place des outils permettant de *systématiser* ou même d' *automatiser* ce processus. Pour ce qui est de la gestion de connaissances représentées sous forme d'ontologies, différents exemples peuvent être mentionnés.

Les travaux de Y. Zhang et al. (2015) s'appuient par exemple sur un modèle ontologique pour la sélection de matériaux. La plate-forme proposée met en œuvre plusieurs interfaces entre l'utilisateur, les éléments de représentation des connaissances et les méthodes de raisonnement. Une première interface utilisateur impliquant l'éditeur d'ontologie *Protégé* ²⁹ permet de construire la base de connaissances. Une autre interface permet l'accès aux informations de manière simplifiée et intègre les résultats de requêtes pouvant y être réalisées (par exemple la recherche d'un matériau suivant des caractéristiques données et pour un domaine d'application particulier).

Un autre exemple de système est celui proposé par Roda et Musulin (2014) qui se sont focalisés sur la proposition d'une plate-forme d'analyse intelligente des données³⁰ de phénomènes géospatiaux. Le système proposé dans cette étude met en relation des images de satellites et l'expertise perceptive d'un géographe, via une base de connaissances et des méthodes de raisonnement et d'abstraction. Les points d'intérêt pour notre étude sont notamment l'implication de différents éléments ontologiques, telle que l'ontologie *SSN* , dans le cadre d'un système évolutif, ainsi que la capacité de ce système à gérer automatiquement les nouvelles connaissances apportées par un expert. Le système met en relation les informations données par l'expert (par exemple les éléments pouvant être observées dans une image) avec les caractéristiques des images.

Dans le domaine du design et de la conception des produits, les travaux de Monticolo et al. (Girodon, Monticolo, Bonjour, & Perrier, 2015; Monticolo, Badin, Gomes, Bonjour, & Chamoret, 2015; Monticolo, Hilaire, Koukam, & Gomes, 2007) ont notamment mené à la proposition d'une ontologie de domaine et d'un système intelligent pour la gestion et l'exploitation des connaissances. Déployé dans plusieurs contextes industriels, les méthodes et outils développés ont eu un réel intérêt pour la sauvegarde, le partage et la réutilisation des connaissances, et donc de l'expertise acquise par les entreprises dans ce domaine.

Par ailleurs, un cadre structurel appelé KREM (*Knowledge, Rules, Experience, Meta-knowledge* , c'est à dire *Connaissances, Règles, Expérience et Méta-connaissances* en français) a été défini par une équipe du laboratoire *ICube* (Zanni-Merk, 2014, 2015) afin d'optimiser le développement d'un système à base de connaissances, de proposer une solution à la question de leur évolution et de leur contextualisation, tout en garantissant la robustesse de l'ensemble. Ce cadre a notamment été employé dans plusieurs travaux relevant de différents domaines d'application (Gartiser et al., 2014; Zanni-Merk et al., 2015).

29. Éditeur d'ontologie *Protégé* : <https://protege.stanford.edu/>

30. *IDA (Intelligent Data Analysis)* en anglais

Ce cadre formel propose une décomposition des composants impliqués dans un système à base de connaissances. Nous avons vu l'importance de la capacité d'évolution, d'enrichissement et de contextualisation de ce type de système, qui implique de disposer d'une représentation des connaissances qui ne soit pas figée. Pour cela, quatre composants ont été définis pour remplir la fonction "base de connaissances" de ce système de manière complète et robuste (voir figure 3.5).

- Le composant *Connaissances* (*Knowledge* en anglais) contient une représentation conceptuelle des connaissances sous forme de taxonomie et de relations de base.
- Le composant *Règles* (*Rules* en anglais) contient les éléments raisonnant sur les connaissances. Plusieurs types de raisonnement sont envisageables suivant l'application considérée (monotone, spatial, temporel, flou, etc.). Les relations plus complexes et les règles d'associations entre les éléments de connaissances font notamment partie du composant *Règles*.
- Le composant *Expérience* (*Experience* en anglais) permet la capitalisation et la réutilisation des connaissances acquises par l'utilisation du système.
- Le composant *Méta-connaissances* (*Meta-knowledge* en anglais) contextualise les trois autres composants et les adapte au problème rencontré.



Figure 3.5 – Cadre structurel pour le développement d'un système à base de connaissances KREM (Zanni-Merk, 2015)

Le cadre KREM peut s'appliquer aux niveaux ontologiques de domaine ou d'application (tels que décrits dans la figure 3.2). Le but est évidemment d'encourager la construction générique du système de connaissances et de promouvoir sa réutilisation et son enrichissement, notamment grâce à sa structure modulaire. Les composants, présentés ci-dessous, ont des fonctionnalités spécifiques dans le système de connaissances, ce qui permet une séparation des éléments d'intérêt du système. Ainsi, une bonne gestion individuelle mais inter-connectée de ces éléments permettrait une réutilisation et un enrichissement des composants sans perturber le fonctionnement continu du système. Par exemple, ce cadre permettrait l'ajout de connaissances nouvelles mais spécifiques à un cas d'utilisation en modifiant les composants *Meta-connaissances* et *Expérience* sans modifier le composant *Connaissances* et donc en évitant d'introduire des inconsistances logiques dans le modèle original.

La manière dont les connaissances du domaine sont formalisées a une influence sur la façon dont les règles sont exprimées. Ces deux composants (*Connaissances* et *Règles*) sont donc fortement dépendants dans leur expression, mais leur gestion ne peut être réalisée de manière distincte. En particulier, en ce qui concerne le composant *Expérience*,

les nouvelles informations acquises au travers de l'utilisation du système peuvent compléter et enrichir les connaissances disponibles et les règles. Grâce à une gestion distincte de ces deux éléments, il est ainsi possible d'effectuer des modifications et des améliorations ne concernant que l'un ou l'autre de ces deux composants. Finalement, en considérant le contexte d'utilisation comme une méta-connaissance, il est possible d'effectuer une gestion séparée de ces informations et d'utiliser non seulement un mode de raisonnement adapté au contexte, mais également un enrichissement contextuel. Les méta-connaissances interagissent en effet directement avec les connaissances et les règles afin d'indiquer quels éléments de ces deux composants sont les plus appropriés selon le cas d'utilisation.

Chacun de ces composants joue donc un rôle précis dans un système à base de connaissance. De plus, la distinction des fonctions et des rôles permet au système de supporter d'éventuels remplacements, modifications ou réutilisations d'une partie de ces composants sans impacter le reste du système, et surtout en garantissant le fonctionnement continu du système. Utilisé comme cadre structurel d'arrière plan dans le système proposé dans nos travaux, le cadre KREM apporte une ligne directrice importante qui a guidé certains de nos choix dans la conception du système de gestion des connaissances.

de séparer les connaissances de chaque domaine en plusieurs modules ontologiques, et cela de manière à bien distinguer les éléments impliqués et avoir une meilleure visibilité des représentations proposées. Le rassemblement de ces ontologies de domaine forme l'ontologie de contrôle sensoriel appelée *Ontologie feliCity*³¹. Cette ontologie est utilisée par le système à base de connaissances sur lequel s'appuie l'outil logiciel développé (voir chapitre 5). La description de ces modules est donnée ci-dessous :

- L'ontologie de contexte d'application (AC pour *Application Context*) représente les connaissances relevant des produits et des surfaces, ainsi que leurs propriétés relevant des contraintes industrielles et de l'environnement de contrôle.
- L'ontologie de perception sensorielle (SP pour *Sensory Perception*) représente les connaissances relevant de la perception sensorielle humaine. Au sein de ce module, les éléments relevant spécifiquement de la perception haptique sont détaillés (partie SP-H (*Haptic*)).
- L'ontologie de spécification sensorielle (SS pour *Sensory Specification*) représente les connaissances relevant des besoins de spécifications de la qualité haptique des produits. Il s'agit en particulier de préciser les notions d'anomalie et de conformité.
- L'ontologie d'instrumentation sensorielle (SI pour *Sensory Instrumentation*) représente les connaissances relevant de la mesure instrumentée des sensations, incluant les moyens de mesure, les méthodes de traitement des données et de restitution, ainsi que les liens entre perception humaine et mesure.
- L'ontologie de processus de contrôle (CP pour *Control Process*) représente les connaissances relevant de l'organisation des tâches et des processus permettant d'accomplir le contrôle sensoriel.

Le diagramme de la figure 3.6 intègre également les ontologies existantes utilisées dans le développement de cette représentation. En particulier, l'ontologie SSN(Compton et al., 2012) est utilisée comme ontologie de haut niveau. Sa structure apporte notamment un cadre formel, approuvé et partagé par de nombreux chercheurs. La plupart des éléments de connaissances introduits dans les ontologies de domaine développées (représentées en gras sur la figure 3.6) sont ainsi généralisés par les éléments de cette ontologie « core ». Le terme d'alignement est également utilisé pour désigner le fait d'établir une correspondance entre des connaissances provenant de représentation différentes. Par ailleurs, à un niveau de conceptualisation similaire par rapport aux ontologies de domaine développées, les ontologies OML-material (Ashino, 2010; Y. Zhang et al., 2015), HASM (Myrgiotti et al., 2013), et SSN-system (Compton et al., 2012) fournissent des éléments de connaissances, respectivement utiles pour les ontologies AC, SP-H et SI.

Les différentes ontologies proposées, ainsi que leurs liens avec les ontologies d'intérêt de la littérature, sont détaillés dans les paragraphes qui suivent. Chacune de ces ontologies se compose d'un niveau de conceptualisation assez général, correspondant effectivement au type « domaine » (voir la figure 3.2) et d'un niveau plus proche du type « application ». Nous avons choisi dans notre cas de rassembler ces deux niveaux dans ces ontologies car il s'agit en réalité de préciser et d'appliquer les concepts généraux aux besoins du contrôle sensoriel, et plus précisément au cas de la perception haptique pour l'ontologie SP. Nous proposons en particulier une représentation spécifique pour le modèle de connaissances construit au chapitre précédent.

31. *feliCity* est le nom de code de ce projet de recherche.

Remarques concernant le formalisme de construction utilisé

Pour la construction des ontologies, nous avons utilisé le langage OWL (2002) et l'éditeur *Protégé* (voir note 29). C'est notamment ce choix qui permet la gestion de l'hypothèse d'un monde ouvert. Suivant ce formalisme, la représentation des connaissances comprend l'utilisation de trois composants principaux (Horridge et al., 2007) : les concepts (ou classes), les propriétés (déclinées en propriétés d'objet ou de donnée), et les individus (ou instances de classe). Les concepts sont une expression formelle des entités réelles qu'ils représentent. Ces concepts peuvent être hiérarchisés. Les propriétés correspondent à des restrictions dans le langage OWL. Elles peuvent exprimer des relations soit entre deux concepts (propriétés d'objet ou *object properties*), soit avec des données (propriétés de donnée ou *data properties*) associées à une même entité (concept ou relation). Les individus représentent des cas particuliers réels de ces concepts. Ils peuvent ainsi bénéficier des relations dont leurs concepts disposent. Selon les cas, il est alors possible de descendre dans la hiérarchie des concepts pour ajouter des détails de description. Néanmoins, la distinction entre concepts et individus est en général définie selon les besoins de l'application et elle s'arrête toujours à la description d'un objet réel ou d'une utilisation unique. L'expression des relations, attributs ou propriétés entre une ou plusieurs entités de l'ontologie constitue un *axiome*.

Dans le web sémantique, et donc dans les langages OWL ou RDF, les ontologies ont un identifiant unique appelé IRI (*Internationalized Resource Identifiers* sous la forme d'une adresse URL³²). Les ontologies proposées ont une base d'IRI commune³³ et une partie spécifique à chaque ontologie de domaine proposée (/ApplicationContext par exemple). Par ailleurs, chaque entité de l'ontologie (concepts, relations, etc.) a un identifiant unique qui a pour base l'IRI de l'ontologie complétée du label de l'entité (*Sensation* par exemple).

Pour l'illustration des ontologies et des diagrammes du système de gestion des connaissances, nous avons, lorsque cela était possible, utilisé le formalisme proposé par la méthodologie CommonKads (Schreiber et al., 2000).

3.3.2 Ontologie de contexte d'application

Une représentation correcte, suffisamment complète et surtout partagée des connaissances décrivant le contexte d'application du contrôle, est nécessaire. Nous avons vu dans le chapitre 1 qu'un certain nombre de domaines d'application et de matériaux peuvent être impliqués dans un contrôle de ce type. En fait, tout produit ayant une surface accessible au toucher ou dont les anomalies potentielles sont perceptibles au toucher, pourrait être considéré pour une représentation des connaissances exhaustive. Dans le cadre de l'hypothèse de monde ouvert faite en utilisant une représentation ontologique, nous proposons d'intégrer dans un premier temps les informations disponibles (acquises notamment lors de la construction du modèle au chapitre précédent), et de prévoir la possibilité d'enrichir par la suite ces informations lors de l'utilisation de la base de connaissances pour des cas d'application concrets.

L'ontologie de contexte d'application (AC) proposée se focalise donc principalement sur trois éléments dont nous avons besoin dans le cadre du contrôle sensoriel : le domaine

32. URL : voir <https://en.wikipedia.org/wiki/URL>

33. IRI commune de l'ontologie *feliCity* : <http://www.ineva.fr/ontologies/2017/FelicityOnto>

d'application, les matériaux et les contraintes liées au contrôle et à la fabrication³⁴. Ces éléments s'appliquent aux produits et aux surfaces à contrôler. Par ailleurs, la langue utilisée et les catégories de personnes impliquées constituent également des éléments de contexte. Afin d'organiser ces connaissances de contexte, nous nous sommes d'abord appuyés sur l'organisation de ces éléments dans l'industrie, notamment grâce aux *défautheques* que nous avons consultées dans les domaines de la joaillerie, de l'automobile et de l'ameublement. Les ontologies existantes nous ont également fourni des informations supplémentaires et déjà formalisées afin de hiérarchiser les connaissances et de mettre en place une ontologie de contexte dédiée au contrôle sensoriel.

La figure 3.7 présente un résumé du contenu de cette ontologie ainsi que celui de sa correspondance avec les connaissances des ontologies SSN (Compton et al., 2012) et OML-Material (Ashino, 2010).

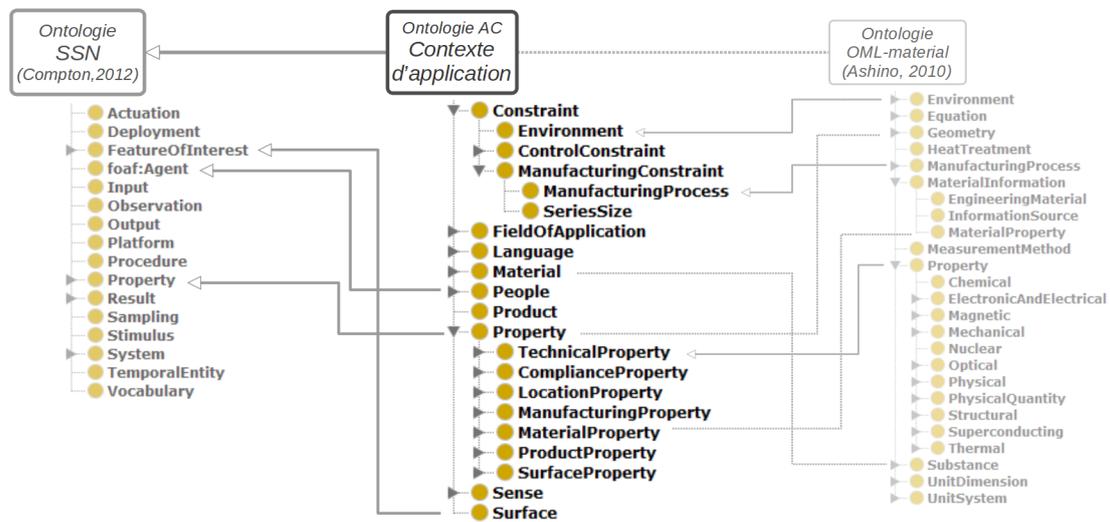


Figure 3.7 – Ontologie de contexte d'application (AC) et relations avec les ontologies existantes (SSN et OML-Material)

L'ontologie OML-Material fournit notamment des informations concernant les matériaux, leurs propriétés techniques, leurs procédés de fabrication, ainsi que des notions générales sur l'environnement de fabrication (qui peut également correspondre à un environnement de contrôle). De plus, d'autres sources, telles que des *matériauthèques* en ligne (Innovathèque³⁵ par exemple), nous ont permis de compléter les listes de domaines d'application (sous-classes du concept *FieldOfApplication*) et de matériaux (sous-classes de *Material*). L'ontologie SSN permet par ailleurs d'aligner la notion de propriété (avec le concept *Property*). Par contre, étant donné que l'ontologie SSN ne traite pas directement du contexte d'application, il n'est pas possible d'aligner certains autres concepts de l'ontologie AC. Afin de compléter sa base structurale, il serait possible de s'appuyer sur l'ontologie DUL (2010) qui a un plus haut niveau conceptuel et qui est cohérente avec la structure de SSN (2017) (voir figure 3.8). Néanmoins, afin de ne pas alourdir la structure de l'ontologie proposée, nous n'avons pas conservé ce complément de représentation.

34. La représentation proposée ne prétend pas à une exhaustivité de la représentation du contexte

35. Innovathèque : <http://www.innovatheque.fr/fr>

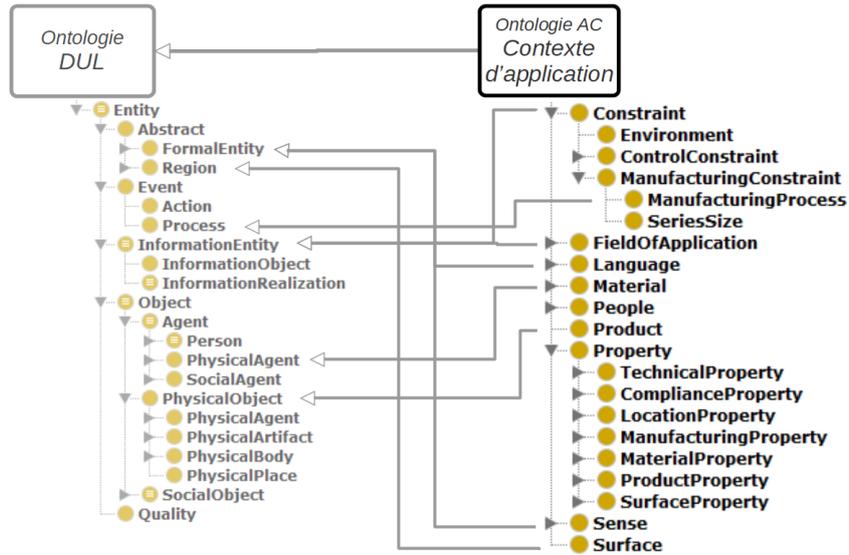


Figure 3.8 – Alignement de l’ontologie de contexte d’application (AC) sur l’ontologie de haut niveau DUL

3.3.3 Ontologie de perception sensorielle haptique

Cette ontologie est le point central de la représentation proposée, car elle rassemble les éléments de connaissances associés à la perception sensorielle utiles à un contrôle sensoriel, et en particulier haptique.

La figure 3.9 présente les concepts principaux de l’ontologie de perception sensorielle (SP) proposée, ainsi que sa correspondance avec les ontologies SSN (Compton et al., 2012) et HASM (Myrghiotti et al., 2013).

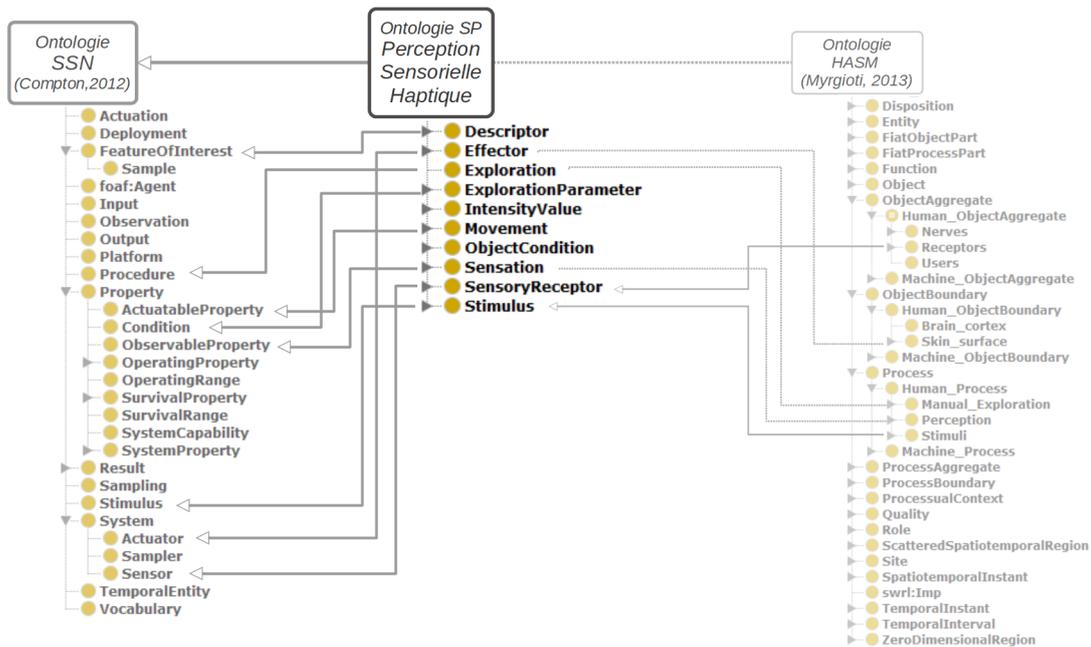


Figure 3.9 – Ontologie de perception sensorielle (SP) et relations avec les ontologies existantes (SSN et HASM)

Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre 1, la perception est le résultat de l'interprétation des sensations par le cerveau humain, les sensations étant générées dans le cas de l'haptique par un contact de la peau avec une surface. Ces notions interviennent donc dans cette ontologie pour en fournir une représentation formelle. En particulier, il s'agissait en construisant cette ontologie de représenter le modèle de description décrit dans le chapitre précédent (chapitre 2). L'ontologie SP étant commune à tous les sens, il est possible de décliner une ontologie spécifique à la représentation des connaissances de la perception haptique.

Les concepts principaux de l'ontologie SP

Les concepts principaux de cette ontologie sont définis de la manière suivante :

- *Descriptor* (descripteur) représente les mots de vocabulaire décrivant la perception sensorielle humaine. Dans le cadre du modèle de description développé, les sous-classes de ce concept correspondent aux mots de la base.
- *Effector* (effecteur) représente les parties du corps humain qui contiennent les récepteurs sensoriels et qui génèrent les stimuli détectés par ces récepteurs.
- *Exploration* représente les modes d'exploration qui génèrent les stimuli et, par extension, les sensations.
- *ExplorationParameter* (paramètre d'exploration) représente les paramètres de l'exploration qui ont une influence sur la génération des stimuli et donc sur la perception. Ce concept inclut en particulier les paramètres dépendant des mouvements, effecteurs impliqués.
- *IntensityValue* (valeur d'intensité) représente de manière littérale les niveaux d'intensité d'une sensation. Par exemple, le sous-concept *Faible* représente un niveau d'intensité de sensation égal à 1 sur une échelle de valeurs allant jusqu'à 5. Ces valeurs sont définies par des propriétés de valeur (*DataProperty* en anglais) détaillées dans la suite de ce document.
- *Movement* (mouvement) représente le type de mouvements réalisés lors de l'exploration afin de générer des stimuli.
- *ObjectCondition* (condition d'objet) représente le conditionnement (positionnement, fixation, etc.) de l'objet examiné (le produit touché par exemple dans le cadre d'un contrôle haptique).
- *Sensation* représente la notion de sensation décrite dans le chapitre 1 (voir la section 1.4) et dont la description a été formalisée, à l'aide du modèle développé dans le chapitre 2, en sensations haptiques élémentaires.
- *SensoryReceptor* (récepteur sensoriel) représente les récepteurs du corps humain impliqués dans la génération des sensations.
- *Stimulus* représente les stimuli, c'est-à-dire les phénomènes physiques détectés par les récepteurs sensoriels et qui induisent des sensations.

Comme le précise la figure 3.9, certaines informations de l'ontologie de HASM (Myrgiotti et al., 2013) peuvent être intégrées à la structure de notre ontologie. Par exemple, les connaissances associées aux récepteurs sensoriels, aux effecteurs, aux modes d'exploration et aux stimuli y sont détaillées.

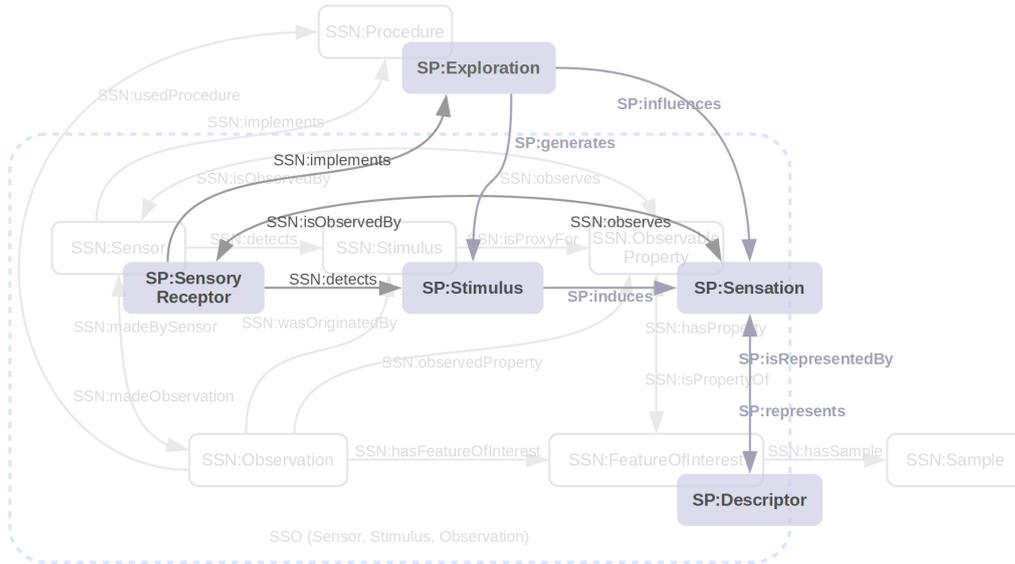


Figure 3.10 – Superposition de la partie SSO de l’ontologie SSN et de l’ontologie de perception sensorielle (SP) proposée

Par ailleurs, les concepts de l’ontologie SP ont été alignés avec ceux de l’ontologie SSN (à la partie SSO en particulier) afin de bénéficier de sa structure de plus haut niveau. Nous avons repris la figure 3.4 et superposé les principaux concepts de l’ontologie SP sur la figure 3.10 ci-après. Les alignements des concepts sont également montrés dans la figure 3.9 et détaillés dans le tableau 3.1.

Alignements	Explications
$SP :Sensation \sqsubseteq SSN : ObservableProperty$	Les sensations sont des propriétés observables. Selon SSN, ces propriétés sont « observées » par le système (ici le corps humain), grâce aux capteurs (ici les récepteurs sensoriels) et au travers de stimuli.
$SP :Descriptor \sqsubseteq SSN : FeatureOfInterest$	Les descripteurs (les mots pouvant décrire la perception sensorielle) sont des caractéristiques d’intérêt (<i>FeatureOfInterest</i>). Selon SSN, ces caractéristiques d’intérêt sont associées à des propriétés (ici les sensations) que la mesure permet d’observer.
$SP :Stimulus \sqsubseteq SSN : Stimulus$	Selon SSN, les stimuli constituent les éléments intermédiaire de l’observation par les capteurs (ici les récepteurs sensoriels) des propriétés (ici les sensations).
$SP :Exploration \sqsubseteq SSN : Procedure$	L’exploration est la procédure qui permet l’observation des propriétés (ici les sensations) par la génération des stimuli et leur mesure par les capteurs (ici les récepteurs sensoriels).
$SP :SensoryReceptor \sqsubseteq SSN : Sensor$	Les récepteurs sensoriels sont des capteurs (<i>Sensors</i>) d’un système de mesure (ici le corps humain).

Tableau 3.1 – Alignements des concepts de l’ontologie SP proposée sur ceux de l’ontologie SSN

Représentation de la base sémantique

Afin de permettre une grande expressivité dans la représentation du modèle de description présenté dans le chapitre 2, nous avons d'abord choisi de lister les mots de notre base en tant que concepts, sous-classes du concept *Descriptor* mentionné précédemment, et non en tant qu'instances de ce concept. Étant donné que les mots ont une place centrale dans ce modèle, leur représentation sous forme de concepts permet une meilleure représentation des relations définies au travers du modèle. Les instances de ces concepts représentant les mots correspondent ainsi à leur emploi dans un cas d'application donné. Par exemple, le mot *râpeux* ayant été utilisé dans le cas d'étude sur le bracelet de montre, une instance du concept du même nom peut être créée et associée à ce cas d'application (nous verrons par la suite les implications de cette opération en termes d'enrichissement et de contextualisation). D'autre part, la représentation est unique pour chaque langue considérée. Ainsi, par exemple, le mot *Slippery* en anglais est représenté par un concept (ayant le même nom), et le mot *Glissant* en français est représenté par un autre concept (ayant le nom français). Une relation (propriété d'objet) de traduction (*hasTranslation*) entre ces concepts permet par ailleurs de conserver cette information dans l'ontologie.

Les relations sémantiques entre les mots sont exprimées à l'aide des propriétés d'objet reprenant les labels des relations (*isSynonymOf*, *isAntonymOf*, etc.).

Représentation de l'incertitude

Nous avons vu l'intérêt de l'utilisation de coefficients flous pour exprimer de possibles incertitudes, aussi bien concernant les relations sémantiques entre les mots que leur association aux sensations élémentaires. Dans l'ontologie, nous exprimons ce coefficient à l'aide de la propriété de donnée *fuzzyCoefficient* et d'une valeur décimale comprise entre 0 et 1. Par exemple, le concept *Leathery* a une relation de type *isSynonymOf* avec le concept *Rough*. La propriété de donnée *FuzzyCoefficient* est alors appliquée à la relation avec une valeur égale à 0,8. Dans *Protégé*, l'expression pour le descripteur *Leathery* est la suivante :

```
isSynonymOf only
(Rough
and (fuzzyCoefficient only xsd:double[>= "0.8"^^xsd:double , <= "0.8"^^xsd:double]))
```

L'extrait ci-dessous du fichier OWL de l'ontologie montre la même expression dans le format OWL/RDF. Étant donné la verbosité de ce format, nous ne montrerons dans la suite que le format utilisé dans *Protégé*.

```
<owl:Restriction>
  <owl:onProperty rdf:resource="http://www.ineva.fr/ontologies/2017/FelicityOnto#isSynonymOf"/>
  <owl:allValuesFrom>
    <owl:Class>
      <owl:intersectionOf rdf:parseType="Collection">
        <rdf:Description rdf:about="http://www.ineva.fr/ontologies/2017/FelicityOnto#Rough"/>
        <owl:Restriction>
          <owl:onProperty rdf:resource="http://www.ineva.fr/ontologies/2017/FelicityOnto#fuzzyCoefficient"/>
          <owl:allValuesFrom>
            <rdfs:Datatype>
              <owl:onDatatype rdf:resource="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double"/>
              <owl:withRestrictions rdf:parseType="Collection">
                <rdf:Description>
                  <xsd:minInclusive rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">0.8</xsd:minInclusive>
                </rdf:Description>
                <rdf:Description>
                  <xsd:maxInclusive rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">0.8</xsd:maxInclusive>
                </rdf:Description>
              </owl:withRestrictions>
            </rdfs:Datatype>
          </owl:allValuesFrom>
        </owl:Restriction>
      </owl:intersectionOf>
    </owl:Class>
  </owl:allValuesFrom>
</owl:Restriction>
```

Représentation du modèle de description

Comme nous l’avons vu, le modèle de description proposé associe (avec un coefficient flou) les mots de notre base à des sensations haptiques élémentaires ainsi qu’à des niveaux d’intensité de ces sensations. Comme le montre la figure 3.10, nous utilisons la relation *isRepresentedBy* entre les concepts *Descriptor* et *Sensation*. Cette relation est une sous-classe de la relation *hasProperty* de l’ontologie SSN entre les concepts *FeatureOfInterest* et *ObservableProperty*. De plus, trois propriétés de donnée sont utilisées pour représenter respectivement le coefficient flou d’association des descripteurs sur les sensations (paramètre α du modèle), le niveau d’intensité moyen (paramètre γ du modèle) et l’intervalle d’intensité (paramètre δ du modèle) : *fuzzyAssociation*, *semanticIntensityAverage* et *semanticIntensityRange*.

Par exemple, pour le descripteur *Leathery* associé à la sensation *Relief* avec γ_2 égal à 4,5 et δ_2 égal à 1, on a l’expression suivante dans *Protégé* (voir note 29) :

```

● isRepresentedBy only
  (Relief
   and (fuzzyAssociation only xsd:double[>= "0.9"^^xsd:double , <= "0.9"^^xsd:double])
   and (semanticIntensityAverage only xsd:double[>= "4.5"^^xsd:double , <= "4.5"^^xsd:double])
   and (semanticIntensityRange only xsd:double[>= "1"^^xsd:double , <= "1"^^xsd:double]))
    
```

Exemple de représentation d’un descripteur et des concepts associés

La figure 3.11 présente une synthèse de la représentation de l’exemple simplifié du descripteur *Leathery* dans *Protégé*. Un extrait du fichier OWL de l’ontologie *SP* pour ce descripteur dans le formalisme OWL/RDF est proposé en annexe B.



Figure 3.11 – Synthèse de la représentation de l’exemple simplifié du concept *Leathery* vue dans l’éditeur *Protégé* (voir note 29)

La figure 3.12 est un extrait de l’ontologie *SP* focalisé sur le descripteur *Leathery* ainsi que sur les concepts associés. Cette figure a été obtenue grâce à l’outil OWLGrEd³⁶ (Bārzdīņš, Bārzdīņš, Čerāns, Liepiņš, & Sproģis, 2010) qui permet de visualiser une ontologie (ou une partie de l’ontologie) sous format de graphe UML³⁷. Dans un souci de

36. OWLGrEd : <http://owlgred.lumii.lv/>

37. UML : <http://www.uml.org/>

lisibilité, cette figure ne donne que quelques concepts de l'ontologie.

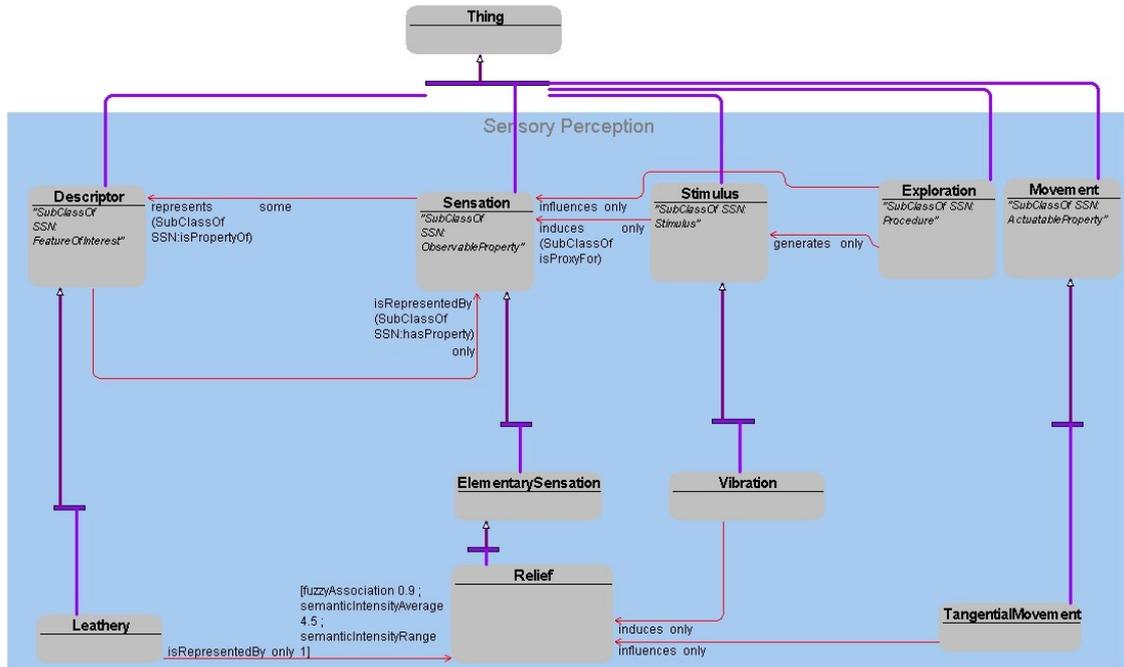


Figure 3.12 – Représentation graphique au format UML (voir note 37) d'une partie de l'ontologie SP focalisée sur le descripteur Leathery et les concepts associés

Ce mot est ainsi représenté comme une sous-classe du concept *Descriptor*. Il a une relation avec le concept *Relief* sous-classe de *Sensation*. Ce concept a lui-même des relations avec un stimulus et un mouvement d'exploration.

3.3.4 Ontologie d'instrumentation

En considérant la perspective d'instrumentation du contrôle sensoriel et notamment haptique, la représentation formelle des connaissances présente plusieurs avantages. Elle organise les informations relatives aux systèmes d'instrumentation, mais également les relations avec les informations de perception sensorielle, et notamment du modèle de description. Elle permettra également ensuite de proposer automatiquement une configuration des instruments en fonction des problématiques de contrôle rencontrées et de prévoir la capacité d'évolution et d'enrichissement de ces informations au fur et à mesure de la réalisation d'essais de mesures instrumentées.

La figure 3.13 présente les concepts principaux de l'ontologie d'instrumentation sensorielle (SI) proposée, ainsi que sa correspondance avec l'ontologie SSN (Compton et al., 2012; SSN, 2017) qui inclut la partie SSN-system. Au travers de cette représentation, il s'agit de prendre les éléments d'intérêt de l'ontologie SSN-system, de les adapter et de les compléter pour notre besoin. La notion de capteur (*Sensor*) est bien détaillée dans l'ontologie SSN, ainsi que ses propriétés et caractéristiques générales. Néanmoins, en considérant par exemple une caméra comme capteur, celle-ci devra être accompagnée d'un éclairage adapté, d'un système de positionnement et d'un algorithme de traitement des images afin de fournir des données utiles pour le contrôle. L'ontologie SI est ainsi principalement composée du concept *System* qui rassemble les connaissances relatives au système de mesure, et du concept *Property* qui rassemble les caractéristiques physiques mesurables *MeasurableProperty* et les caractéristiques du système et des capteurs *SystemProperty*. De plus, trois autres éléments relèvent de la procédure de mesure : l'acquisition (concept *Acquisition*), le traitement (concept *Processing*) et la visualisation (concept *Visualization*).

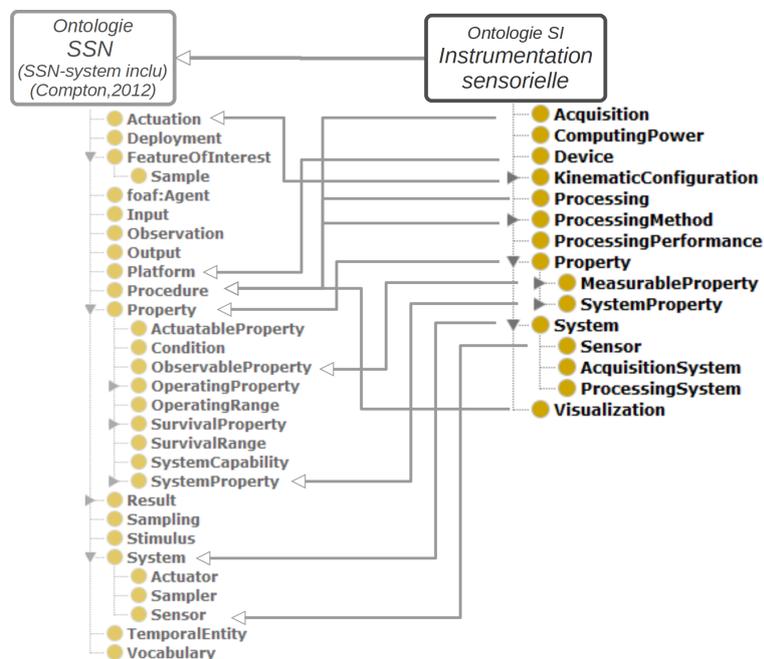


Figure 3.13 – Ontologie d'instrumentation sensorielle (SI) et relations avec l'ontologie SSN, incluant la partie SSN-system

3.3.5 Autres ontologies de domaine implémentées

Deux autres ontologies complètent la structure proposée. Il s'agit de l'ontologie de spécifications sensorielle et de l'ontologie de processus de contrôle.

Ontologie de spécifications sensorielles

Cette ontologie rassemble les connaissances concernant les spécifications de contrôle, c'est-à-dire les informations précisant ce qui doit être contrôlé, de quelle manière et avec quelle limites d'acceptabilité. Les documents recueillis dans la littérature sur le sujet, ainsi que ceux recueillis auprès de nos partenaires industriels, nous ont permis de rassembler quelques éléments de connaissances d'intérêt pour la définition des spécifications de contrôle. Une structure relativement simple a été établie. Elle est présentée sur la figure 3.14(a). La description des anomalies (concept *Anomaly*), l'établissement de protocoles de contrôle (concept *ControlProtocol*) et la définition des tolérances de contrôle (concept *Tolerance*) sont les points principaux de cette représentation. L'utilisation de ces éléments est détaillée dans le chapitre 4.

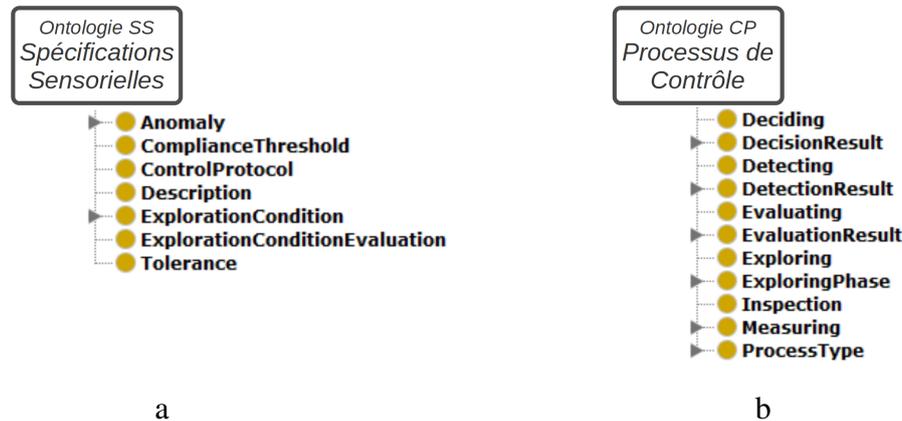


Figure 3.14 – Taxonomies simplifiées des ontologies SS et CP

Ontologie de processus de contrôle

La partie droite (b) de la figure 3.14 présente l'ontologie de processus de contrôle proposée. Comme indiqué sur la figure 3.6, il s'agit d'une ontologie de tâche car elle contient les informations organisant les tâches de contrôle. Cette ontologie s'inspire du processus de contrôle visuel proposé au laboratoire SYMME dans (Guerra, 2008) (voir figure 1.11) et en formalise la représentation. On retrouve ainsi les phases d'exploration (concept *Exploring*), de détection (concept *Detecting*), d'évaluation (concept *Evaluating*) et de décision (concept *Deciding*). Les tâches sont organisées temporellement grâce aux relations disponibles dans l'ontologie OWL-Time, et en particulier grâce à la structure proposée par (Allen & Ferguson, 1997) (voir la figure 3.15). Par exemple, la phase d'évaluation est réalisée après l'étape de détection. On aura donc la restriction suivante appliquée au concept *Evaluating* :

● <http://www.w3.org/2006/time#after> some Deciding

Cette représentation est principalement utile pour réaliser le contrôle ou former les opérateurs aux tâches de contrôle définies. Le chapitre 4 détaille ce processus de contrôle et les opérations effectuées à chaque étape.

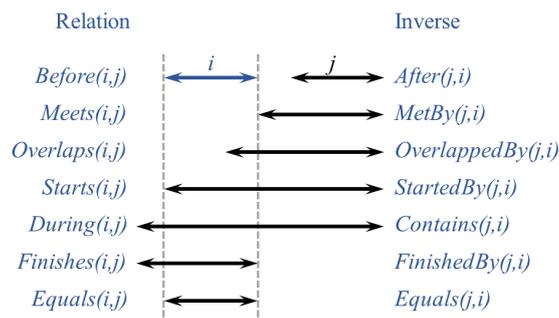


Figure 3.15 – Relations temporelles pour l’organisation d’actions et d’évènements (proposées dans (Allen & Ferguson, 1997))

3.3.6 Validation de la représentation ontologique

Les ontologies de domaine proposées sont rassemblées dans une ontologie globale *Ontologie feliCity*. Sans prendre en compte l’intégration du modèle de description développé dans le chapitre 2, cette ontologie comprend (au moment de la rédaction de ce document) 312 concepts, 79 relations de type propriété d’objet et 24 propriétés de donnée. Au total, elle contient 1.174 axiomes. Un résumé des métriques de cette ontologie est disponible (en anglais) en annexe B (extrait du logiciel *Protégé*). Après intégration du modèle de description qui contient 2.838 mots, cette ontologie comprend alors 3.140 classes et plus de 75.000 axiomes dont environ de 39.000 correspondant aux relations sémantiques entre les mots. Le reste est principalement constitué des relations entre les mots et les sensations élémentaires, ainsi que d’autres relations du modèle incluant notamment l’exploration et les éléments de contexte (dont l’expression est détaillée dans la section suivante 3.4).

Il est possible de valider une représentation ontologique de domaine selon plusieurs critères. Les critères les plus courants sont sa fonctionnalité par rapport à un besoin, la cohérence logique de la représentation, ainsi que sa correspondance avec des ontologies établies afin d’utiliser des définitions communes. Le premier point mentionné sera justifié dans les chapitres suivants (4 et 5) qui montrent sa fonctionnalité vis-à-vis de la mise en place du contrôle et sa capacité d’enrichissement. Le deuxième point, concernant la cohérence logique de la représentation, peut être vérifié grâce à l’utilisation d’un raisonneur. En effet, celui-ci analyse l’ontologie et génère des inférences logiques à partir des connaissances écrites. Au travers de ce processus, la plupart des raisonneurs (Pellet³⁸ ou Hermit³⁹ sont de bons exemples) intègrent des fonctions de vérification logique qui préviennent de l’incohérence d’une ontologie. Par exemple, le fait que deux mots soient synonymes et antonymes à la fois est détecté comme une incohérence, car les deux relations sont disjointes (leurs champs d’action ne se recouvrent pas). L’ontologie proposée ne contient pas d’incohérence. En effet, ces raisonneurs peuvent être lancé normalement et aucune connaissance inférée ne relève du concept vide (*Nothing*). Le troisième point concerne le développement d’une ontologie qui soit cohérente avec d’autres représentations existantes pour rendre possible un partage des informations. C’est ce qui a été fait lors de la création de chaque partie de la structure ontologique. Au total, environ 65% des

38. Raisonneur Pellet : <https://www.w3.org/2001/sw/wiki/Pellet>

39. Raisonneur Hermit : <http://www.hermit-reasoner.com/>

concepts proposés sont généralisés par des concepts d'ontologies existantes (sans prendre en compte les concepts issues de la base de mots du modèle sémantique), le pourcentage restant étant, soit nouveau car rattaché spécifiquement au contrôle sensoriel, soit non généralisé par souci d'allègement de la base de connaissances (afin d'éviter également l'apport d'incohérences lors de l'utilisation de plusieurs ontologies de haut niveau différentes).

Une validation complémentaire et plus technique de l'ontologie peut également être effectué à l'aide de l'outil en ligne OOPS ⁴⁰ qui analyse de manière détaillée le contenu de l'ontologie. La figure 3.16 montre le résultat de l'analyse de l'ontologie *feliCity* sans prendre en compte l'intégration du modèle de description (qui est trop lourd pour l'outil en ligne). Le résultat indique que notre ontologie ne contient pas d'erreurs critiques. Un certain nombre d'avertissement sont signalés, mais ils ne remettent pas en cause le bon fonctionnement de l'ontologie, comme par exemple le fait que certaines classes ne disposent pas encore d'annotations, ou encore le fait que certaines relations inverses ne sont pas précisées (car elles n'ont pas d'utilité pour l'instant dans l'utilisation de l'ontologie).

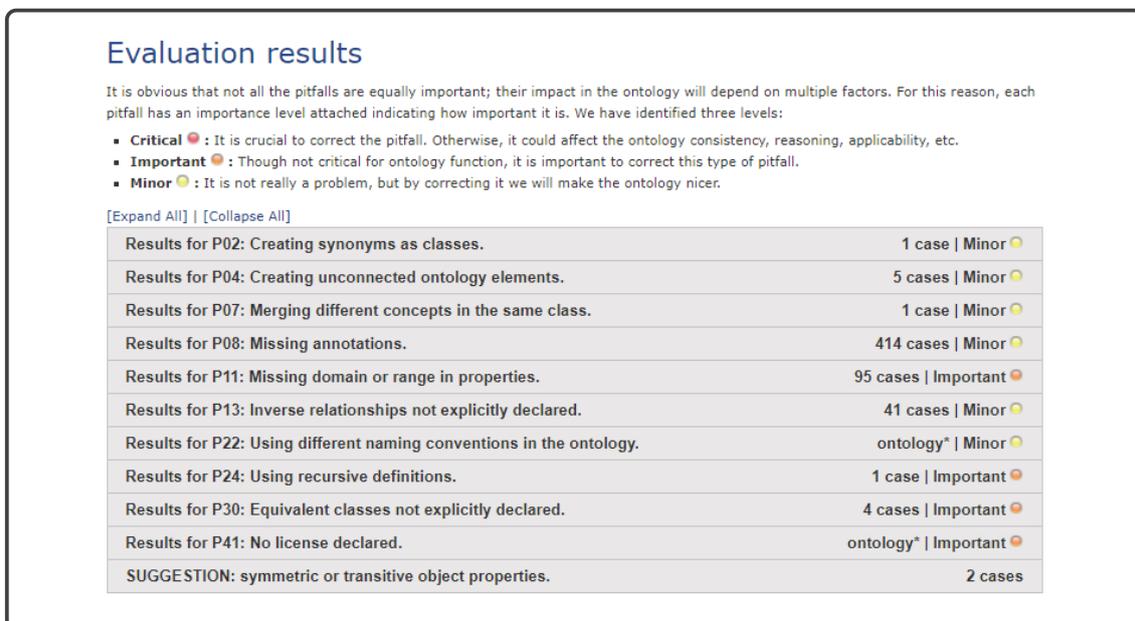


Figure 3.16 – Résultat de l'analyse de l'ontologie *feliCity* par l'outil OOPS (voir note 40)

40. OOPS (*OntOlogy Pitfall Scanner*) : <http://oops.linkeddata.es/index.jsp>

3.4 Un système pour la gestion évolutive et contextuelle des connaissances

Nous avons proposé une structure ontologique, ainsi que plusieurs ontologies de domaine, pour organiser et représenter de manière formelle les connaissances nécessaires à un contrôle sensoriel et haptique. Cette représentation constitue la base du système de connaissances dont nous présentons ici le fonctionnement. Cette représentation ontologique est également très intéressante dès lors qu’il s’agit de gérer l’évolution des connaissances existantes, d’apporter de nouvelles connaissances, et prendre en compte le contexte dans lequel ces connaissances interviennent. Les systèmes de la littérature (par exemple (Roda & Musulin, 2014; Y. Zhang et al., 2015)) font en général intervenir une base ontologique unique et un système de gestion des connaissances au sein de cette base. Dans notre cas, le système s’appuie également sur une base ontologique, mais dont le modèle, construit à un instant donné, est en capacité d’évoluer et de s’enrichir.

Nous proposons un système intégrant les connaissances du modèle construit grâce à la méthode de formalisation, et gérant l’apport de nouvelles connaissances ainsi que les informations de contexte qui leur sont propres.

3.4.1 Schéma général de gestion des connaissances

Nous avons détaillé le premier module *Formalisation* dans le chapitre 2. Le résultat du processus de formalisation est le modèle de description proposé. Les deux modules *Représentation* et *Enrichissement* sont présentés dans cette section. La figure 3.17 présente une vue générale et synthétique de ces modules et des méthodes proposées pour la gestion des connaissances du contrôle sensoriel. La clé de lecture est donnée en dessous de ce diagramme et fait référence au formalisme de CommonKads (Schreiber et al., 2000).

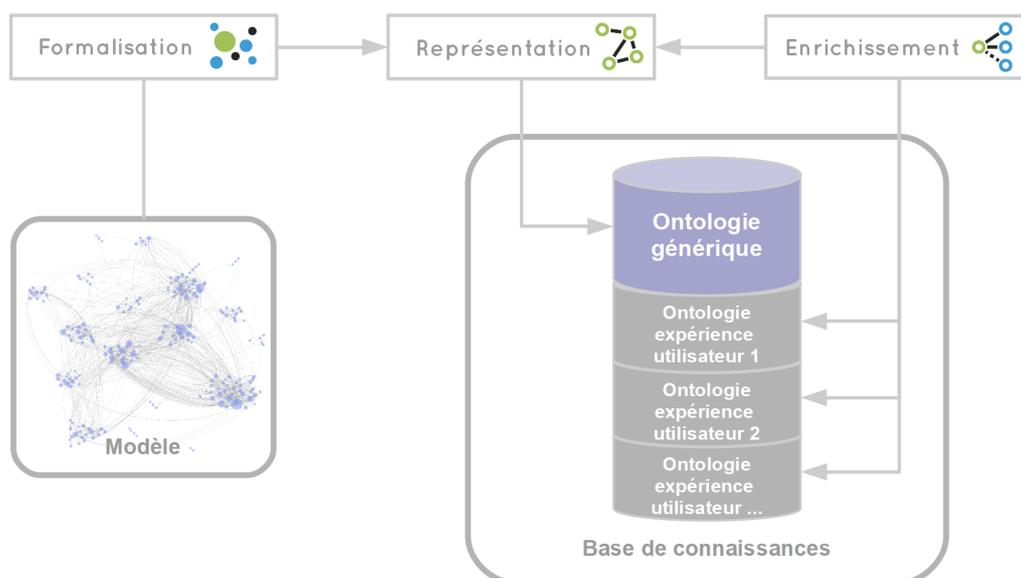


Figure 3.17 – Vue générale des modules proposés pour la gestion des connaissances du contrôle sensoriel

3.4.2 Enrichissement et évolution de la base de connaissances

La figure 3.18 montre de manière plus détaillée les deux modules *Représentation* et *Enrichissement*. Le premier module permet de construire une ontologie globale en intégrant le modèle résultant du processus de formalisation à la structure ontologique décrite précédemment (section 3.3). Le deuxième module permet de gérer des informations obtenues par l'expérience d'utilisation et de manière générale les données d'enrichissement.

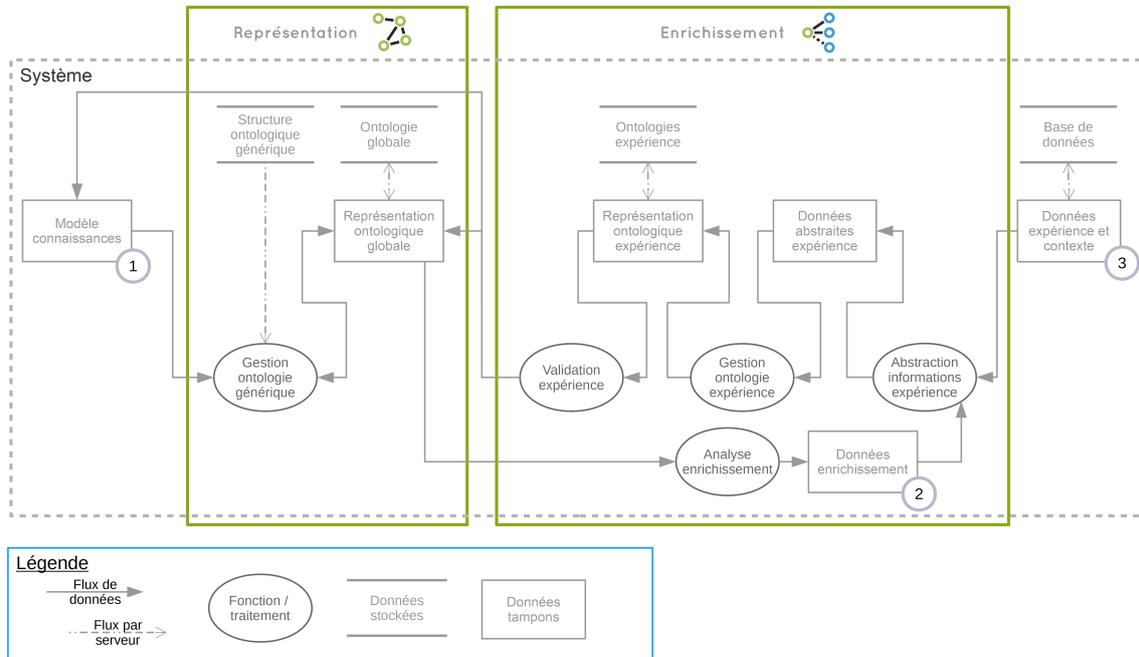


Figure 3.18 – Architecture proposée pour la gestion et l'enrichissement des connaissances

Enrichissement multiple

La base de connaissance peut être enrichie de plusieurs manières (notées sur la figure 3.18 avec les numéros 1, 2 et 3).

1. Un premier enrichissement peut être obtenu en améliorant ou en reconstruisant le modèle en utilisant la démarche présentée dans le chapitre 2. Cela peut correspondre, par exemple, à l'ajout de nouveaux mots ou de nouvelles relations, ou encore à l'identification de nouvelles sources sémantiques. Une amélioration du modèle consiste à effectuer une boucle courte du processus de formalisation (voir figure 2.2 en ne formalisant que les mots ajoutés ou en ne corrigeant que certaines associations. La reconstruction consiste à effectuer une boucle longue et à appliquer de nouveau toutes les étapes du processus. Dans ce cas, il est toutefois possible de conserver les éléments de base du modèle précédent tels que les descripteurs de référence et leur positionnement. Le nouveau modèle est alors réimplanté dans l'ontologie globale en remplacement du précédent.
2. Une deuxième manière d'enrichir le modèle consiste à apporter de nouvelles informations en lien direct avec celles présentes dans l'ontologie. Il s'agirait par exemple, pour un expert, d'ajuster manuellement la modélisation de certains mots, ou de corriger d'éventuels problèmes dans le modèle.

3. Un troisième enrichissement possible serait enfin d'acquérir de nouvelles informations lors de l'utilisation de la base (par exemple lors de la mise en place d'un contrôle). Il s'agit alors d'un enrichissement indirect réalisé par les utilisateurs du système avec l'apport d'informations d'expérience. Une étape d'abstraction pourrait rendre anonymes ces connaissances et surtout les rattacher à des connaissances situées à un niveau plus haut dans l'ontologie.

Par exemple, certains mots donnés par les participants à l'étude réalisée sur le bracelet de montre (voir section 2.1) ne faisait pas initialement partie de notre base. C'est le cas par exemple du mot *brossé* qui a ainsi été ajouté à notre modèle grâce au mécanisme d'enrichissement. Ce mot a été modélisé et a généré un nouveau concept (premier enrichissement). Les experts participant à ce cas d'étude ont ensuite ajusté cette modélisation afin qu'elle corresponde à leur expertise dans le domaine (deuxième enrichissement). Enfin, l'utilisation de ce mot dans la mise en place du contrôle génère des informations d'expérience (troisième enrichissement). Par exemple, si la sensation associée à ce mot est effectivement retenue pour la définition des spécifications de contrôle, le coefficient de confiance dans la relation entre ce mot et cette sensation pourra être augmenté.

Coefficient de validation

Un mécanisme de validation est nécessaire afin de garantir la cohérence et la véracité des connaissances de la base. Pour permettre un tel mécanisme, un coefficient flou appelé coefficient de validation (qui correspond dans l'ontologie à la propriété de donnée *fuzzyValidation*) est appliqué à tous les éléments de connaissance. Plus ce coefficient est proche de 1, plus une connaissance est considérée comme validée. On notera que ce coefficient est indépendant de ceux appliqués au modèle de description qui reflètent la confiance que l'on a dans un modèle donné. Le coefficient traduit plutôt un état de validation général de chaque connaissance. Il évolue donc suivant l'enrichissement de la base. Par exemple, l'association du descripteur *Leathery* à la sensation de *Relief* a un coefficient de confiance (*fuzzyAssociation*) interne au modèle de 0,9, mais le coefficient *fuzzyValidation* reste égal à 0 tant que le mot n'est pas utilisé ou que ses relations ne sont pas validées par les experts.

La validation s'appuie alors sur plusieurs principes de base :

- Plus un élément de connaissance est vérifié par un nombre important d'informations (plusieurs utilisations, plusieurs personnes), plus l'indicateur de validation est élevé (de manière similaire à la validation de données de masse). Par exemple, plusieurs validations successives d'un élément contribuent à augmenter la confiance dans cet élément de connaissance (et augmente donc son coefficient *fuzzyValidation*).
- Lors de la détection d'une incohérence, l'élément de connaissance ayant le coefficient de validation le plus élevé est conservé. Si, par exemple, un mot est identifié comme synonyme et antonyme d'un autre mot, c'est la relation qui aura le plus faible coefficient de validation qui est supprimée.
- Plus le coefficient de validation d'un élément est élevé, plus il peut être utilisé pour la déduction d'autres éléments de connaissance.
- Par défaut, si un élément de l'ontologie ne dispose pas du coefficient de validation, celui-ci est considéré comme étant nul.

Gestion des bases et suivi de l'évolution

Le cadre KREM (Zanni-Merk et al., 2015), comme nous l'avons vu dans la section 3.2.3, propose de séparer les informations de connaissances « brutes » (*Connaissances*) des connaissances nouvelles acquises par l'expérience (*Expérience*). Cette séparation a l'avantage de capitaliser ces nouveaux éléments sans perturber le modèle existant. Ils peuvent ensuite être intégrés à la base de connaissance globale. La séparation entre *Connaissance* et *Expérience* implique une séparation physique entre les fichiers permettant de stocker les informations de l'ontologie globale et d'enrichissement. Comme le montre la figure 3.17, une ontologie d'enrichissement est considérée pour chaque utilisateur (personne, groupe de personnes ou entreprise). Chaque utilisateur dispose ainsi d'une base de connaissances dédiée qui enregistre les informations telles qu'il les sauvegarde, sans effectuer de validation. Seules les informations validées sont ensuite remontées vers la base de connaissances globale. Ainsi, l'utilisateur peut toujours accéder aux informations qu'il a pu ajouter, même si celles-ci n'ont pas été intégrées au modèle global.

Par ailleurs, afin d'assurer un suivi des modifications et de l'évolution des connaissances, les commentaires, applicables dans le format *OWL2* aussi bien aux concepts qu'aux relations, sont utilisés. Ainsi, pour chaque élément ajouté ou modifié, des données temporelles (horodatage) sont ajoutées en plus de l'identifiant de l'utilisateur à l'origine de ces changements.

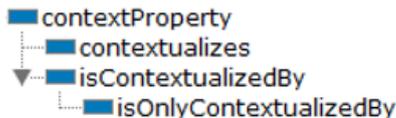
Le système proposé est donc prévu pour enregistrer les connaissances utilisées ou les informations renseignées et ainsi progressivement s'enrichir. Par ailleurs, cela est réalisé tout en conservant une trace des liens avec le contexte d'utilisation, afin de pouvoir par la suite proposer des informations plus précises et complètes.

3.4.3 Gestion du contexte d'utilisation

Étant donné que ce système est au final destiné à aider les industriels dans la mise en place d'un contrôle qualité, il doit fournir les connaissances qui correspondent au contexte spécifique de son utilisation.

Bien que le modèle KREM propose une séparation des méta-connaissances, qui correspondent principalement aux informations de contexte d'application, nous n'opérons pas ici une séparation complète entre le contexte et les connaissances « brutes » (sans contexte). Ces deux éléments étant intimement liés dans notre cas, il est important de les conserver suffisamment proches au niveau de la représentation, afin de pouvoir effectuer des raisonnements. C'est pourquoi, nous avons choisi de représenter l'association au contexte de manière assez simple, en utilisant deux relations (ainsi que leurs inverses) pouvant établir des liens entre un ou plusieurs éléments de contexte (faisant partie de l'ontologie de contexte d'application (AC) définie) et n'importe quel autre concept ou relation de l'ontologie *feliCity*. Les relations utilisées sont les suivantes, *isContextualizedBy* indique que l'élément est associé à un contexte, mais également potentiellement à d'autres, tandis que *isOnlyContextualizedBy* indique que l'élément est uniquement vrai dans le contexte indiqué⁴¹.

41. Notons pour aller plus loin que les indications *some* ou *only* de chaque relation n'ont pas la même utilité. C'est pourquoi ce mécanisme à deux relations a été mis en place afin de palier, dans le cas du contexte, à l'hypothèse de monde ouvert de la représentation ontologique.



Par exemple, le mot *brossé* qui a été ajouté dans le domaine d’application de la joaillerie (concept *Jewellery*) et pour un matériau métallique (concept *Metal*) dispose des relations suivantes qui indiquent que ce mot peut relever de ces deux éléments de contexte combinés (*isContextualizedBy* indique qu’il peut relever de ce contexte mais peut-être également d’un autre).

● **isContextualizedBy some (Jewellery and Metal)**

Par ailleurs, nous considérons que les éléments de connaissance dépourvus de ces relations de contextualisation ne relèvent pas d’un contexte spécifique et sont donc génériques (autant que possible dans le cadre du contrôle sensoriel et dans la limite des sources impliquées).

De plus, grâce à l’apport par les participants de relations sémantiques permettant de relier le mot *brossé* aux mots connus de la base, il a été possible de proposer une modélisation de ce mot sur les sensations élémentaires (de la même manière que l’ensemble des mots de la base ont pu être classés grâce aux descripteurs de référence). Néanmoins, cette représentation n’étant a priori uniquement valable dans ce contexte d’application, une relation de contexte est appliquée par le système à la relation entre le concept *Brossé* (sous-classe de *Descriptor*) et le concept de la sensation considérée (ici *Grip*). On obtient la relation suivante, qui indique que cette relation existe pour ce contexte.

```

● isRepresentedBy only
  (Grip
   and (isContextualizedBy only
        (Jewellery
         and Metal))
   and (fuzzyAssociation only xsd:double[>= "1.0"^^xsd:double , <= "1.0"^^xsd:double])
   and (semanticIntensityAverage only xsd:double[>= "2.0"^^xsd:double , <= "2.0"^^xsd:double])
   and (semanticIntensityRange only xsd:double[>= "1.0"^^xsd:double , <= "1.0"^^xsd:double]))
  
```

L’hypothèse d’un monde ouvert n’exclut pas que cette relation existe pour un autre contexte, mais rien ne l’indique non plus. C’est pourquoi, la relation *isOnlyContextualizedBy* a été créée si l’on avait voulu exprimer que cette relation était vraie uniquement dans ce contexte.

3.4.4 Synthèse

Au travers de cette section, un système a été présenté pour la gestion des connaissances du contrôle sensoriel. En particulier, les questions de l’enrichissement et de la contextualisation ont été abordées. Les moyens mis en oeuvre ont permis d’y apporter des réponses, tout en conservant la souplesse du système grâce à une application en sur-couche de la représentation ontologique.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une représentation formelle des connaissances du contrôle à l'aide d'ontologies. Cette représentation couvre notamment le contexte d'application, la perception sensorielle, ainsi que les éléments liés à la mise en œuvre du contrôle (spécifications et processus de contrôle). Nous avons également proposé une nouvelle ontologie dans un objectif futur d'instrumentation sensorielle du contrôle.

La structure proposée, ainsi que l'utilisation d'ontologies bien établies dans la littérature, confèrent à la représentation une certaine robustesse, limitant ainsi la nécessité de restructuration lorsque de nouvelles connaissances sont ajoutées à la base. Le système de gestion des connaissances que nous avons développé rend en effet possible l'évolution, l'enrichissement et une contextualisation des connaissances. Une validation de la représentation a été effectuée en nous appuyant sur les résultats d'un outil de validation d'ontologies. Ainsi, l'ontologie définie est globalement conforme aux règles de représentation imposées par la communauté scientifique et notamment par le consortium W3C (voir note 23). De plus, elle fournit l'ensemble des éléments nécessaires à un contrôle haptique et à leur utilisation par un système informatique. Elle intègre le modèle de description que nous avons défini dans le chapitre 2.

Étant basé sur des éléments de connaissances bien établis de la littérature, cette représentation peut être partagée et utilisée pour d'autres domaines du contrôle sensoriel. En effet, ayant été conçue en considérant un niveau d'abstraction relativement élevé, une application au contrôle de la qualité relevant d'autres sens (vue, ouïe, etc.) peut être envisagée. Il faudrait dans ce cas développer un modèle de connaissances en utilisant la méthode donnée dans le chapitre 1, puis l'intégrer dans la structure ontologique de la même manière que ce qui a été proposé pour le sens du toucher. Ce travail pourrait aboutir à la construction d'une représentation intégrant plusieurs sens.

Le système de gestion répond aux objectifs de représentation « vivante » des connaissances du contrôle haptique en fournissant un cadre et des méthodes pour leur enrichissement via l'amélioration et le renforcement des informations d'expertise contenues dans l'ontologie, ainsi que leur contextualisation. Une validation théorique n'ayant pas réellement de sens pour un système de ce type, c'est sa capacité à gérer les informations lors de son utilisation qui est importante. Des éléments sont donnés dans ce sens dans le chapitre suivant 4.

La méthode d'organisation des connaissances proposée a bien sûr été conçue pour représenter et sauvegarder l'expertise du contrôle sensoriel de manière vivante, mais elle a surtout été imaginée pour permettre à des utilisateurs d'accéder à cette expertise. Bien que certains logiciels (par exemple l'éditeur *Protégé*) rendent possible un accès à ces connaissances, celui-ci demeure encore relativement compliqué et peu intuitif (même s'il est plus simple qu'un accès au fichier *OWL*). Évidemment, l'intuitivité et l'efficacité des outils proposés et de l'approche employée sont tout aussi importantes que la pertinence des informations fournies. C'est ce qui nous a amené à proposer une approche méthodologique pour aider les industriels à exploiter cette organisation des connaissances dans le cadre de la mise en place d'un contrôle haptique des produits. Cette approche est détaillée dans le chapitre suivant (chapitre 4).

4

Exploitation des connaissances haptiques pour le contrôle de la qualité des produits

Sommaire

4.1	Introduction	102
4.1.1	Contraintes et challenges pour le contrôle haptique des produits	102
4.1.2	Une méthodologie pour la mise en place du contrôle haptique	105
4.2	Description formelle des spécifications de contrôle	107
4.2.1	Expression et analyse du vocabulaire	108
4.2.2	Formalisation de la description	110
4.2.3	Définition des anomalies	113
4.3	Protocoles de contrôle haptique	115
4.3.1	Sélection du mode d'exploration approprié	116
4.3.2	Analyse de l'influence de l'exploration sur l'intensité perçue	116
4.3.3	Proposition d'une grille d'évaluation	122
4.4	Tolérances et référentiel de contrôle	126
4.4.1	Établissement des limites d'acceptabilité	127
4.4.2	Définition d'un référentiel	128
4.5	Application au contrôle manuel et validation des performances	129
4.5.1	Processus d'application du contrôle haptique	129
4.5.2	Synthèse des protocoles de contrôle	130
4.5.3	Utilisation des protocoles	130
4.5.4	Test de variabilité et améliorations observées	131
4.6	Conclusion	133

4.1 Introduction

Les cas industriels sur lesquels nous avons travaillé nous ont montré la difficulté à mettre en place un contrôle sensoriel des produits et, plus spécifiquement, un contrôle haptique des produits. La variabilité des résultats constatée lors du contrôle des bracelets de montres de luxe (voir la section 1.1.2) a particulièrement bien illustré ces difficultés. Le vocabulaire employé s'est révélé hétérogène, les manières d'explorer les surfaces étaient très différentes d'une personne à une autre et les limites d'acceptabilité étaient insuffisamment spécifiées pour que les contrôleurs soient en situation de juger efficacement de la conformité de chaque produit.

Dans le cadre de nos travaux, nous avons ainsi souhaité améliorer la mise en place et l'efficacité du contrôle haptique, notamment grâce à l'exploitation des connaissances présentées dans les deux chapitres précédents. Pour parvenir à cet objectif, ce chapitre décrit la méthodologie que nous proposons. Des exemples d'application de cette méthodologie sont également exposés à travers le cas d'étude du contrôle effectué sur les bracelets de montre.

4.1.1 Contraintes et challenges pour le contrôle haptique des produits

Nous avons vu dans le chapitre 1 l'importance d'une bonne définition des spécifications et de la maîtrise du processus de contrôle haptique pour en améliorer la performance. Néanmoins, plusieurs contraintes et challenges entrent en jeu lorsque le contrôle est effectué dans un environnement de production, particulièrement lorsque ce contrôle est réalisé directement durant la fabrication (Lawless & Heymann, 1999).

Tout d'abord, une méthode de mesure adéquate (adaptée à l'objet du contrôle) et objective (ne faisant pas intervenir la subjectivité du contrôleur) doit avoir été définie pour assurer la **répétabilité** et la **reproductibilité** des résultats. Il s'agit également de prendre en compte les conditions dans lesquelles le contrôle est réalisé (contraintes de durée de contrôle, limites d'accès au produit, condition physique et mentale des opérateurs, etc.), chacun de ces éléments pouvant avoir un impact significatif sur la variabilité des résultats de ce contrôle. La figure 4.1 détaille, à l'aide d'une décomposition 5M, l'ensemble des éléments pouvant avoir une influence sur la variabilité des résultats d'un contrôle haptique (analyse réalisée en complément de celle proposée dans (Baudet, 2012) sur le contrôle visuel).

Mise en place du contrôle

Bien que certaines normes ISO donnent des recommandations dans le domaine de l'analyse sensorielle (ISO 11035, 1994 ; ISO 5492, 2008 ; ISO 13299, 2016 ; ISO 6658, 2017), celles-ci se focalisent principalement sur la caractérisation et la mesure des sensations, ainsi que sur les préférences des utilisateurs dans un contexte de recherche et de développement de nouveaux produits. Elle sont d'ailleurs le plus souvent utilisées lors de la phase de conception des produits (Dumenil-Lefebvre, 2006). En revanche, comme le remarque Lawless et Heymann (1999), les évaluations descriptives et analyses statistiques généralement préconisées en analyse sensorielle ne sont pas forcément applicables dans le cadre d'un contrôle des produits. En effet, un contrôle réalisé en cours de production ne se base généralement que sur un nombre limité de mesures pour délivrer son résultat

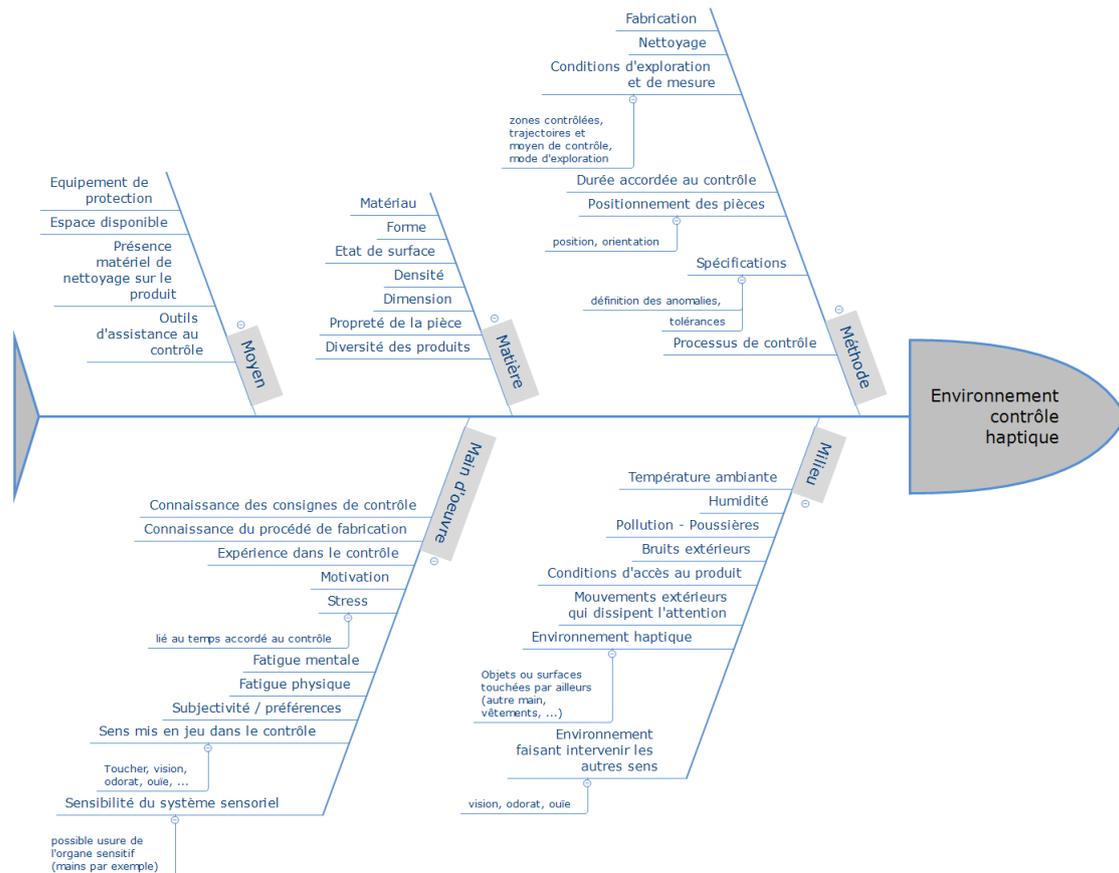


Figure 4.1 – Analyse de l'environnement du contrôle haptique suivant la méthode des 5M

(le produit n'étant généralement contrôlé qu'une seule fois par un opérateur). Dans le cas de l'évaluation sensorielle, c'est au contraire un panel de personnes (ou groupe d'experts) qui est requis pour délivrer de nombreuses mesures (Martínez, 2007).

Une autre particularité du contrôle concerne l'écart parfois très réduit qui peut parfois s'établir entre ce qui est mesuré et ce qui est attendu sur le produit. Dans un contexte de conception, il s'agit plutôt de réaliser des choix parmi des variations de perceptions du produit, en général beaucoup plus larges. La figure 4.2 illustre cette différence avec, pour l'axe conception, le choix d'une teinte parmi plusieurs possibles et, pour l'axe contrôle, la vérification de la conformité d'une teinte par rapport à celle attendue.

Certaines méthodes d'évaluation sensorielle sont parfois utilisées dans des tâches de contrôle haptique. C'est le cas lorsqu'il s'agit de caractériser les sensations perçues au contact d'une surface. En revanche, nous n'avons pas trouvé de méthode qui soit dédiée à la détection et à l'évaluation d'anomalies haptiques, qui soit générique (applicable à tout type de produits) et qui soit systématique (dont la mise en œuvre relève d'une méthode).

Dans le domaine automobile par exemple, la méthode Sensotact (Crochemore et al., 2003) permet de positionner une perception *tactile* ressentie au contact d'une surface sur les axes du référentiel donné (10 axes contenant chacun 5 échantillons de référence). Pour une surface issue de la planche de bord d'une voiture par exemple, une personne formée pourra donner une note de 0 à 100, comparativement aux échantillons de référence de ce référentiel, et en utilisant les modes d'exploration fournis. Avec cette méthode,

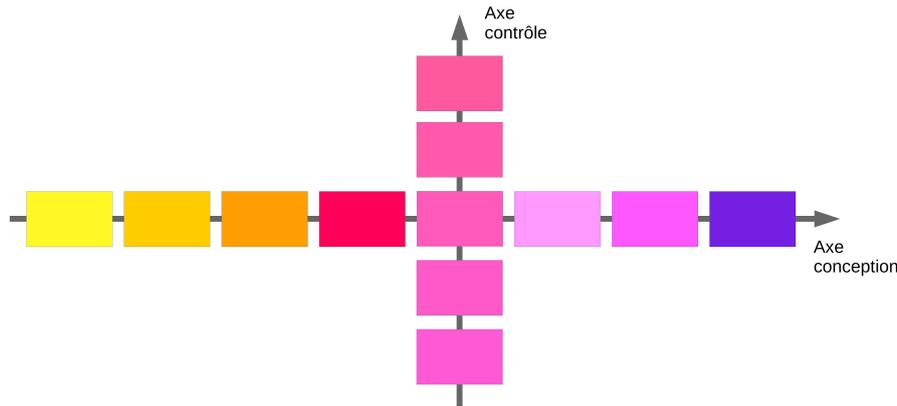


Figure 4.2 – Illustration de la différence entre contrôle et conception

il est ainsi possible d'utiliser le positionnement d'un produit conforme pour définir des spécifications de contrôle tactile. En considérant son application dans le contexte d'un contrôle industriel, cette méthode présente cependant plusieurs limites :

- Les contrôleurs doivent être parfaitement entraînés à l'utilisation de la méthode. Cela implique que leur capacité à noter correctement soit régulièrement vérifiée.
- La méthode ne donne pas directement d'indications sur les axes du référentiel à privilégier pour le contrôle. Évaluer tous les axes lors d'un contrôle peut rendre celui-ci très chronophage.
- Si la méthode fournit des modes d'exploration, ceux-ci sont trop généraux et peuvent être à l'origine dans certains cas d'une variabilité importante des résultats de contrôle.
- Les échantillons du référentiel couvrant la totalité de l'intervalle d'intensité perceptible sur un axe, la mesure peut se révéler insuffisamment précise pour détecter certaines anomalies.
- La notion de tolérance de contrôle n'apparaissant pas immédiatement dans la méthode, elle peut représenter un flou dans le processus de décision d'acceptabilité des produits.
- Initialement développée pour les matériaux automobiles, la méthode peut se révéler peu adaptée à d'autres domaines d'application ou d'autres matériaux (par exemple, pour notre cas d'étude pour le contrôle d'un bracelet de montre).

Nous avons vu que, dans le domaine du contrôle visuel, un certain nombre d'études ont été réalisées afin de fournir des méthodes adaptées au contrôle de la qualité esthétique d'un produit. Celles décrites dans (Baudet, 2012 ; Debrosse, Pillet, Maire, & Baudet, 2010 ; Guerra, 2008 ; J.-L. Maire, Pillet, & Baudet, 2012, 2013b) ont notamment permis d'obtenir des avancées significatives sur la manière de décrire les anomalies visuelles d'une surface en n'utilisant qu'une liste très réduite de descripteurs génériques (Baudet, 2012, p.53). Ces travaux ont également abouti à la proposition d'une grille d'évaluation adaptée à l'exploration visuelle de ces anomalies (Baudet, 2012, p.68). Ces résultats, intéressants pour le contrôle visuel, le sont tout autant pour le contrôle haptique des produits.

Application du contrôle

Une fois définis, les éléments nécessaires au contrôle peuvent ensuite être appliqués par les contrôleurs. Le nombre d'observations d'un produit étant limité lors du contrôle

en cours de fabrication, le contrôle doit être le plus efficace possible.

Pour atteindre cette efficacité, les travaux cités précédemment dans le domaine du visuel ont également montré l'intérêt d'opérer une séparation claire dans l'exécution des trois tâches qui composent tout contrôle : exploration, évaluation, décision (Guerra, 2008, p.86) (voir section 1.6). Cette séparation a notamment l'avantage de répartir la charge cognitive du contrôleur en plusieurs phase temporelles, le rendant ainsi plus performant, d'abord dans sa tâche de détection des anomalies, puis dans celle de l'évaluation de ces anomalies.

4.1.2 Une méthodologie pour la mise en place du contrôle haptique

Plusieurs questions et problèmes ressortent des observations et analyses effectuées ci-dessus. Nous les avons résumées en quatre questions qui définissent également des objectifs pour la proposition de méthodes pour le contrôle haptique.

- Comment aider à la description objective et formalisée de la qualité haptique attendue et donc également des anomalies à contrôler ?
- Comment aider à la définition de protocoles de contrôle adaptés et efficaces ?
- Comment aider à la détermination de tolérances de contrôle et à la construction d'un référentiel dédié ?
- Comment appliquer de manière efficace les protocoles définis afin de permettre un contrôle performant ?

Pour répondre à ces questions, une méthodologie a été définie pour construire des standards de contrôle haptiques, adaptés aux problématiques spécifiques de chaque produit. L'objectif est de parvenir à répondre aux problématiques exposées ci-dessus, tout en fournissant des méthodes qui accélèrent la mise en place du contrôle et le rendent performant.

Cette méthodologie a donc pour but de cadrer, de simplifier et de rendre la mise en place du contrôle haptique aussi systématique que possible. Celle-ci est composée de trois étapes principales détaillées dans ce chapitre : **description**, **protocoles** et **tolérance**. La figure 4.3 présente l'enchaînement de ces étapes et quelques illustrations issues de chacune d'elles. De plus, deux tests de variabilité sont effectués respectivement en amont et en aval de ces trois étapes, dans les phases d'analyse initiale et de validation. Ces deux tests s'appuient sur la méthode $R^2&E^2$ (J.-L. Maire et al., 2013a) pour enregistrer une image de la variabilité avant application (similaire à l'analyse préalable réalisé pour le cas d'étude), puis vérifier après application que celle-ci a effectivement été diminuée grâce à la méthode de contrôle définie. Si ce n'est pas le cas, une boucle d'amélioration est possible en agissant sur les causes possibles de variabilité. Nous verrons en effet que la méthode proposée permet également d'identifier certaines sources de variabilité dans le contrôle.

Le processus proposé est issu d'une volonté de partir d'une expression partagée et synthétique des sensations élémentaires à contrôler, pour ensuite proposer des moyens de contrôle adaptés. En effet, il s'agit d'abord de formaliser la description, puis de construire des protocoles de contrôle adaptés et enfin de définir les limites d'acceptabilité (tolérances) pour chaque type d'anomalie. Pour ce faire, la base de connaissances exposée dans les chapitres précédents est exploitée ici afin d'obtenir les informations nécessaires. Un **raisonneur** est utilisé afin d'extraire ces informations et de pouvoir poser des questions parfois complexes pouvant impliquer des connaissances **inférées**, c'est-à-dire des

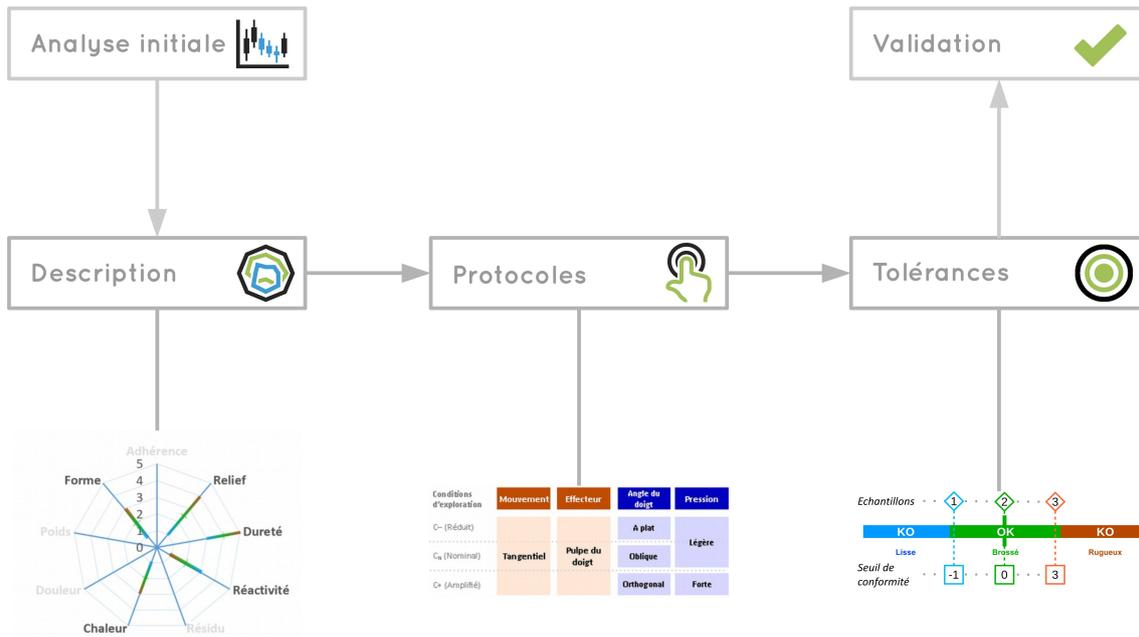


Figure 4.3 – Schéma de principe de la méthodologie proposée pour la mise en place du contrôle haptique - vue des modules-outils

connaissances n’ayant pas forcément été expressément entrées dans la base, mais dont la structure de l’ontologie permet tout de même d’acquérir. Le raisonneur développé s’appuie en partie sur les résultats du raisonneur Pellet (voir note 38), ainsi que sur une surcouche logicielle développée pour les besoins de ce projet (plus de détails sont donnés dans le chapitre 5).

Cette méthodologie et les démarches proposées pour la construction d’une méthode de contrôle ont été conçues pour être aussi génériques que possible, c’est à dire indépendantes du domaine d’application concerné. Elles s’appuient en effet sur le modèle de connaissances proposé. En revanche, bien que l’approche utilisée pour la construction de ce modèle ait une visée plus globale sur la description des sensations et les connaissances du domaine du contrôle haptique, son utilisation a bien pour objectif de fournir des résultats focalisés sur les problématiques de contrôle rencontrées. De surcroît, le but est de pouvoir ensuite effectuer une abstraction des informations générées par l’utilisateur pendant la mise en place du contrôle (en utilisant des concepts de plus haut niveau par exemple) afin d’enrichir la base de connaissances.

Pour la présentation des éléments proposés, nous faisons l’hypothèse de l’application à la surface d’un produit telle que, par exemple, la surface externe d’un bracelet de montre. Des exemples tirés de ce cas d’étude sont fournis dans les sections suivantes afin d’illustrer nos propos. Les échantillons réalisés à l’occasion de ce cas d’étude sont également impliqués dans la mise en place du contrôle et d’un référentiel dédié à cette application.

4.2 Description formelle des spécifications de contrôle

Cette première étape de la méthodologie proposée pour la mise en place d'un contrôle haptique vise à formaliser la description des sensations et des anomalies à contrôler sur un produit. Nous avons vu que la diversité du vocabulaire utilisé pouvait entraîner un problème de variabilité du contrôle. De plus, le fait de prendre en compte au moment du contrôle la perception dans son ensemble peut également susciter une charge cognitive élevée pour le contrôleur et limiter son efficacité. Nous proposons donc de réduire, de structurer et de standardiser le vocabulaire utilisé pour décrire la qualité attendue ou non attendue au contact de la surface d'un produit, tout en permettant une décomposition du contrôle selon les sensations élémentaires.

Pour cela, nous distinguons trois phases séquentielles. Tout d'abord, une première phase d'expression du vocabulaire permet à l'utilisateur (un responsable qualité par exemple) d'exprimer les mots pour décrire la qualité haptique du produit considéré. Une phase de formalisation, s'appuyant sur le modèle de description généré précédemment, est ensuite appliquée pour obtenir les sensations élémentaires d'intérêt pour le contrôle. Enfin, durant la troisième phase, les anomalies sont définies à partir des sensations identifiées.

La figure 4.4 présente de manière schématique les phases de l'étape **Description**. De la même manière qu'aux chapitres précédents, ce diagramme et ceux présentés dans ce chapitre suivent autant que possible le formalisme donné par CommonKads (Schreiber et al., 2000). La clé de lecture est rappelée sur la figure 4.5.

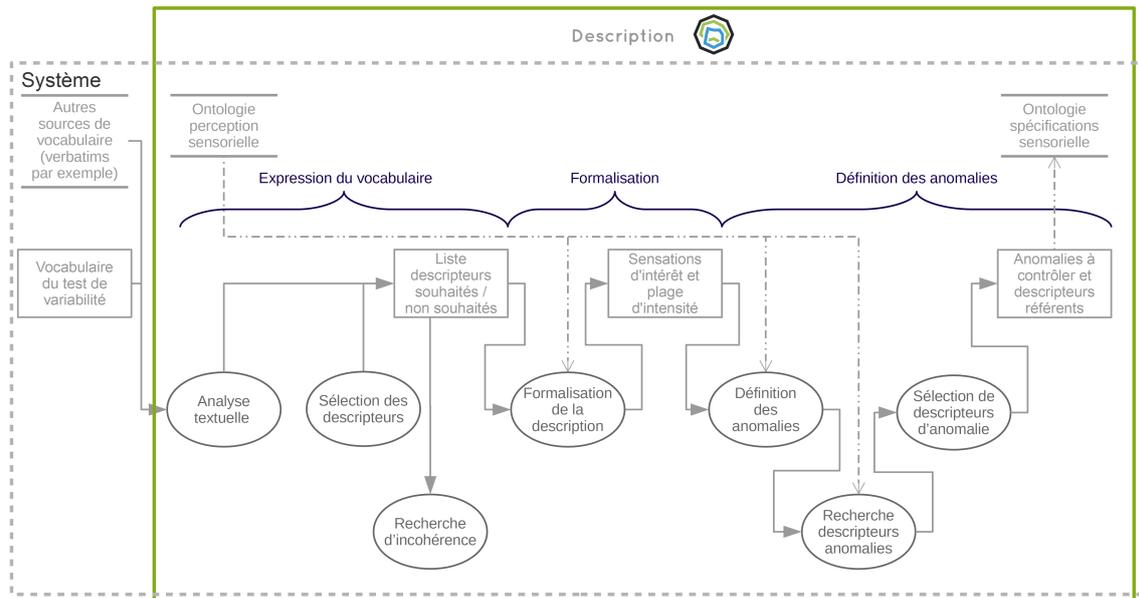


Figure 4.4 – Schéma de principe de l'étape **Description** de la méthodologie de mise en place du contrôle haptique



Figure 4.5 – Légende des diagrammes présentés

4.2.1 Expression et analyse du vocabulaire

Il s'agit durant cette première phase de recueillir le vocabulaire communément utilisé par un industriel pour décrire les sensations haptiques souhaitées ou non souhaitées au contact de la surface d'un produit. Les questions posées et les requêtes effectuées durant cette phase se focalisent toutes sur le sens du toucher afin de limiter à ce sens le vocabulaire recueilli et d'éviter l'interaction avec d'autres sens. Nous intégrons trois modes d'entrée de vocabulaire possibles : par une définition textuelle de problèmes ou d'attente, par la justification d'un jugement lors d'un test, ou encore par la sélection directe de mots de la base.

- **Définition textuelle de problèmes ou d'attentes.** Il peut s'agir d'une définition de la problématique de contrôle donnée par le responsable qualité, ou d'une définition d'une attente de qualité formulée par des équipes marketing. Il peut également s'agir de données textuelles issues de retour clients. Si une méthode de contrôle existe déjà, il peut également s'agir du vocabulaire issu de cette méthode. Dans ce cas de figure, une analyse textuelle est nécessaire. Nous l'effectuons en cherchant dans les textes fournis les mots contenus dans notre base. De plus, afin de déterminer s'il s'agit d'une expression de sensation souhaitée ou non, nous utilisons le contexte de l'expression du vocabulaire (s'il s'agit de vocabulaire décrivant plutôt des problèmes observés, ou des attentes). De plus, au sein d'un texte, nous analysons les adverbes environnant ces mots, comme par exemple *trop* ou *pas assez* qui indiquent respectivement qu'il s'agit de l'expression d'une sensation non souhaitée ou souhaitée. Dans le cas du bracelet par exemple, celui-ci était perçu « pas assez doux et trop râpeux ». L'analyse de cette phrase amène à la sélection des mots *doux* et *râpeux*, respectivement en tant que descripteur d'une sensation souhaitée et descripteur d'une sensation non souhaitée.
- **Justification d'un jugement donné lors d'un test.** Il s'agit dans ce cas de demander aux participants de justifier les évaluations données durant le test de variabilité réalisé en amont de la démarche de mise en place du contrôle. Il peut également s'agir de demander de classer des échantillons du plus conforme au moins conforme et de demander d'expliquer les différences entre les échantillons. Par exemple, pour le bracelet de montre, la liste de mots de la figure 2.1 avait été obtenue pour l'ensemble du test R²&E² réalisé. Néanmoins, seuls les mots donnés par les experts ou responsables qualité sont utilisés ici, pour éviter de fausser l'analyse. De plus, si on considère plusieurs experts, les mots ne faisant pas consensus dans le résultat de l'évaluation sont écartés (par exemple le terme *profond* de la figure 2.1), et les mots ayant un caractère hédonique sont également évidemment écartés. La fréquence des mots peut indiquer leur importance pour le contrôle. De plus, afin de savoir s'il s'agit de mots décrivant les sensations souhaitées ou non, nous utilisons les résultats de jugement associées. Par exemple, le mot *doux* n'apparaissant que pour des échantillons qui ont été acceptés sans anomalies, il est donc considéré comme un descripteur d'une sensation souhaitée.
- **Sélection directe des mots pouvant permettre d'exprimer les sensations souhaitées ou non souhaitées.** Il s'agit pour l'utilisateur de sélectionner les mots depuis la liste de ceux contenus dans notre base.

Les mots provenant de ces trois entrées possibles sont listés et rassemblés en deux colonnes : souhaités et non souhaités. Nous utilisons par ailleurs un procédé simple de classement afin d'exprimer l'importance accordée à chaque mot (plus un mot est haut dans la liste, plus il est considéré comme important pour le contrôle). Un coefficient de pondération entre 0 et 1 est ainsi attribué à chaque mot. S'il y a n mots dans une liste, celui ci vaut $n + 1$ moins la position du mot dans la liste sur n . Un exemple est donné sur le tableau 4.1 pour le cas du bracelet. La pondération de *agressif* est 1, alors que celle de *râpeux* est 6/7. Les données de l'analyse sont utilisées pour générer le classement, mais il est bien sûr possible pour l'utilisateur responsable de la mise en place du contrôle de modifier ce classement (y compris, supprimer des mots de la liste s'il juge qu'ils ne sont pas appropriés).

Mots décrivant les sensations souhaitées	Mots décrivant les sensations non souhaitées
	1. agressif
	2. râpeux
	3. accrochant
4. creusé	
	5. lisse
6. doux	
7. brossé	

Tableau 4.1 – Exemple (réduit) des mots sélectionnés dans le cas d'étude du bracelet de montre

De plus, grâce aux relations entre les mots enregistrés dans la base de connaissances, il est possible de suggérer d'autres mots qui pourraient être appropriés. Pour ce faire, il est possible de demander au raisonneur de retourner l'ensemble des mots ayant des relations sémantiques (sauf antonymes) avec les mots de cette liste. Une opération de vérification de la cohérence des mots sélectionnés est par ailleurs effectuée automatiquement. Celle-ci permet par exemple d'identifier le fait que deux mots antonymes fassent parti de la même liste de mots décrivant les sensations souhaitées et de le signaler à l'utilisateur. Les mots de ces listes sont ensuite utilisés pour la phase suivante de formalisation.

4.2.2 Formalisation de la description

Cette deuxième phase a deux objectifs principaux, d'une part identifier les sensations élémentaires d'intérêt pour le contrôle et, d'autre part, déterminer les intervalles d'intensité de ces sensations afin de cadrer par la suite la définition des anomalies. Nous faisons ici l'hypothèse que si certaines sensations élémentaires sont en relation avec les mots donnés à l'étape précédente, cela signifie que ces sensations auront une importance dans la perception d'une personne au contact de la surface considérée. Dans un contexte de contrôle de la qualité haptique, ce sont donc ces sensations qu'il s'agira de contrôler, et cela en considérant les niveaux d'intensité associés. Les mots listés précédemment sont ainsi transmis au raisonneur qui va utiliser leur représentation dans le modèle de description pour identifier les sensations ainsi que les niveaux d'intensité impliqués.

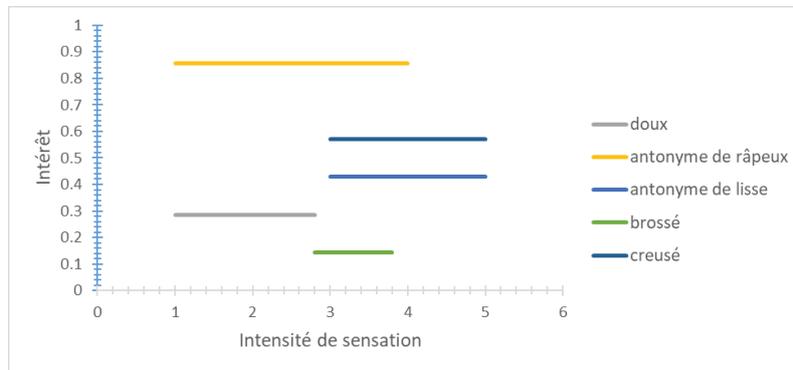
Le principe de cette étape de formalisation est proche de celui utilisé pour classer les mots de la base à partir des descripteurs de référence. En effet, la description formelle recherchée peut être interprétée comme la recherche d'un mot, pour l'instant inconnu, pouvant décrire l'ensemble des sensations attendues au contact de la surface du produit. Les mots listés sont alors les mots qui ont des relations sémantiques avec ce mot recherché (les mots décrivant les sensations souhaitées ont des relations de type *synonyme* et les mots décrivant les sensations non souhaitées des relations de type *antonyme*).

L'opération de formalisation effectuée est alors quasiment similaire à celle décrite dans le paragraphe 2.2.8 du chapitre 2 pour la classification des mots de la base en fonction des descripteurs de référence. Tout d'abord, les sensations élémentaires associées aux mots de la liste sont sélectionnées. Deux indicateurs sont alors calculés pour juger de la pertinence de la sélection :

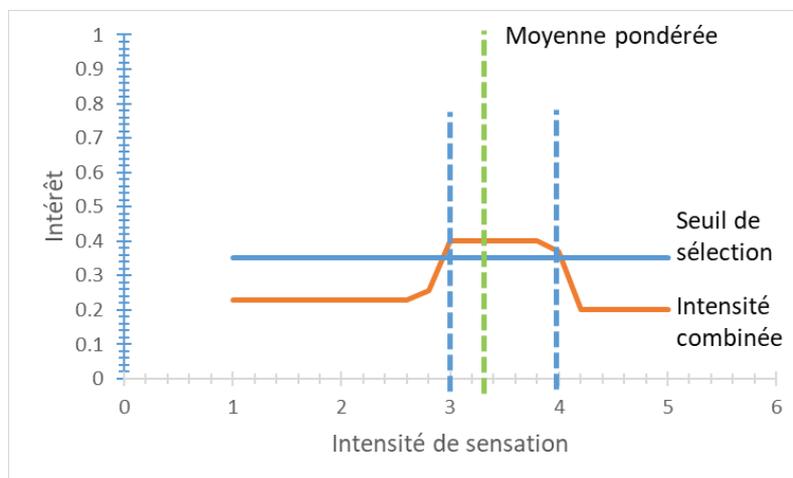
- un indicateur de confiance dans la sélection de chaque sensation élémentaire. Il se base sur la moyenne des coefficients flous des associations entre les mots et les sensations. Pour le cas d'étude par exemple, il a pour valeur 0,72 pour la sensation d'*adhérence*. Il s'agit de la moyenne des coefficients flous d'association aux sensations appartenant aux mots de la liste décrivant la sensation d'*adhérence* (ici *agressif* : 0,8, *accrochant* : 1, *creusé* : 0,6, *doux* : 0,6 et *brossé* : 0,6).
- un indicateur d'intérêt de la sensation sélectionnée dans le but du contrôle. Il se base sur le nombre de mots associés à une sensation sélectionnée en fonction du nombre de mots total. Ces valeurs sont par ailleurs pondérées par l'importance des mots listés. Pour le cas d'étude par exemple, il a pour valeur 0,68 pour la sensation d'*adhérence*. Il s'agit de la moyenne pondérée de l'importance des mots associés à cette sensation (ici *agressif* : 1, *accrochant* : 5/7, *creusé* : 4/7, *doux* : 2/7 et *brossé* : 1/7, divisé par la somme des pondérations, ici 4).

Pour ce qui est de l'intensité de sensation d'intérêt pour le contrôle, nous considérons également des intervalles d'intensité. Néanmoins, afin d'apporter davantage de précision pour le contrôle, le calcul diffère légèrement par rapport à celui effectué pour la construction du modèle et intègre l'importance accordée aux mots. D'une part, la moyenne des valeurs centrales d'intensité des mots impliqués (pondérée par l'importance des mots) donne une valeur cible pour chaque sensation. D'autre part, l'intervalle d'intensité est donné par la combinaison des intervalles d'intensité de chaque mot (également pondérés par l'importance des mots). Notons que selon le cas, il est possible que la valeur cible (moyenne pondérée sur la figure) ne se situe pas au centre de l'intervalle. La figure 4.6 donne un exemple pour la sensation de *relief* dans le cas du bracelet de montre, uniquement pour la liste réduite de mot donnée dans le tableau 4.1. La figure 4.6(a) donne les

intervalles d'intensité des mots de la liste réduite du tableau 4.1 associé à la sensation de relief pondérés par leur importance. La figure 4.6(b) donne la combinaison de ces courbes et donc la plage d'intérêt pour le contrôle.



a



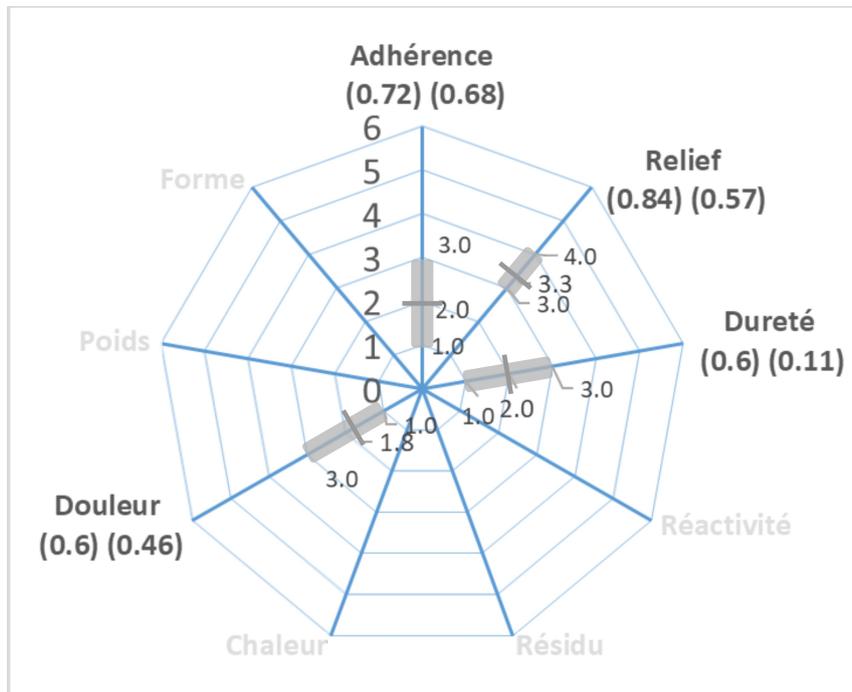
b

Figure 4.6 – Détails de la sélection de l'intervalle d'intensité pour la sensation de relief dans le cas d'étude sur le bracelet de montre : (a) Intervalles d'intensité des mots ; (b) Combinaison de l'intensité et seuil de sélection

Une description réduite et structurée est donc obtenue. Celle-ci peut par exemple être représentée sous la forme d'un diagramme radar. Dans le cas d'étude sur le bracelet de montre, cette étape a mené à la description formelle illustrée sur la figure 4.7. Cette description montre que quatre sensations élémentaires d'intérêt ont été sélectionnées pour ce cas d'application : adhérence, relief, dureté et douleur.

Grâce aux différents coefficients mentionnés ci-dessus, il est également possible de jouer sur la sensibilité de la formalisation et donc d'ajuster la sélection des sensations. Nous proposons quatre modes de sensibilité de filtrage en fonction de la pertinence pour le contrôle. Les deux modes principaux permettent, soit de sélectionner un maximum de sensations élémentaires et de plages d'intensité pertinentes (sensibilité 2), soit de ne garder que les sensations et les intervalles dont l'intérêt pour le contrôle est le plus grand (sensibilité 4). Pour la sensibilité 2, on prend le seuil donné par la somme de la moyenne des coefficients d'intérêt moins l'écart-type (et on conserve toutes les associations dont la valeur est supérieure à ce seuil relativement bas). Pour la sensibilité 4 qui est la plus stricte, on prend le seuil donné par la somme de la moyenne des coefficients d'intérêt plus

l'écart-type. Pour la sensibilité 1, on conserve l'ensemble (sans seuil) et pour la sensibilité 3, on prend un seuil égal à la moyenne des coefficients d'intérêt.



Les valeurs en parenthèses sont respectivement les indicateurs de confiance et d'intérêt de chaque sensation.

Figure 4.7 – Illustration synthétique sous la forme d'un diagramme radar de la description formelle obtenue pour le cas d'étude sur le bracelet de montre

Pour le cas d'étude, la figure 4.7 est celle obtenue en appliquant un filtre de niveau 2. Pour un seuil plus élevé (niveau 3), le système ne conserve que les sensations d'adhèrece et de relief (les plages d'intensité ne sont pas ici modifiées par un seuil de niveau 3). Nous avons d'ailleurs, en accord avec le responsable qualité en charge des bracelets de montre, décidé de ne pas retenir les sensations élémentaires de dureté et de douleur dont l'intérêt est plus faible. Les indicateurs de confiance de ces deux sensations étant également faibles, cela rend leur pertinence d'autant plus incertaine.

L'utilisateur n'intervient pas dans les calculs qui sont réalisés automatiquement par le système, sauf pour choisir la sensibilité de filtrage souhaité. Le système peut en revanche remonter certains points d'attention qui peuvent indiquer des incohérences ou des corrections à effectuer (par exemple, si des mots antonymes sont donnés dans la même liste, ou si tous les indicateurs de confiance sont faibles). En effet, si l'indicateur d'intérêt d'une sensation est élevé, mais que son indicateur de confiance est faible, il est nécessaire de vérifier cette sensation est réellement pertinente. Dans ce cas le logiciel suggère de choisir parmi les descripteurs de référence du modèle sémantiquement proches des mots déjà sélectionnés, afin de préciser la description. De plus, si l'utilisateur n'est pas d'accord avec les éléments retournés par le système, le logiciel l'invite à suivre la procédure d'enrichissement manuel (procédure numéro 2 du graphe de la figure 3.18). Une fois la sélection validée, les sensations retenues peuvent ensuite être utilisée pour exprimer de manière réduite et structurée les anomalies haptiques pouvant être détectées.

4.2.3 Définition des anomalies

L'identification de sensations d'intérêt et de plages d'intensité obtenues précédemment fixe un cadre de description qui permet de mieux définir les anomalies haptiques pouvant être présentes à la surface d'un produit. **Une anomalie haptique est ainsi considérée comme une différence entre le niveau d'intensité attendu pour une sensation élémentaire et celui mesuré.**

La quantification des mots sur les sensations a un rôle important dans la définition de l'anomalie car elle conditionne son positionnement sur l'échelle d'intensité de sensation. Néanmoins, cette échelle n'est pas appropriée pour une évaluation efficace des anomalies, car cette échelle ne renverrait que des valeurs d'intensité absolues, sans références physiques concrètes. En effet, les êtres humains sont de manière générale plus efficaces lorsqu'ils effectuent des comparaisons plutôt que des mesures absolues. Par exemple, il est plus facile d'évaluer la masse d'un objet en le soulevant et en le comparant à un autre objet qu'en lui donnant une masse absolue en kilogramme. En réalité, cette masse en kilogramme peut être donnée en effectuant également une comparaison mais, dans ce cas, cette comparaison s'effectuera avec une référence mentale dont la précision peut varier selon l'entraînement de la personne. Afin de réduire les erreurs de mesure, il est donc important de rapprocher le plus possible cette référence de l'état souhaité, et si possible de lui donner une réalité physique à laquelle la personne peut se référer à tout moment pour la comparaison (un échantillon de surface correspondant à l'état souhaité).

Ainsi, nous proposons une seconde échelle, dérivée de l'échelle d'intensité de sensation, qui se focalise sur la comparaison entre un état normal et des états anormaux. Il s'agit d'une échelle de ratio (ou de rapport) (Stevens, 1946). La partie basse de la figure 4.8 montre le type d'échelle obtenu, qui se positionne sur l'intervalle d'intensité identifié et dont la valeur cible (état normal) correspond à la valeur centrale obtenue après formalisation.

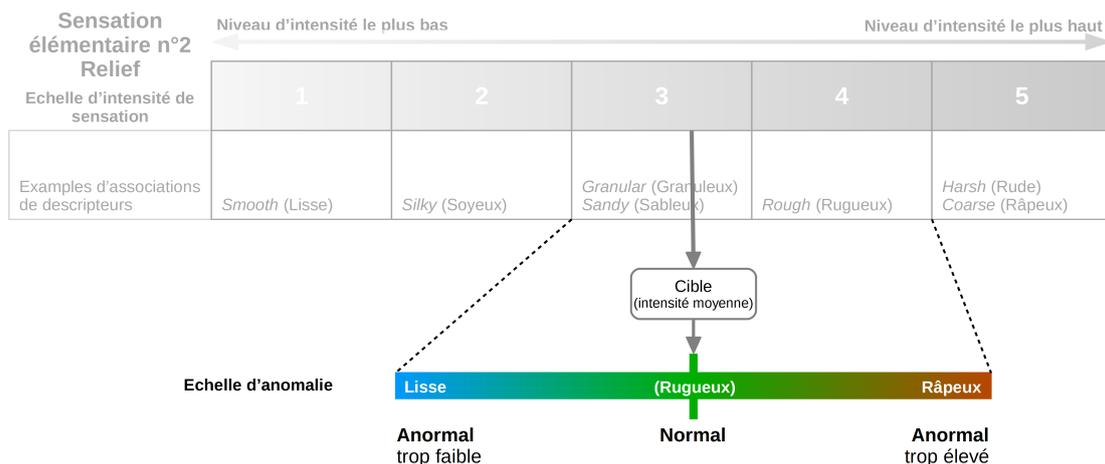


Figure 4.8 – Illustration synthétique de l'échelle d'anomalie de la sensation de relief obtenue pour le cas d'étude sur le bracelet de montre

Cette échelle indique les états **anormalement bas** et **anormalement élevé** d'une sensation par rapport à cet état **normal**. Suivant les niveaux d'intensité impliqués, un seul des deux états anormaux peut être impliqué (par exemple, pour la sensation d'**adhérence**,

la valeur cible est très proche de 1, ce qui indiquerait qu'il n'existe pas d'anomalie basse. Par ailleurs, comme nous l'avons vu précédemment, cette échelle peut ne pas être symétrique. Cela pourrait alors déjà donner une première indication sur les limites d'acceptabilité autour de l'état souhaité. Par exemple, pour la sensation de relief, le fait que l'état anormalement bas soit plus rapproché de l'état normal pourrait indiquer que les limites d'acceptabilité sont plus restrictives de ce côté de l'échelle.

Le modèle de description construit précédemment conditionne également le choix de descripteurs de référence pouvant être utilisés aux extrémités de cette échelle. Pour cela, le système à base de connaissance est questionné pour obtenir les descripteurs répondant précisément à la description des états anormaux et éventuellement de l'état normal. Le système a alors été conçu pour suggérer en premier les descripteurs de référence du modèle (classés en fonction de leurs coefficients de validation pour le cas où plusieurs descripteurs conviennent). Si aucun descripteur de référence ne convient, ou que l'utilisateur souhaite en choisir d'autres, le système suggère d'autres mots pouvant correspondre aux niveaux d'intensité concernés. Ces mots sont alors classés selon leurs coefficients de confiance (coefficients de validation et d'association aux sensations) et suivant leur précision par rapport à l'intensité de sensation. Si les mots donnés dans la liste correspondent à ces critères, ils peuvent également être choisis. Par exemple, pour le cas du bracelet, les descripteurs *lisse* et *râpeux* ont été utilisés pour décrire les états anormaux.

La figure 4.9 résume les anomalies retenues pour le cas d'étude sur le bracelet de montre. Cette représentation a l'avantage d'être très synthétique et en même temps d'être suffisamment complète pour exprimer les problèmes de qualité pouvant survenir sur un produit. Pour le cas d'étude, les anomalies définies (pour les deux sensations élémentaires sélectionnées) ont permis de répondre à 97% aux cas de non conformité relevés (point détaillé dans la section 4.4). Celles-ci sont la base de la méthode de contrôle proposée. Les étapes suivantes de définition des protocoles et des limites d'acceptabilité mettent en œuvre ces échelles d'anomalie afin d'y attacher des éléments concrets permettant la mise en place du contrôle.

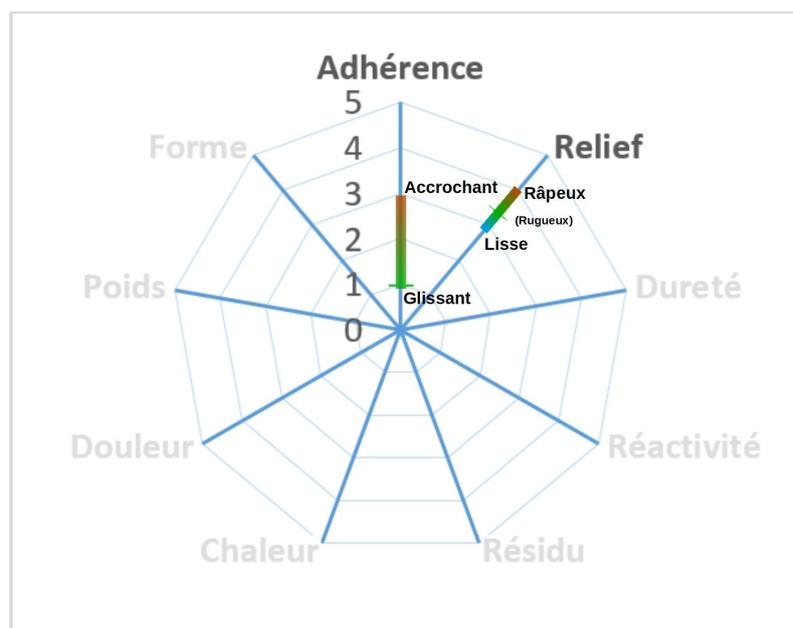


Figure 4.9 – Synthèse des anomalies retenues pour le cas du bracelet de montre

4.3 Protocoles de contrôle haptique

Pour compléter la définition de spécifications haptiques et donner aux industriels un moyen de mesurer facilement et efficacement les anomalies sur les produits, nous proposons une méthode inspirée en partie des études précédentes dans le domaine du contrôle visuel (Baudet, 2012 ; Guerra, 2008) et adaptée au contrôle haptique. La maîtrise de l'exploration, ou manière de toucher la surface dans le cadre du contrôle haptique, est primordiale afin de construire des protocoles de contrôle permettant une évaluation manuelle la plus objective possible (Crochemore et al., 2004 ; Klatzky et al., 1993). Nous avons pu observer son impact sur la variabilité des résultats du contrôle lors du test R²&E² réalisé pour le cas d'étude sur le bracelet de montre. C'est pourquoi, nous souhaitons maîtriser les conditions d'exploration tout en permettant la construction de grilles d'évaluation de la gravité des anomalies. La mise en place de ces moyens dans un cas d'application concret peut ainsi être divisée en trois phases : la sélection d'un mode d'exploration adapté à chaque anomalie, l'analyse de l'influence de la modulation de l'exploration sur la perception et enfin, l'utilisation des résultats de cette analyse pour la proposition de grilles d'évaluation appropriées.

La figure 4.10 présente de manière schématique les phases de l'étape **Protocoles**.

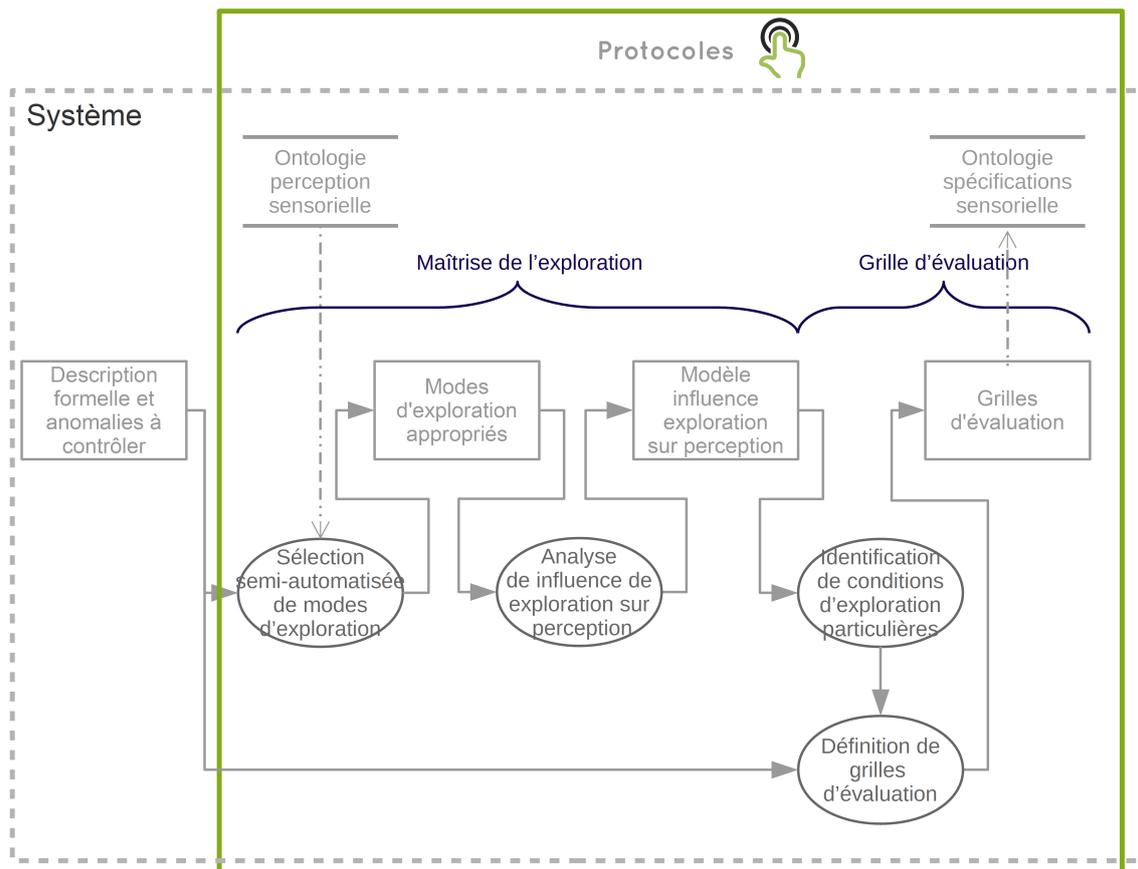


Figure 4.10 – Schéma de principe de l'étape **Protocoles** de la méthodologie de mise en place du contrôle haptique

4.3.1 Sélection du mode d'exploration approprié

La base de connaissances développée intègre les relations entre les sensations élémentaires et les modes d'exploration possibles (voir tableau 2.3 du chapitre 2). Ainsi, des mouvements et des effecteurs peuvent être suggérés pour chaque sensation d'intérêt. Étant donné que certaines sensations sont associées à plusieurs de ces modes d'exploration, les mots de vocabulaire peuvent être utilisés afin d'apporter une précision supplémentaire dans ce choix. En effet, certaines relations entre les mots et l'exploration ont également pu être établies. Par exemple, le mot *râpeux* est associé à un *mouvement tangentiel* et non à un *contact statique*, ainsi c'est ce mouvement qui sera suggéré pour la sensation *relief*. Dans le cas où le système de connaissances n'est pas capable de privilégier certains éléments plutôt que d'autres parmi ceux appropriés pour une sensation élémentaire, ou en raison de possibles contraintes externes de contrôle (difficulté d'accès au produit, mouvements des contrôleurs restreints, etc.), le choix final des éléments est laissé à l'utilisateur (responsable qualité). Nous limitons le choix à un seul mouvement et un seul effecteur par sensation. Ce choix pourra par ailleurs être enregistré en tant qu'enrichissement de la base de connaissances et suggéré automatiquement pour d'autres cas d'application similaires.

En plus du mouvement et de l'effecteur, la condition de l'objet au moment du contrôle (position, fixation, etc.) peut également avoir une importance. Afin de réduire les sources de variabilité, il convient de sélectionner une condition adaptée aux contraintes du contrôle et de la figer pour le reste des tests à réaliser.

Dans le cas d'étude sur le bracelet de montre, nous avons sélectionné un mode d'exploration commun aux deux sensations élémentaires d'intérêt (*adhérence* et *relief*). En effet, au regard des associations sensation-exploration et des contraintes de contrôle, un même mouvement et un même effecteur ont pu être choisis pour ces deux sensations. Cela a notamment permis de simplifier l'analyse et de réduire son temps d'application. Le mode d'exploration choisi est le suivant :

Mouvement tangentiel avec la pulpe du doigt ou l'ongle, pour un objet immobile.

4.3.2 Analyse de l'influence de l'exploration sur l'intensité perçue

Nous avons pu voir dans la littérature que la manière de toucher les produits a un impact important sur la mesure sensorielle. La sélection de modes d'exploration appropriés permet déjà de figer un cadre adapté (par sensation élémentaire) pour toucher la surface du produit. Nous avons néanmoins souhaité aller plus loin dans le conditionnement de la manière de toucher, afin de fournir, de manière analogue aux méthodes proposées dans le contrôle visuel (Baudet, 2012), la possibilité de moduler les conditions d'exploration des surfaces. Pour cela, nous proposons de réaliser une analyse de l'influence des paramètres d'exploration sur la mesure de l'intensité des sensations élémentaires et de modéliser cette influence pour, au final, ajuster la mise en évidence des anomalies sensorielles. Bien que cette analyse soit ici présentée de manière détaillée, l'outil destiné aux utilisateurs (présenté dans le chapitre suivant) simplifie significativement son application.

Suivant le mode d'exploration sélectionné, un certain nombre de paramètres d'exploration sont applicables. Par exemple, pour un mouvement tangentiel avec le bout du doigt, il est possible de varier la vitesse de déplacement, l'angle de contact entre le doigt et la surface, la direction de déplacement, l'effort de contact, etc. Le tableau 4.2 liste quelques-uns de ces paramètres, classés en fonction de leurs associations aux mouvements, effecteurs (paramètres de contact), ou aux conditions d'objet.

Paramètres de mouvement	Paramètres de contact	Paramètres de condition d'objet
Vitesse	Angle de contact	Tenue (par le contrôleur, ou fixé sur un support)
Direction du mouvement (vecteur en 3 dimensions)	Pression de contact	Vitesse
Localisation (zone de contact)	Aire de contact	Trajectoire
Trajectoire du mouvement	Durée de contact	Orientation
	Itération du contact	

Tableau 4.2 – Liste de quelques paramètres d'exploration

Génération d'un plan d'expérience

Dans le but de mieux illustrer les détails de la méthode proposée, le cas d'étude sur le bracelet de montre est utilisé comme support. Pour attendre l'objectif d'analyse de l'influence de l'exploration sur l'intensité perçue des sensations élémentaires, nous avons utilisé un plan d'expérience factoriel. Cinq paramètres ont été choisis pour le cas d'étude. Ils peuvent être appliqués au mode d'exploration commun aux deux sensations élémentaires. Nous nous sommes en effet limités à cinq facteurs afin de réduire le temps d'analyse. De manière générale, nous avons autant que possible tenté d'effectuer les choix permettant de limiter le temps d'expérimentation et ainsi de réduire les ressources humaines (de l'entreprise partenaire) nécessaires à son application. Ces cinq facteurs sont :

- Angle de contact : angle entre le doigt et la surface de l'échantillon.
- Vitesse de déplacement : vitesse entre le doigt (mobile) et l'échantillon (fixe).
- Effort d'appui : pression de contact appliquée par le doigt sur l'échantillon.
- Sens de déplacement de l'effecteur : direction de déplacement du doigt par rapport au participant.
- Nombre de contacts : nombre d'itérations d'une même exploration pour une évaluation.

Nous considérons deux valeurs par facteur, sauf pour l'angle de contact qui peut prendre trois valeurs (30° et 60° avec la pulpe du doigt, 90° avec l'ongle). La figure 4.11 illustre le paramètre d'angle de contact à la surface des échantillons utilisé pour le cas d'étude.



Figure 4.11 – Illustration d'une variation de l'angle de contact entre le doigt et l'échantillon : (a) Angle de 30° ; (b) Angle de 60°

Étant donné le nombre de facteurs et de valeurs, ce plan présente 7 degrés de liberté et un plan complet nécessiterait 48 essais. Nous avons choisi de nous limiter à 12 essais, et ceci dans le but de réduire le temps d'expérimentation. Il s'agit alors d'un plan fractionnaire de résolution III⁴². Ce plan d'expérience factoriel à 5 facteurs et 12 lignes ainsi généré est présenté sur le tableau 4.3 (obtenu grâce au logiciel Ellistat⁴³). Chaque ligne constitue une condition d'exploration.

N°	Angle	Pression	Vitesse	Direction	Iterations
1	30	faible	faible	tirer	1
2	30	faible	élevée	pousser	3
3	30	élevée	faible	tirer	3
4	30	élevée	élevée	pousser	1
5	60	faible	faible	tirer	3
6	60	faible	élevée	pousser	3
7	60	élevée	faible	pousser	1
8	60	élevée	élevée	tirer	1
9	90	faible	faible	pousser	1
10	90	faible	élevée	tirer	1
11	90	élevée	faible	pousser	3
12	90	élevée	élevée	tirer	3

Tableau 4.3 – Plan d'expérience pour l'analyse de l'influence de l'exploration sur la mesure de l'intensité des sensations élémentaires

Bien que 32 échantillons aient été fabriqués pour ce cas d'étude, seul 3 d'entre eux (visibles en figure 1.3) ont été employés dans cette analyse, toujours afin de réduire le temps d'application. Ces trois échantillons ont néanmoins été sélectionnés avec soin afin de répondre aux critères suivants :

- être les plus représentatifs possibles : un échantillon majoritairement accepté sans anomalie lors du test $R^2 \& E^2$, un échantillon majoritairement anormal mais accepté, et un échantillon majoritairement non accepté.
- avoir obtenu les résultats de variabilité du test $R^2 \& E^2$ les plus faibles possibles : ceci est une précaution afin de limiter la variabilité initiale de décision étant donné que l'on se focalise dans cette analyse uniquement sur la mesure de l'intensité de sensation et non sur la mesure d'anomalies.

Conduite des expérimentations

Les expérimentations nécessaires à cette analyse ont été réalisées de la manière suivante. Les participants (un responsable qualité et deux contrôleurs) ont été invités à mesurer l'intensité de sensation perçue au contact de chacun des trois échantillons sélectionnés, pour chacune des conditions d'exploration. De la même manière que le test $R^2 \& E^2$, les échantillons ont été touchés à l'aveugle, dans un climat calme (sans bruit) et dans une pièce tempérée. Pour respecter le mode d'exploration imposé, les échantillons étaient fixés, immobiles et les participants n'y avait accès qu'avec un seul doigt (étant donné les contraintes de contrôle, il s'agissait du pouce en raison de la manière dont le bracelet est

42. Un plan d'expérience de résolution III fait l'hypothèse que l'ensemble des interactions est nul. Il faut donc être attentif à l'interprétation des résultats et si nécessaire les valider par des analyses complémentaires.

43. Logiciel Ellistat, Pillet consulting : <https://ellistat.com/>

tenu). Les valeurs des différents paramètres étaient expliquées à l'aide d'images similaires à celles de la figure 4.11, ou bien à l'aide de vidéos en ce qui concerne les paramètres liés au mouvement (la vitesse de déplacement par exemple).

Nous avons tout d'abord imaginé une approche où les participants fourniraient des valeurs d'intensité de manière absolue, en s'appuyant directement sur l'échelle d'intensité de chaque sensation (de 1 à 5). Néanmoins, cette approche a montré que les résultats obtenus étaient trop variables d'une personne à une autre en raison de l'absence de référence dans la mesure. Ainsi l'analyse de l'influence de l'exploration n'était pas suffisamment concluante. Une seconde approche a donc été utilisée. Elle s'appuie sur une mesure relative de l'intensité de sensation, d'une condition d'exploration à une autre. En effet, étant donné que nous souhaitons ici analyser l'influence de l'exploration sur l'intensité perçue des sensations, cette approche est plus appropriée car elle implique cette comparaison dès la mesure (les êtres humains sont par nature, nous l'avons dit, plus performants lorsqu'il s'agit de comparer plutôt que de donner une mesure absolue). Pour un résultat complet, nous pourrions comparer les conditions d'exploration deux à deux, avec une approche similaire à la méthode AHP (Saaty, 2008). Cette opération serait néanmoins très chronophage. Nous avons donc opté pour une solution combinant une échelle d'intensité relative (présentée en figure 4.12) comparant les intensités perçues avec une condition d'exploration de référence (la première de la liste, fixée à la valeur 0 de l'échelle) et avec les autres conditions d'exploration.

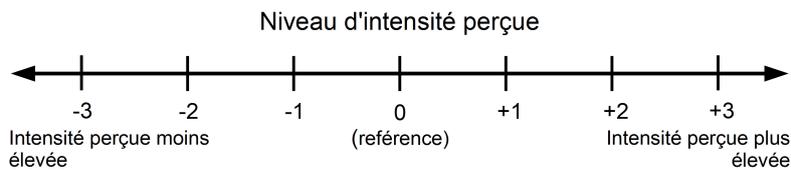


Figure 4.12 – Échelle permettant une mesure relative de l'écart de niveaux d'intensité perçue

Ainsi, il a été demandé aux participants, pour chaque échantillon, de dire si l'intensité perçue avec chaque condition était inférieure, supérieure ou égale à celle perçue avec la condition de référence. Cette approche de mesure relative écarte par nature la différence d'intensité de sensation pouvant exister entre les échantillons.

Vérification d'une influence significative

Pour recentrer les valeurs obtenues et éviter la distorsion éventuelle de l'échelle de perception d'une personne à une autre (l'écart de perception entre les niveaux de cette échelle n'étant pas forcément perçu de la même manière), nous avons normalisé les résultats par échantillon et par personne. Nous avons donc soustrait à chaque valeur donnée par un participant, la moyenne du lot de 12 valeurs (résultats des 12 conditions d'exploration) pour un même échantillon. Ceci contribue déjà à recentrer les valeurs. Nous avons ensuite divisé le résultat par l'écart-type des 12 valeurs, ce qui a pour effet de réduire la distorsion d'échelle. Nous obtenons donc 9 valeurs pour chaque condition d'exploration (3 participants et 3 échantillons). Les valeurs normalisées sont résumées dans le graphique de la figure 4.13, obtenu grâce au logiciel Ellistat (voir note 43).

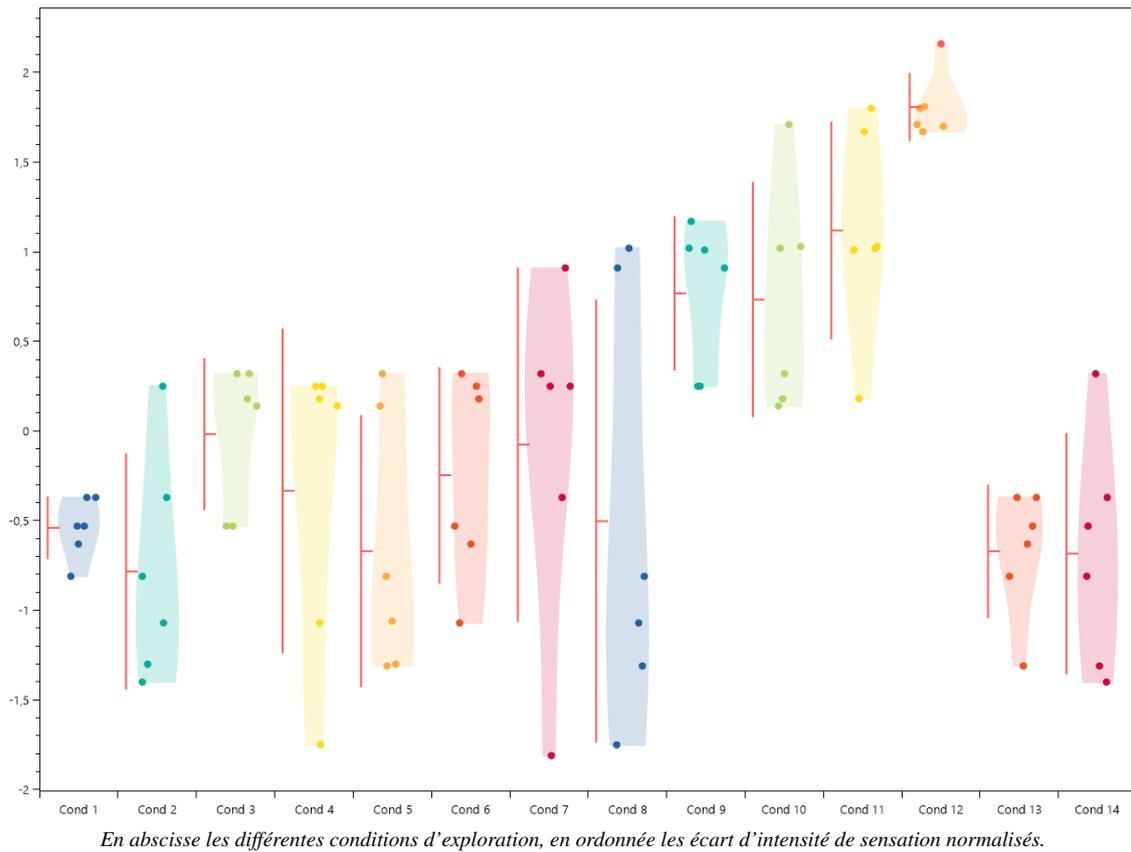


Figure 4.13 – Résultats des écarts d'intensité normalisés de la sensation relief entre les 12 conditions d'exploration

Cette figure donne également la dispersion des résultats pour chaque condition d'exploration du plan d'expérience. Une première validation de la cohérence des résultats peut être notée en observant les valeurs normalisées pour la condition numéro 1 de référence. Sa dispersion est effectivement très resserrée, ce qui indique que les moyennes par lot de conditions sont globalement proches. De plus, en effectuant une analyse de la variance (ANOVA), nous observons que l'écart entre les moyennes de chaque condition est très significatif. Néanmoins, l'hypothèse de normalité⁴⁴ des résultats n'étant pas vérifiée, le test de Kruskal-Wallis est plus approprié. Celui-ci conclut également à un écart très significatif. Les résultats indiquent donc que les variations des paramètres d'exploration ont un impact significatif sur l'intensité perçue de la sensation de relief. La même conclusion peut être tirée pour la sensation d'adhérence. Davantage de détails concernant ces résultats sont fournis en annexe C.

Modélisation de l'influence

Afin d'analyser plus précisément l'impact de chaque facteur, nous modélisons leur influence grâce à une régression linéaire multiple. Étant donné le plan d'expérience utilisé (fractionnaire), il faut être prudent dans l'analyse des résultats. Par exemple, pour le cas d'étude en considérant la sensation de relief, un premier modèle n'utilisant que les effets directs des facteurs est obtenu et présenté en figure 4.14(a). Les paramètres d'exploration

44. Hypothèse de normalité : la répartition des résultats suit une loi de Gauss.

Angle et *Pression* ont un effet significatif sur l'intensité perçue de la sensation de relief, pour les échantillons considérés. Le coefficient de détermination (R^2) ajusté est de 44,9% (et R^2 prévu de 42,2%), ce qui est relativement faible, mais signifie que le modèle donne tout de même une indication globale de l'influence de ces deux paramètres.

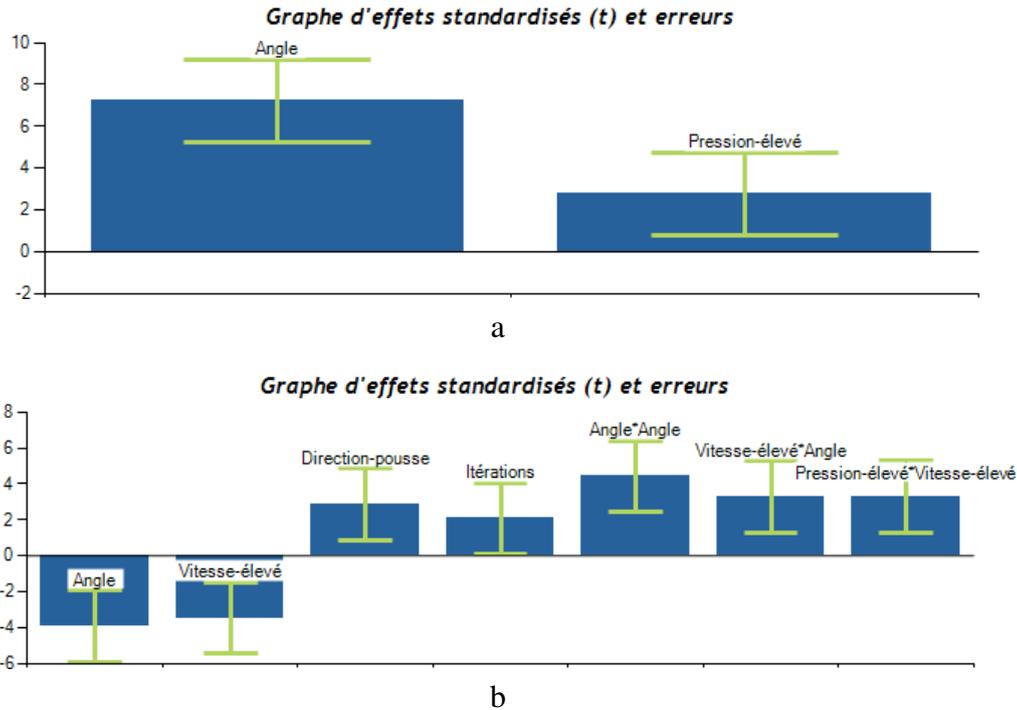


Figure 4.14 – Modèle d'influence de l'exploration sur la perception de l'intensité de relief : (a) modèle incluant les effets simples ; (b) modèle incluant les effets d'interactions et quadratiques

Nous avons donc cherché à obtenir une modélisation plus précise de cette influence. La figure 4.14(b) présente un modèle un peu plus complexe intégrant les effets croisés, ainsi que les effets quadratiques (effet des facteurs au carré). Le coefficient de détermination (R^2) ajusté est augmenté jusqu'à 57,5% (et R^2 prévu de 51,2%), ce qui constitue une augmentation d'un peu plus de 10% par rapport au modèle plus simple. Néanmoins, plusieurs observations peuvent être effectuées. Le modèle plus complexe implique des erreurs plus importantes sur chaque facteur que le modèle simple. D'autres paramètres d'exploration sont impliqués (*itérations*, *vitesse*, et *direction*) malgré le fait que leur influence n'ait pas été clairement observée dans le modèle simple. Ceci pourrait être dû au type de plan d'expérience utilisé. De plus, lorsqu'on examine les prévisions de ces modèles pour des cas particuliers (intensité de sensation maximale, minimale ou moyenne), l'influence des deux paramètres *angle* et *pression* est quasiment similaire pour les deux modèles. Ainsi, malgré une amélioration du coefficient de détermination, nous avons choisi dans ce cas d'étude de nous limiter à un modèle simple incluant ces deux paramètres modulant ainsi la perception de l'intensité de la sensation de relief.

Une modélisation similaire est réalisée pour la sensation d'adhérence. Pour le modèle simple, les paramètres *angle*, *pression*, *direction* et *itérations* ont des effets significatifs sur l'intensité perçue. Plus de détails concernant ces analyses sont fournis dans l'annexe C. Ce sont ces résultats qui ont permis la mise en place d'une grille d'évaluation, point central du protocole de contrôle, décrite dans la section suivante.

Réduction de la variabilité d'évaluation

Afin de prévenir la variabilité dans la mesure de l'intensité d'une sensation, nous avons cherché à identifier l'influence des paramètres d'exploration sur la variation des mesures d'un participant à un autre. Nous avons ainsi examiné l'écart-type des relevés d'intensité perçue pour chaque condition d'exploration, pour chaque échantillon, et pour chaque sensation élémentaire. De manière significative, la vitesse de déplacement à la surface de l'échantillon a une influence sur la variabilité de ces mesure (voir annexe C). Une augmentation de la vitesse a pour effet d'augmenter cette variabilité. Il s'agira donc pour la définition des protocoles de se limiter autant que possible à une vitesse de déplacement faible afin de limiter la variabilité des mesures.

4.3.3 Proposition d'une grille d'évaluation

Pour fournir une méthode d'évaluation haptique des produits qui soit à la fois simple et performante, nous nous sommes inspirés des études précédentes dans le domaine du contrôle visuel de l'équipe de recherche du laboratoire SYMME. La méthode proposée utilise les connaissances acquises sur l'influence de l'exploration sur la perception pour mesurer la gravité des anomalies haptiques. Pour le contrôle visuel, (Baudet, 2012, p.68) proposait de mesurer la gravité des anomalies en inspectant le produit suivant différentes conditions d'observation (exploration visuelle). La détection ou non des anomalies suivant chaque condition impliquait ainsi une gravité plus ou moins importante suivant l'influence des conditions sur la perception. La multiplication des conditions dans lesquelles le produit était observé permettait également d'améliorer la confiance dans le résultat et d'affiner sa précision (indication plus fine de la gravité).

De manière analogue, nous proposons une méthode qui utilise différentes conditions d'exploration pour moduler la perception haptique et ainsi mesurer la gravité des anomalies. Nous prendrons à nouveau l'exemple du cas d'étude sur le bracelet de montre pour illustrer nos propos. L'objectif était de construire une grille d'évaluation composée de plusieurs conditions d'exploration. Pour chacune d'elle, il est demandé à l'opérateur d'indiquer s'il perçoit ou non une anomalie. Les anomalies ont été définies précédemment lors de l'étape de description. Nous avons vu que pour chaque sensation élémentaire, il est possible de définir une anomalie basse et haute, autour du niveau d'intensité cible, ou bien uniquement une anomalie basse, ou encore uniquement une anomalie haute. Nous indiquons simplement (-1) s'il s'agit d'une anomalie basse, (+1) s'il s'agit d'une anomalie haute et (0) s'il n'y a pas d'anomalie.

Nous choisissons de limiter à trois le nombre de conditions d'exploration différentes pour chaque sensation élémentaire. Ainsi, trois conditions particulières sont définies en fonction des résultats de l'analyse précédente et des modèles d'influence de l'exploration sur la perception : une condition C- (condition réductrice) minimise l'intensité perçue de la sensation, une condition C+ (condition amplificatrice) maximise l'intensité perçue et une condition Cn (condition nominale) fournit une valeur centrale. Ce choix permet de limiter le nombre de contacts avec le produit. De plus, étant donné l'incertitude observée lors de la définition de modèles d'influence de l'exploration (R^2 relativement faibles), ce choix permet d'en limiter l'impact sur les résultats du contrôle (seules les valeurs extrêmes et centrales sont conservées). La figure 4.15 illustre le positionnement de ces conditions sur l'échelle de niveau d'intensité perçue.

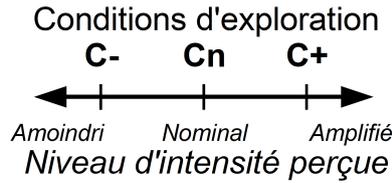


Figure 4.15 – Les trois conditions d'exploration particulières et leur positionnement sur l'échelle de niveau d'intensité perçue

Nous considérons que le niveau d'intensité souhaité pour une sensation correspond au niveau 0 de la condition nominale Cn. Cette condition particulière est ainsi la condition référente pour définir l'état conforme. Les conditions C- et C+ fournissent alors une perception légèrement décalée de ce niveau souhaité et servent à préciser l'évaluation des anomalies. Par ailleurs, s'il fallait ne conserver qu'une seule condition pour juger de la gravité des anomalies, la condition nominale serait choisie.

Par exemple, pour la sensation de **relief**, on obtient la grille d'évaluation présentée en figure 4.16. Le même type de grille a également été définie pour la sensation d'**adhérence** (voir annexe C).

Conditions d'exploration	Mouvement	Effecteur	Angle du doigt	Pression	Vitesse	Echelle d'anomalie
C- (Réduit)			30° (A plat)			Lisse (Rugueux) 0 Râpeux -1 0 1
Cn (Nominal)	Tangentiel	Pulpe du doigt	60° (Oblique)	Faible	Faible	-1 0 1
C+ (Amplifié)			90° (Orthogonal)	Elevée		-1 0 1

Figure 4.16 – Exemple de grille d'évaluation des anomalies de **relief** proposée pour le cas d'étude

On retrouve sur cette grille le mode d'exploration, les paramètres ayant une influence significative sur la perception, ainsi que les valeurs de ces paramètres correspondant aux trois conditions particulières mentionnées ci-dessus. En effet, grâce au modèle d'influence établi précédemment, nous avons cherché la combinaison de valeurs de ces paramètres qui permette d'amoindrir, d'amplifier et d'avoir une valeur nominale de l'intensité de sensation perçue par les opérateurs. Il existe plusieurs solutions étant donné que les modèles utilisés ne sont pas bijectifs. Nous avons ainsi choisi une solution qui répond aux critères de chaque condition particulière. Par exemple, en suivant le modèle d'influence de l'exploration sur la sensation de **relief**, il faut toucher la surface avec un angle à 30° et une pression de contact faible pour amoindrir l'intensité perçue. La vitesse est fixée à la valeur faible et les autres paramètres (non représentés sur la figure) sont également figés pour éviter toute interaction non souhaitée.

La partie droite de cette figure contient les d'échelles d'anomalie, ainsi qu'une illustration de leur positionnement suivant le type de condition d'exploration⁴⁵. En effet, les conditions C- et C+ fournissent respectivement une perception décalée vers le haut et vers

45. L'illustration du décalage horizontal des échelles ne correspond pas forcément au décalage réel d'intensité perçue

le bas du niveau souhaité. Par exemple, comme on perçoit avec C- un niveau d'intensité plus bas qu'avec Cn, cela signifie que pour C- le niveau d'intensité cible sera en réalité plus élevé que pour Cn, et inversement avec C+.

Pour chaque condition, l'opérateur indique alors -1 ou +1 si une anomalie est détectée suivant son type (intensité trop basse ou trop haute), ou bien 0 si aucune anomalie n'est détectée. Un calcul est ensuite effectué en utilisant ces trois valeurs, afin de déterminer la gravité de l'anomalie, mais également afin de détecter d'éventuelles incohérences dans les mesures. Le tableau 4.4 présente une table de calcul de la gravité d'une anomalie.

Condition N (nominale)	Condition - (amoindrie)	Condition + (amplifiée)
Si 0 : +0	Si -1 : -1 <small>erreur si C+ = 1</small>	Si -1 : -2 <small>erreur si C- = 1</small>
	Si 0 : +0	Si 0 : +0
	Si 1 : +2 <small>erreur si C+ = -1</small>	Si 1 : +1 <small>erreur si C- = -1</small>
Si -1 : -1	Si -1 : -1	Si -1 : -2
	Si 0 : +0	Si 0 : +0
	Si 1 : erreur	Si 1 : erreur
Si 1 : +1	Si -1 : erreur	Si -1 : erreur
	Si 0 : +0	Si 0 : +0
	Si 1 : +2	Si 1 : +1

Tableau 4.4 – Table de calcul de la gravité d'une anomalie

Cette table additionne des points suivant les réponses données à la détection d'anomalie (-1, 0 ou +1) pour chaque condition d'exploration. Les points de gravité sont répartis de la manière suivante :

- La condition nominale donne le niveau « nominal » de l'anomalie, donc la répartition des points pour Cn est symétrique (-1, 0, +1).
- Les conditions C- et C+ donnent des niveaux « décalés », donc la répartition des points pour ces deux conditions est également décalée. Une gravité plus importante est attribuée si l'anomalie est identifiée par une condition sensée en réduire la perception. Par exemple, si une anomalie de type *intensité trop élevée* est détectée avec la condition amoindrissant la perception, alors la gravité est plus importante. Inversement, si une anomalie de type *intensité trop faible* est détectée avec la condition amoindrissant la perception, alors la gravité est moins importante. Le même principe est appliqué de manière opposée pour la condition augmentant la perception.

Nous obtenons donc des valeurs de gravité qui varient entre -4 et 4, c'est à dire 9 graduations possibles (-4 étant une gravité élevée pour une anomalie basse et 4 étant une gravité élevée pour une anomalie haute). Les poids des valeurs fournies pour les différentes conditions sont résumés dans le graphe de la figure 4.17.

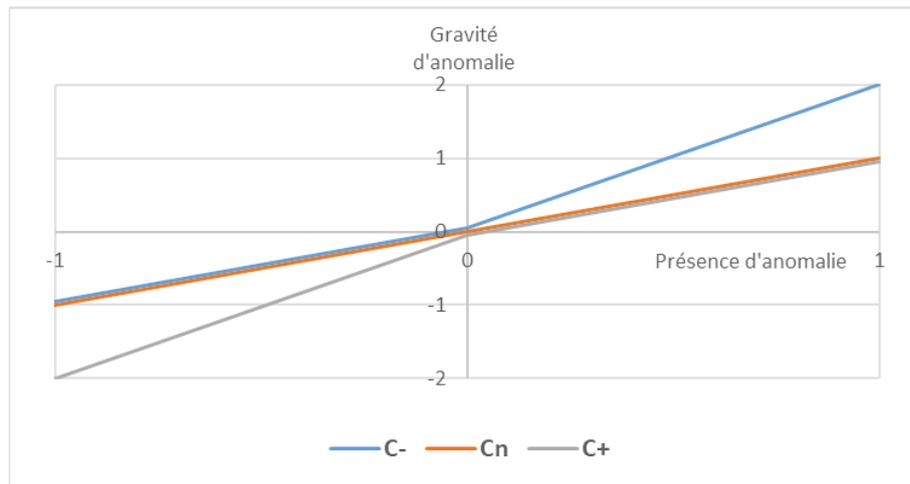


Figure 4.17 – Pondération des réponses données à chaque condition d’exploration, pour le calcul de la gravité d’une anomalie

De plus, grâce à cette table, il est également possible d’identifier de possibles erreurs de mesure lorsqu’une anomalie est détectée comme étant basse et haute à la fois. De manière générale, le calcul renvoie une erreur lorsque des anomalies opposées sont détectées pour au moins deux conditions. Notons par ailleurs que comme on ne considère que les anomalies hautes pour la sensation d’adhérence, cette table de calcul peut être simplifiée pour ne conserver que les détections d’anomalies 0 et 1 (dans ce cas, les erreurs ne sont par contre pas détectées).

Ayant défini des grilles d’évaluation pour les anomalies de relief et d’adhérence qui permettent d’obtenir une indication de leur gravité sur la qualité haptique souhaitée, il convient de définir des limites d’acceptabilité afin de pouvoir décider de la conformité du produit. C’est l’objet de l’étape suivante de la méthodologie proposée.

4.4 Tolérances et référentiel de contrôle

La dernière étape du processus de mise en place du contrôle haptique, avant l'étape de validation, consiste à définir les limites de conformité du contrôle, c'est-à-dire les limites d'acceptabilité d'un produit au regard de la qualité haptique souhaitée. Cette définition peut également impliquer d'autres éléments décisionnels externes telles que, par exemple, des contraintes économiques liées à la volonté de limiter le taux de rebuts (pièces non acceptées) tout en s'assurant que la qualité obtenue est satisfaisante vis-à-vis des attentes clients.

Nous proposons une démarche afin de définir ces tolérances pour chaque anomalie identifiée. Celle-ci fait intervenir la notion de conformité des produits qui vise à dire si un produit répond aux attentes en termes de qualité ou s'en éloigne. Les connaissances des personnes responsables de la qualité des produits, des experts impliqués lors de leur conception, ou même certaines directives de conception peuvent alors être impliquées. Cette démarche est appliquée de manière indépendante pour chaque sensation élémentaire d'intérêt, toujours dans un souci de décomposition et de simplification du contrôle.

La figure 4.18 présente de manière schématique les phases de l'étape **Tolérances**.

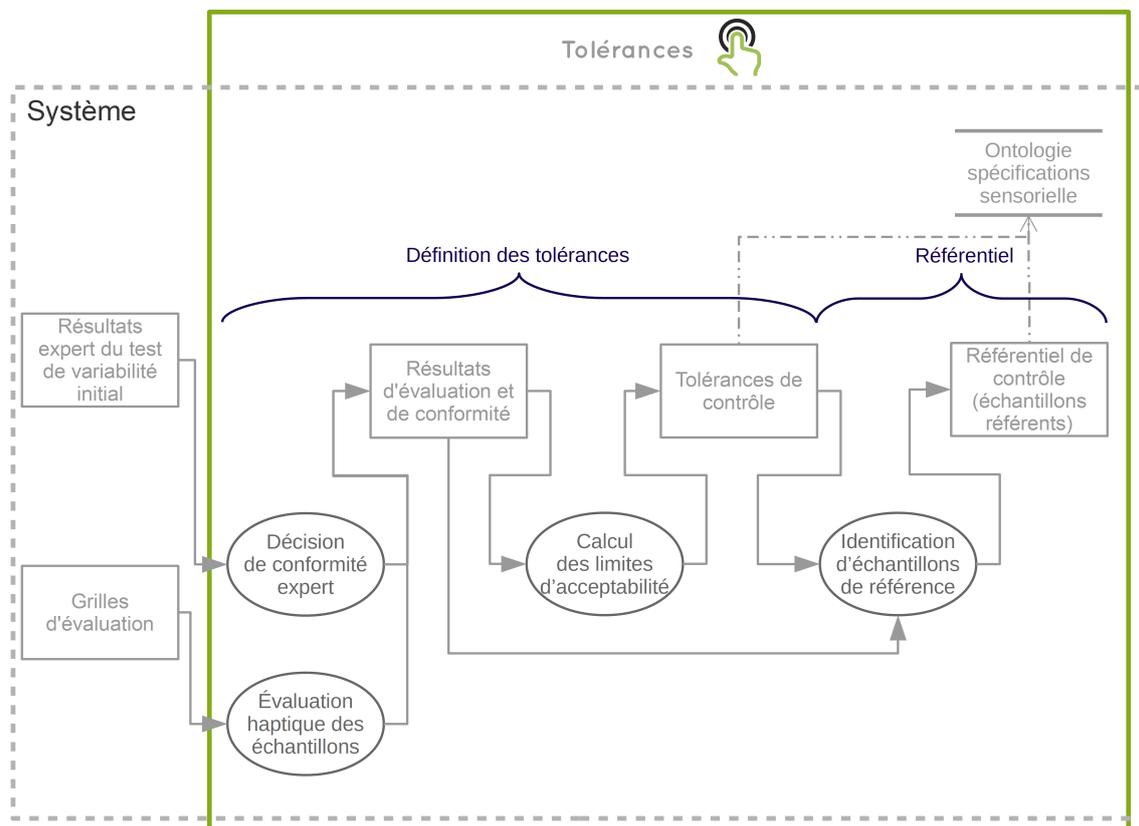


Figure 4.18 – Schéma de principe de l'étape **Tolérances** de la méthodologie de mise en place du contrôle haptique

4.4.1 Établissement des limites d'acceptabilité

Pour établir les limites d'acceptabilité, il est possible de s'appuyer sur les résultats du test initial de variabilité (pour le cas d'étude nous avons conduit un test $R^2&E^2$) qui fournit des indications de conformité des produits. Seuls les résultats des participants « experts » (les responsables qualité dans le cas d'étude du bracelet de montre) sont alors considérés. Ces résultats sont néanmoins donnés de manière globale pour l'ensemble des sensations haptiques perçues sur un produit. Il faut donc affiner ces valeurs en se focalisant sur les sensations considérées.

Nous proposons donc dans un premier temps d'évaluer les échantillons grâce à la grille d'évaluation construite précédemment, et cela pour chaque sensation élémentaire d'intérêt. En complément, il est demandé de confirmer ou de préciser la décision d'acceptabilité des échantillons (issue du test de variabilité) pour chaque sensation élémentaire, en utilisant la condition d'exploration Cn. Par exemple, pour le cas d'étude, en considérant la sensation de *relief*, nous obtenons le tableau 4.5.

N° échantillon	Cn	C-	C+	Gravité d'anomalie	Décision de conformité
3	0	0	0	0	0
5	-1	-1	0	-2	1
8	-1	-1	-1	-4	2
10	-1	-1	-1	-4	2
12	-1	-1	-1	-4	2
13	1	1	1	4	2
14	1	1	0	3	1
18	-1	-1	-1	-4	2
21	0	0	0	0	1
28	-1	-1	0	-3	2
32	0	0	0	0	0

Décision de conformité : 0=accepté sans anomalie, 1=accepté avec anomalie, 2=refusé.

Tableau 4.5 – Résultats de l'évaluation par un expert d'un sous-ensemble d'échantillons pour la définition des tolérances des anomalies de *relief*

Il est possible, à partir de ce tableau, de déduire les limites d'acceptabilité. Il s'agit des valeurs limites de gravité pour lesquelles les échantillons ont été considérés comme acceptés, tandis qu'une gravité plus importante rend les échantillons non acceptables. Dans notre cas, nous pouvons conclure que la limite de gravité pour une anomalie basse est de -2 (ligne en bleu dans le tableau). Par ailleurs, la limite de gravité pour une anomalie haute est de 3 (ligne en rouge dans le tableau). Nous observons également que l'asymétrie de positionnement du niveau d'intensité cible sur l'intervalle d'intérêt est effectivement conservée pour les limites d'acceptabilité.

Par ailleurs, ces résultats permettent de valider la pertinence des conditions d'exploration sélectionnées. En effet, si les valeurs fournies pour chaque condition ne respectent pas l'ordre attendu de l'intensité perçue, ou que la table de gravité renvoie une erreur (en cas d'inversion d'anomalie basse et haute), il se pourrait que le modèle d'influence obtenu ne soit pas correct (en vérifiant au préalable qu'il ne s'agit pas d'une erreur du participant). Dans notre cas, sur l'ensemble des évaluations réalisées par l'expert, une seule inversion d'ordre a été observée (écart de 1 point sur l'échelle d'anomalie entre deux conditions) et aucune erreur n'a été renvoyée. Nous considérons donc que l'influence estimée des conditions d'exploration est correcte.

4.4.2 Définition d'un référentiel

Bien que les notions d'anomalie et de tolérance définies précédemment apportent un cadre précis d'application du contrôle, elles n'en restent pas moins relativement abstraites. Il est donc primordial à ce stade de fournir des références physiques concrètes grâce auxquelles les personnes réalisant les opérations de contrôle pourront se référer et se former.

La méthodologie de mise en place du contrôle prévoit donc également la définition d'un référentiel physique de contrôle constitué d'échantillons spécifiques ayant servi à la mise en place du contrôle. D'une manière similaire à la définition des tolérances, ces échantillons sont identifiés en comparant les décisions de conformité et les valeurs d'évaluation. Par exemple, pour le cas d'étude, le tableau 4.5 permet de sélectionner plusieurs échantillons pouvant être positionnés sur des points particuliers de l'échelle d'anomalie et ainsi servir de référence. La figure 4.19 illustre le positionnement de ces échantillons sur l'échelle d'anomalie, en face des tolérances définies précédemment.

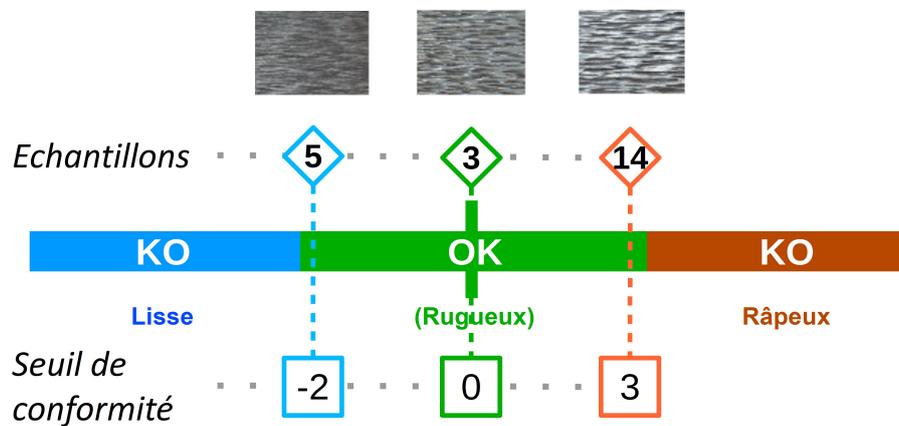


Figure 4.19 – Résultat des tolérances et du référentiel associé pour la sensation de relief pour le cas d'étude

Ces échantillons de référence fournissent donc un repère physique des états particuliers de l'échelle d'anomalie. Étant donné l'influence des conditions d'exploration sur la perception, c'est la condition C_n qui permet de donner l'intensité de sensation de référence issue de ces échantillons. Par exemple, afin de percevoir l'intensité de relief cible (état normal souhaité) pour le cas d'étude, il convient de toucher l'échantillon 3 dans la condition C_n .

Nous fournissons, grâce à cette méthode, un moyen rapide de définir un référentiel physique adapté aux besoins du contrôle.

4.5 Application au contrôle manuel et validation des performances

Les éléments définis dans les étapes de **description**, **protocoles** et **tolérances** nous permettent de fournir un cadre précis et des moyens adaptés aux problématiques de contrôle haptique. Ceux-ci peuvent ensuite être utilisés pour le contrôle haptique. Nous détaillons ici un processus pour l'application du contrôle, la manière d'utiliser les protocoles et présentons les résultats de validation de la méthode sur le cas d'étude du bracelet de montre.

4.5.1 Processus d'application du contrôle haptique

Pour maîtriser l'application du contrôle, nous utilisons également une séparation en étapes, proche de celle proposée dans (Guerra, 2008, p.86) (rappelée en figure 1.11 du chapitre 1). Cette méthode décompose le contrôle en distinguant l'étape de perception de l'anomalie (qui inclut sa détection), l'étape de quantification de l'anomalie (qui inclut son identification et le calcul de sa gravité) et l'étape de jugement de l'anomalie (qui inclut l'utilisation des tolérances définies). Dans notre cas, nous focalisons l'attention du contrôleur sur une sensation haptique spécifique avant de rentrer dans ce processus. La figure 4.20 présente la proposition de processus pour l'application du contrôle haptique.

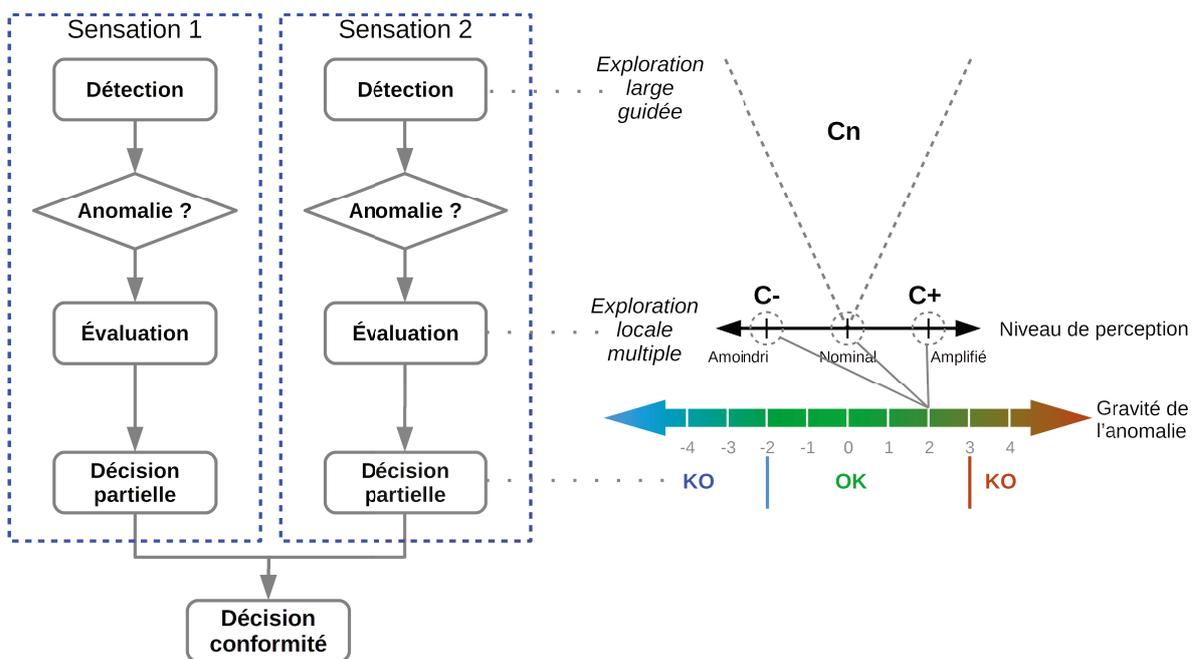


Figure 4.20 – Processus d'application du contrôle haptique

Les étapes de *détection*, *évaluation* et *décision* sont déroulées pour chaque sensation élémentaire d'intérêt pour le contrôle. L'étape de *détection* sert principalement à accélérer l'application du contrôle. En effet, elle fait uniquement intervenir la condition Cn avec, suivant la taille de la surface à contrôler, une exploration large jusqu'à la détection d'une anomalie. L'étape d'*évaluation* permet de préciser la gravité de l'anomalie détectée en effectuant une exploration locale multiple (avec les conditions C- et C+). Au final, une décision partielle de la conformité liée à chaque sensation peut être déduite grâce aux

tolérances définies. La décision de conformité globale d'un produit ou d'un échantillon combine ainsi l'ensemble des décisions partielles pour toutes les anomalies détectées et pour toutes les sensations considérées. Si une décision partielle au moins fait état d'une anomalie non acceptée, le produit est considéré comme refusé.

4.5.2 Synthèse des protocoles de contrôle

La figure 4.21 rassemble de manière synthétique les informations permettant l'application du contrôle de la sensation relief pour le cas d'étude du bracelet de montre.

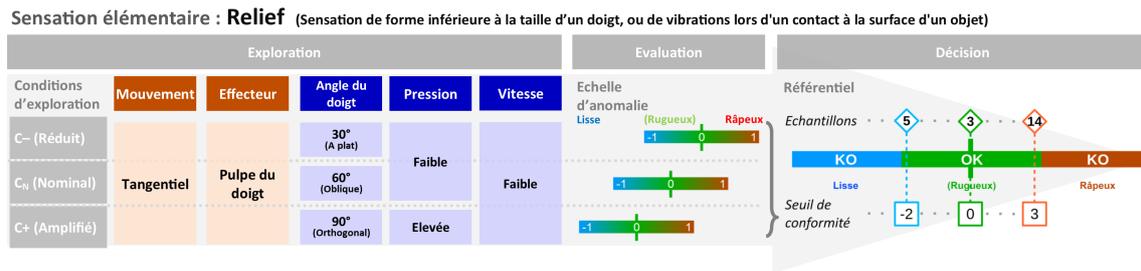


Figure 4.21 – Synthèse du protocole de contrôle et des tolérances pour la sensation de relief pour le cas d'étude

La figure 4.6 présente une règle pour simplifier le calcul de la gravité d'anomalie et la décision de conformité pour cette sensation. Elle se base sur les valeurs d'évaluation données pour chaque condition d'exploration et a pour objectif une utilisation facilitée durant le contrôle.

Evaluation	Cn	-1						0						1														
	C-	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1									
Décision	Gravité	-4	-2	erreur	-3	-1	erreur	erreur	erreur	erreur	-3	-1	erreur	-2	0	1	erreur	2	3	erreur	erreur	erreur	erreur	1	2	erreur	3	4

Tableau 4.6 – Règle utilisée pour simplifier le calcul de la gravité d'anomalie et la décision de conformité partielle associée (pour la sensation de relief)

4.5.3 Utilisation des protocoles

Une première prise en main de la méthode est nécessaire afin que les contrôleurs se familiarisent avec l'approche proposée pour le contrôle, le vocabulaire utilisé, les conditions d'exploration et surtout les niveaux de référence des tolérances définis précédemment. En effet, l'être humain étant plus performant en comparaison qu'en mesure absolue, il s'agira toujours lors du contrôle de comparer les sensations perçues à une référence, physique ou mentale (obtenue par apprentissage). Une phase de formation des opérateurs vise donc à utiliser la grille d'évaluation avec les échantillons de référence, afin de se rendre compte de leur positionnement sur l'échelle de gravité. Il s'agit alors de retrouver

la gravité correspondant aux échantillons de référence positionnés aux limites d'acceptabilité. Par exemple, pour l'échantillon 5, il faudrait retrouver la gravité -2 en appliquant les trois conditions d'exploration. Si besoin, il est également possible d'utiliser d'autres échantillons dont la gravité d'anomalie est connue (donnée par l'expert par exemple) pour compléter la formation.

L'utilisation des protocoles proposés lors de la mise en œuvre du contrôle s'effectue en suivant la partie droite de la figure 4.20. Il s'agit pour chaque sensation, d'explorer la surface avec la condition Cn afin de détecter une anomalie. Si une anomalie est détectée, l'opérateur indique -1, 0 ou 1 pour cette condition. Il s'agit de dire si, par rapport au niveau de référence de l'état cible (0), l'intensité de sensation est anormalement basse ou haute. L'opérateur passe alors à l'étape d'évaluation et inspecte localement la surface (à l'endroit de l'anomalie) en utilisant les deux autres conditions pour lesquelles il donne également une indication -1, 0 ou 1, en comparaison à l'état cible obtenu avec la condition Cn. Les résultats sont entrés dans la règle de la figure 4.6 qui donne la gravité de l'anomalie, et surtout le résultat de décision partielle en fonction des tolérances définies pour la sensation considérée.

Dans le cas où un industriel souhaiterait simplifier l'application du contrôle, il est possible de ne pas réaliser l'étape d'évaluation et donc de n'utiliser que la condition Cn pour détecter les anomalies en comparaison directe avec tous les échantillons de référence. Néanmoins, cette méthode simplifiée pourrait dégrader les performances du contrôle, en limitant la précision et la redondance apportée par les autres conditions d'exploration.

4.5.4 Test de variabilité et améliorations observées

Pour mesurer la performance de la méthode proposée nous effectuons à nouveau un test de variabilité $R^2&E^2$ (J.-L. Maire et al., 2013a). Les résultats sont ensuite comparés au test initial de variabilité afin de valider l'amélioration des performances.

Pour le cas d'étude, la méthode de contrôle proposée pour les sensations de relief et d'adhérence a été appliquée aux 32 échantillons par 3 participants⁴⁶. La figure 4.22 présente une synthèse des résultats de ce test de variabilité en termes d'amélioration par rapport aux résultats du test initial.



Figure 4.22 – Synthèse des résultats du test $R^2&E^2$ (J.-L. Maire et al., 2013a) final réalisé sur les 32 échantillons du cas d'étude

46. Trois personnes seulement ont participé au test de variabilité final au lieu des quatre personnes présentes au démarrage de l'étude, en raison de contraintes au niveau de l'entreprise au moment de la réalisation du test. Ceci ajoute une incertitude sur les résultats de comparaison des tests, de l'ordre de 6% environ, pas assez importante donc pour remettre en cause les améliorations observées.

Nous observons une nette amélioration des performances de contrôle. En particulier, pour ce qui est de la décision de conformité (accepter ou refuser un échantillon), même si la variabilité globale reste relativement élevée, la répétabilité a augmenté de 32% et la reproductibilité de 55% (en moyenne pour l'ensemble des participants). La détection des anomalies a été également nettement améliorée et atteint même un score de 91% de reproductibilité.

Par ailleurs, nous pouvons également noter une réduction du temps de contrôle. En effet, tandis que le test initial nécessitait une heure par participant pour contrôler les 32 échantillons, ce nouveau test a pu être effectué pour chaque participant en 30 minutes environ (soit 1 minute par échantillon au lieu de 2 précédemment). De plus, les participants étaient globalement moins fatigués que lors du test initial. Leurs commentaires sur le test ont indiqué que la séparation des sensations, le fait de guider dans la démarche et de n'avoir qu'à donner un résultat binaire en terme d'anomalie avait permis de réduire l'effort nécessaire au contrôle.

4.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une méthodologie rendant systématique la définition de spécifications de contrôle haptique grâce à l'exploitation des connaissances formalisées. Cette méthodologie guide les industriels au travers de trois étapes principales pour la description formelle des éléments sensoriels à contrôler, la construction de protocoles adaptés et la définition de tolérances. Les moyens (grille d'évaluation, échelle d'anomalie et référentiel physique) qui en découlent permettent la mise en œuvre du contrôle haptique. Leur application a de plus été expérimentée sur un cas d'étude concret. Une étape de validation de l'amélioration des performances de contrôle a notamment permis de confirmer l'intérêt et la pertinence des méthodes proposées. Par ailleurs, depuis l'application de ce standard de contrôle, aucun retour de clients n'a été constaté.

Bien que ce cas d'étude ait permis de tester et d'éprouver la démarche proposée dans un contexte industriel spécifique, une validation complète du caractère générique et modulaire des méthodes proposées nécessiterait une application à d'autres cas d'utilisation. Une construction de méthodes de contrôle pour d'autres sensations élémentaires permettrait en particulier d'atteindre une validation plus approfondie. La capacité du système à s'enrichir de l'expérience de l'application fait grandir l'intérêt de multiples applications. Les éléments de connaissances recueillis sur ce cas d'étude peuvent en effet être utilisés afin d'enrichir la base de connaissances, et cela dans le but d'augmenter la possibilité de contextualisation des informations et la génération automatique des contenus proposés. Les mots et les conditions d'exploration utilisés dans ce cas d'étude étant mis en relation avec le contexte de la joaillerie et des matériaux métalliques composant le bracelet, il s'agirait par exemple, pour un autre cas d'usage dans un contexte similaire, de suggérer automatiquement certains mots et certaines conditions d'exploration aux utilisateurs de la méthodologie. De plus, l'analyse de l'influence de l'exploration sur la perception a été réalisée pour chaque sensation élémentaire, mais elle est a priori dé-corrélée de la notion d'anomalie car celle-ci n'a été impliquée. Ceci la rend plus générale et permet de ne pas répéter l'opération d'analyse de l'influence de l'exploration pour chaque anomalie. Cela pourrait donc représenter un gain de temps en cas d'applications multiples. Ces résultats pourraient également être réutilisables pour un autre contrôle, dans la limite du contexte d'application considéré, ainsi que des sensations et des niveaux d'intensité considérés.

Dans le but de rendre cette méthodologie facilement applicable et accessible aux industriels souhaitant mettre en place un contrôle haptique, il est essentiel de proposer un outil intégrant l'ensemble des méthodes proposées. Celui-ci doit en particulier permettre un accès simplifié aux connaissances appropriées et intégrer aussi bien les calculs nécessaires pour la description formelle, que pour la définition des protocoles et des tolérances. Il doit également permettre une gestion du système d'enrichissement des connaissances présenté dans le chapitre précédent et qui prend tout son sens devant la quantité d'informations traitées dans l'application des trois étapes de la méthodologie proposée. Cet outil logiciel est présenté dans le chapitre suivant.

5

L'outil logiciel **INSENSO** pour aider à la mise en œuvre d'un contrôle haptique

Sommaire

5.1	Introduction	136
5.2	Architecture de l'outil	136
5.2.1	Structure de la plate-forme logicielle	136
5.2.2	Les modules de l'outil INSENSO	139
5.2.3	Diagrammes de classe	140
5.3	Développement des modules	142
5.3.1	Construction et gestion des connaissances	142
5.3.2	Définition du contexte d'application d'un projet de contrôle	145
5.3.3	Définition des spécifications	147
5.4	Conclusion	152

5.1 Introduction

Le développement d’un système informatique intégrant les méthodes proposées et s’appuyant sur une base de connaissances nous a semblé essentiel, dans le but d’aider un industriel à mettre en place une démarche de contrôle haptique. Cet outil logiciel est appelé **INSENSO** (*INEva SENSory Standardization based on Ontologies*) pour rappeler le souhait de standardiser le contrôle sensoriel à l’aide d’une représentation formelle des connaissances. Celui-ci a pu être développé au cours de ce projet de thèse au sein de la société INEVA, notamment grâce au moyens et aux ressources de l’équipe de développement logiciel.



Figure 5.1 – Logo de l’outil **INSENSO**

L’outil **INSENSO** a plusieurs objectifs concernant le contrôle haptique. Le premier est de permettre une mise en place systématique du contrôle en suivant la méthodologie proposée et en facilitant l’accès à une expertise stockée sous la forme d’une base de connaissances. Le deuxième objectif est de faire vivre cette expertise en permettant un enrichissement de la base de connaissances au fur et à mesure de l’utilisation de l’outil.

Dans ce chapitre, nous présentons cet outil à son stade actuel de prototype démonstrateur. Nous détaillons notamment son architecture et la manière dont ont été implémentés les différents modules présentés dans les chapitres précédents. Nous illustrons son utilisation avec le cas d’étude du bracelet de montre de luxe.

5.2 Architecture de l’outil

Cette section présente l’architecture du logiciel **INSENSO** selon différents points de vue. La structure de la plate-forme logicielle et des voies de communications sur lesquelles s’appuie l’outil est tout d’abord présentée. Nous détaillons ensuite l’organisation des différents modules de l’outil qui répondent aux fonctionnalités pour la gestion des connaissances et la définition des spécifications de contrôle. Une vue générale des diagrammes de classe est également présentée.

5.2.1 Structure de la plate-forme logicielle

Pour la conception de l’outil, nous avons rapidement fait le choix d’une plate-forme de type client-serveur. Ce type d’architecture, de plus en plus courante de nos jours, s’inscrit dans une volonté de proposer un système qui soit à la fois modulable et vivant :

- Modulable pour proposer des services adaptés aux besoins des industriels et également faciliter d’éventuelles mises à jour logicielles,
- Vivant pour permettre un enrichissement continu des connaissances et une gestion de leur évolution.

Ce choix a également été motivé par certaines solutions techniques de développement détaillées ci-dessous, associées notamment à l'utilisation d'ontologies pour l'accès et la sauvegarde des connaissances. La figure 5.2 présente une vue schématique de l'architecture.

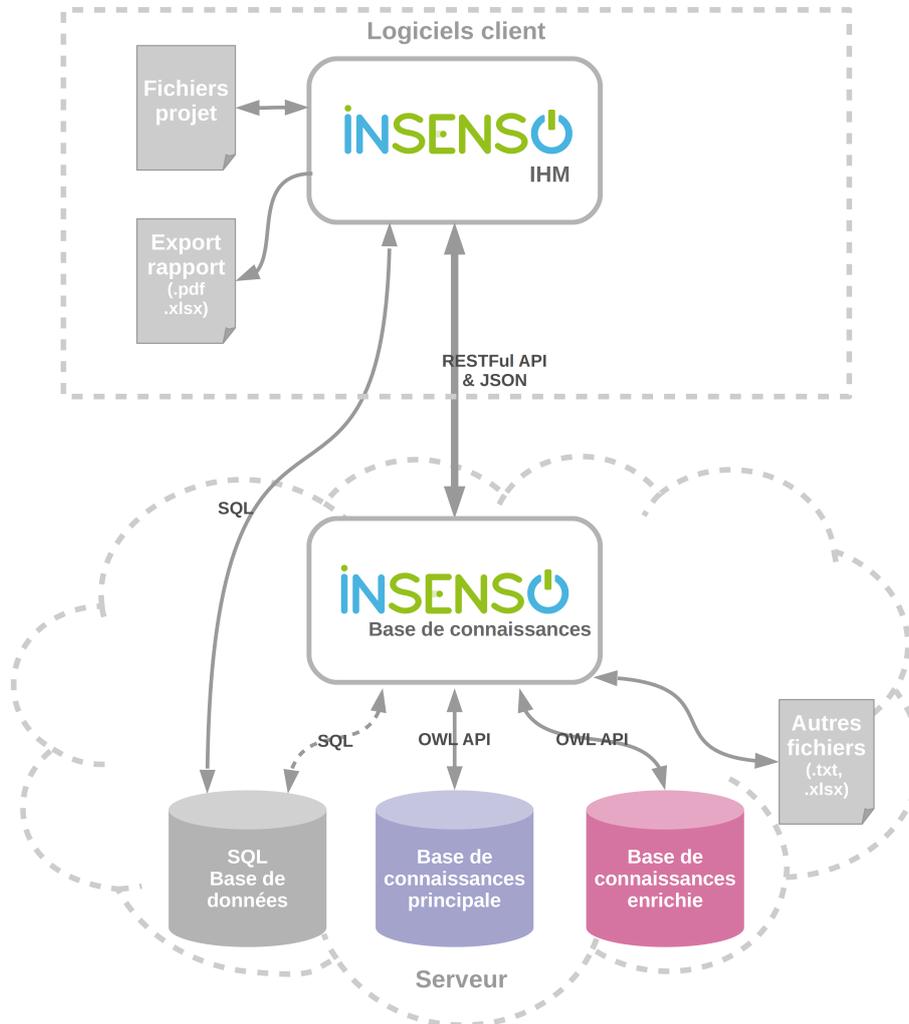


Figure 5.2 – Architecture de l'outil logiciel *INSENSO*

La solution construite se compose de deux parties principales nommées *IHM* (pour Interface Homme-Machine) et *Base de connaissances*. Comme son nom l'indique, la première sert essentiellement d'interface avec l'utilisateur. Il s'agit de la partie *client* du système qui fait principalement office de passerelle « améliorée » entre l'utilisateur et la base de connaissances. Développée au sein du cadre de développement *.NET* (inclus dans l'environnement de développement *VisualStudio* de Microsoft⁴⁷), cette interface rend en effet possible l'interaction avec les différents modules proposés, et sa conception sous forme de logiciel exécutable permet également la gestion en local de certains éléments. Cette partie *client* peut être multiple en considérant plusieurs utilisateurs.

47. Développement *.NET* : <https://visualstudio.microsoft.com/fr/vs/features/net-development/>.

La seconde partie de l'outil, localisée sur un serveur, a pour objectifs principaux de gérer les connaissances et d'en fournir un accès. Cette partie permet donc de traiter les requêtes (plus ou moins complexes) effectuées par la ou les parties *client* et de retourner les informations nécessaires à partir de raisonnements effectués sur la base de connaissances ou à partir de calculs dédiés. Cette partie a été développée dans un environnement *java*⁴⁸ (en utilisant principalement l'environnement de développement *Eclipse*⁴⁹) en raison de certaines solutions de programmations existantes, notamment pour l'accès à l'ontologie et pour le déploiement du serveur. Concernant l'accès à l'ontologie, nous avons choisi d'utiliser l'*OWL API*⁵⁰ qui est une librairie sous une licence *Open Source*⁵¹ pour l'interaction avec les fichiers d'ontologies de format *OWL* (*OWL*, 2002) (ou *RDF* (*RDF*, 1999) également). Bien qu'il existe une version dans le langage *VB.NET*, la version en langage *java* est beaucoup plus complète et régulièrement maintenue.

Concernant le déploiement du serveur et la communication avec la partie *IHM* de l'outil, nous nous sommes tournés vers un protocole internet de type *REST*⁵² (*Representational State Transfer*) en raison de sa grande flexibilité d'utilisation, notamment au niveau de l'interopérabilité entre machines (ici clients et serveur), ainsi qu'aux niveaux du type de données transférées et de la facilité de mise en œuvre. Ce type de protocole utilise les requêtes *http* pour la communication. Un serveur de type *Apache Tomcat*⁵³ a été choisi pour le prototype logiciel développé. Pour améliorer encore la flexibilité dans le transfert des informations, le format *JSON*⁵⁴ (*JavaScript Object Notation*) a été utilisé, au niveau de la communication entre les deux parties du système, ainsi qu'à l'intérieur de chacune d'elles.

Par ailleurs, la partie *client* communique également avec une base de données *SQL*⁵⁵ pour faciliter le stockage des données ne relevant pas directement de la base de connaissances, mais de chaque projet de contrôle par exemple. Ces données peuvent par contre être utilisées pour abstraction dans le cadre de l'enrichissement de la base de connaissances.

48. Java : <https://www.java.com/fr/>.

49. Eclipse : <http://www.eclipse.org/>.

50. OWL API : <http://owlapi.sourceforge.net/>.

51. Open Source : <https://opensource.org/>.

52. Protocole REST : https://en.wikipedia.org/wiki/Representational_state_transfer.

53. Serveur Apache Tomcat : <http://tomcat.apache.org/>.

54. Format JSON : <http://www.json.org/>.

55. SQL : <https://en.m.wikipedia.org/wiki/SQL>.

5.2.2 Les modules de l’outil INSENSO

L’outil proposé est segmenté en différents modules qui correspondent aux méthodes proposées au cours de ce projet et décrites dans les chapitres précédents. La figure 5.3 montre l’ensemble des modules composant l’outil INSENSO et présente la vue d’accueil de l’interface du logiciel. Les modules sont regroupés suivant leur utilisation pour le contrôle et sont accessibles depuis le menu situé à gauche de l’interface.



Figure 5.3 – Vue d’accueil de l’interface d’INSENSO

Le groupe **Modélisation** rassemble les modules relevant de la formalisation des connaissances et du système de représentation et d’enrichissement détaillés dans les chapitres 2 et 3. Ce groupe est accessible de manière indépendante d’une problématique de contrôle spécifique car il permet une gestion de la base de connaissances et de son enrichissement. Il est destiné à des utilisateurs administrateurs souhaitant directement agir sur les connaissances et le modèle formalisé. Ces modules ont donc une portée plus générique, dans le but de créer une nouvelle base de connaissances ou d’en améliorer une existante.

Un groupe **Contexte** a été défini. Celui-ci regroupe la gestion des projets, des produits et des personnes. En effet, une gestion en projet de contrôle a été définie afin de délimiter le contexte de la mise en place du contrôle. Un projet de contrôle, géré dans le module appelé **Projet**, est ainsi défini pour une surface spécifique d’un produit donné. La définition des caractéristiques des produits et des surfaces le composant est réalisée dans le module appelé **Produit**. En particulier, un ou plusieurs domaines d’application et matériaux sont associés à chaque produit et surface.

Le groupe appelé **Spécifications** vise à déployer la méthode de mise en place d’un contrôle haptique détaillée dans le chapitre 4, dans le cadre d’un projet de contrôle spécifique. Chaque processus de mise en place donne lieu à la définition d’un ensemble de spécifications. Les différentes versions et évolutions de ces spécifications sont consignées dans le module **Spécifications**. Par ailleurs, les modules grisés concernant l’instrumentation du contrôle et le suivi du contrôle en temps réel sont en cours de développement.

5.2.3 Diagrammes de classe

Les programmes développés dans les langages *VB.NET* et *java* utilisent une programmation orientée objet. Deux structures de classes ont été développées. La première a pour but de permettre un échange générique des connaissances entre les parties du système. La deuxième a pour but de faciliter l'interaction au niveau de l'IHM pour chaque module outil. Ces deux structures sont détaillées ci-après.

Classes génériques pour l'échange de connaissances

La figure 5.4 présente une vue condensée des classes génériques utilisées pour faciliter la récupération et l'échange des connaissances au sein du système. Un diagramme plus complet est visible en annexe D.

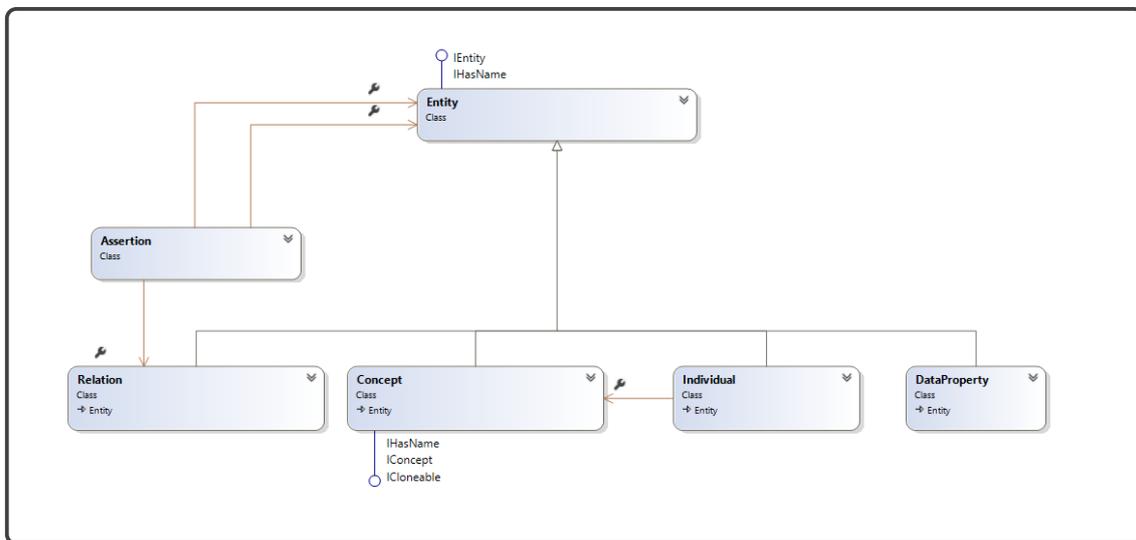


Figure 5.4 – Diagramme condensé des classes génériques développées pour échanger les connaissances

Cette structure est principalement déployée dans la partie *Base de connaissances* du système car elle permet une récupération générique des connaissances de l'ontologie. En réalité, il s'agit de pouvoir récupérer les éléments de l'ontologie (concepts, relations, individus, ...) existants ou inférés (c'est-à-dire déduits automatiquement par le raisonneur) dont le système a besoin. Tous ces éléments deviennent alors des objets de type *Entity*. De plus, des objets de type *Assertions* sont générés entre les objets *Entity* suivant les connaissances issues de l'ontologie et du raisonneur.

Cette méthode permet une grande flexibilité dans la gestion des connaissances car elle permet de les manipuler de manière générique. Par exemple, si l'on souhaite obtenir un ensemble d'informations disponibles sur certains descripteurs, il s'agira de récupérer dans l'ontologie les propriétés et relations instanciées (déjà dans la base) et inférées (déduite par raisonnement) pour les descripteurs considérés (associations aux sensations, niveaux d'intensité, contexte d'utilisation, etc.)

Bien que ces classes permettent une gestion générique, leur manipulation peut parfois s'avérer trop fastidieuse en fonction de la complexité des connaissances impliquées. Nous avons ainsi développé un mécanisme de transformation des connaissances génériques en

classes complexes dédiées à un besoin spécifique d'accès à certaines connaissances. La figure 5.5 présente ces *classes complexes*. Par exemple, les relations spécifiées pour un descripteur en particulier sont données sous forme de liste, facilitant ainsi leur utilisation.

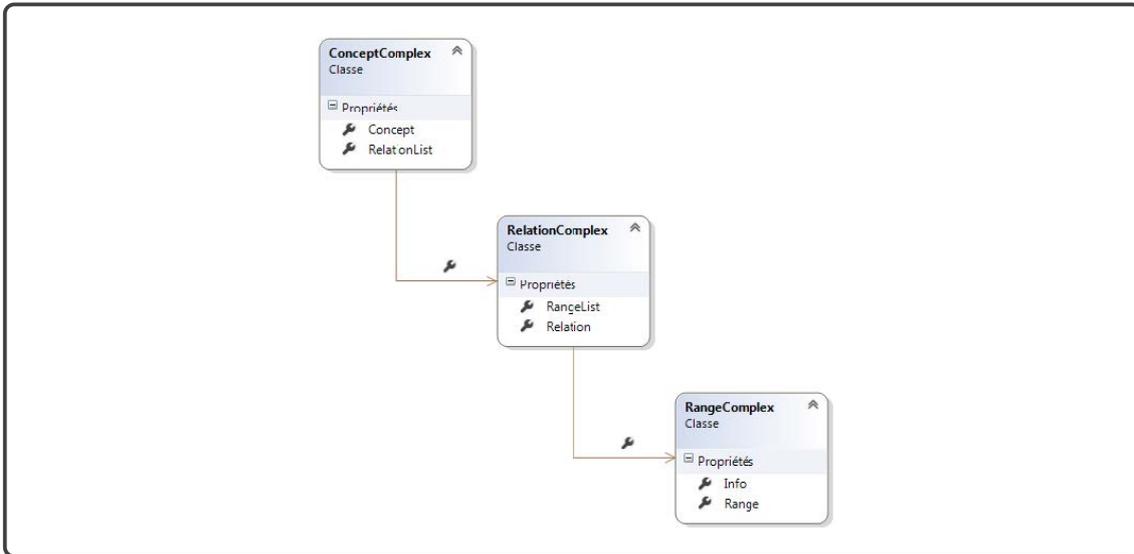


Figure 5.5 – Diagramme des classes « complexes » développées pour échanger les connaissances

Classes dédiées aux interactions

Les méthodes mises en place dans les modules étant spécifiques à certaines fonctionnalités, il est nécessaire d'adapter les objets utilisés. Nous avons donc développé des classes appropriées, en respectant néanmoins la structure haut niveau de l'ontologie. On retrouve par exemple les classes *Description*, *Descriptor*, *Sensation*, *Anomaly*, etc. La figure 5.6 présente un extrait du diagramme UML de ces classes. Une version plus complète est fournie en annexe D. Le diagramme intègre également le label des instances de chaque objet.

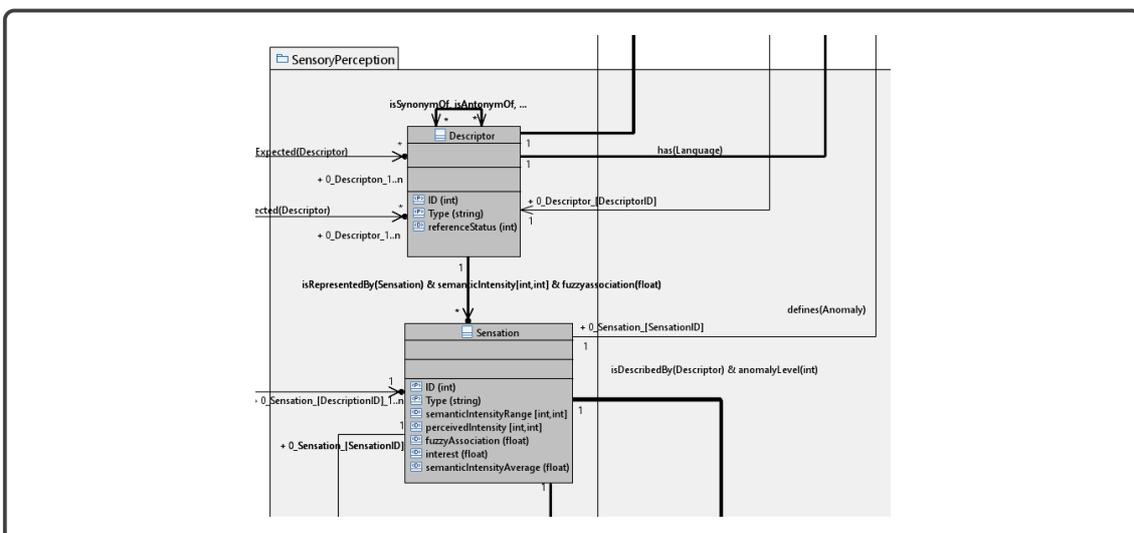


Figure 5.6 – Extrait du diagramme UML des classes dédiées aux modules

5.3 Développement des modules

Les modules de l'outil ont pour objectif d'intégrer les méthodes proposées au cours de ce projet de recherche et de faciliter leur accès par les industriels, en ce qui concerne la mise en place du contrôle haptique, ainsi que la gestion de l'expertise emmagasinée dans la base de connaissances. Pour plus de polyvalence, l'interface a été développée en français et en anglais. Cette section présente ces modules du point de vue de l'outil. Certains diagrammes de cas d'utilisation et de séquences sont fournis afin d'illustrer nos propos et afin de détailler l'implémentation de certaines fonctionnalités clés du logiciel. Ces diagrammes suivent le formalisme UML⁵⁶.

5.3.1 Construction et gestion des connaissances

Nous avons vu dans le chapitre 2 le processus proposé pour la formalisation des connaissances nécessaires au contrôle sensoriel haptique (voir figure 2.2). En particulier, celui-ci visait à catégoriser les sensations perçues et à structurer les connaissances autour de ces catégories. Les étapes de ce processus ont été intégrées dans le module **Formalisation**. La figure 5.7 présente un diagramme de cas d'utilisation pour ce module, incluant les actions et visualisations possibles pour un utilisateur administrateur du système.

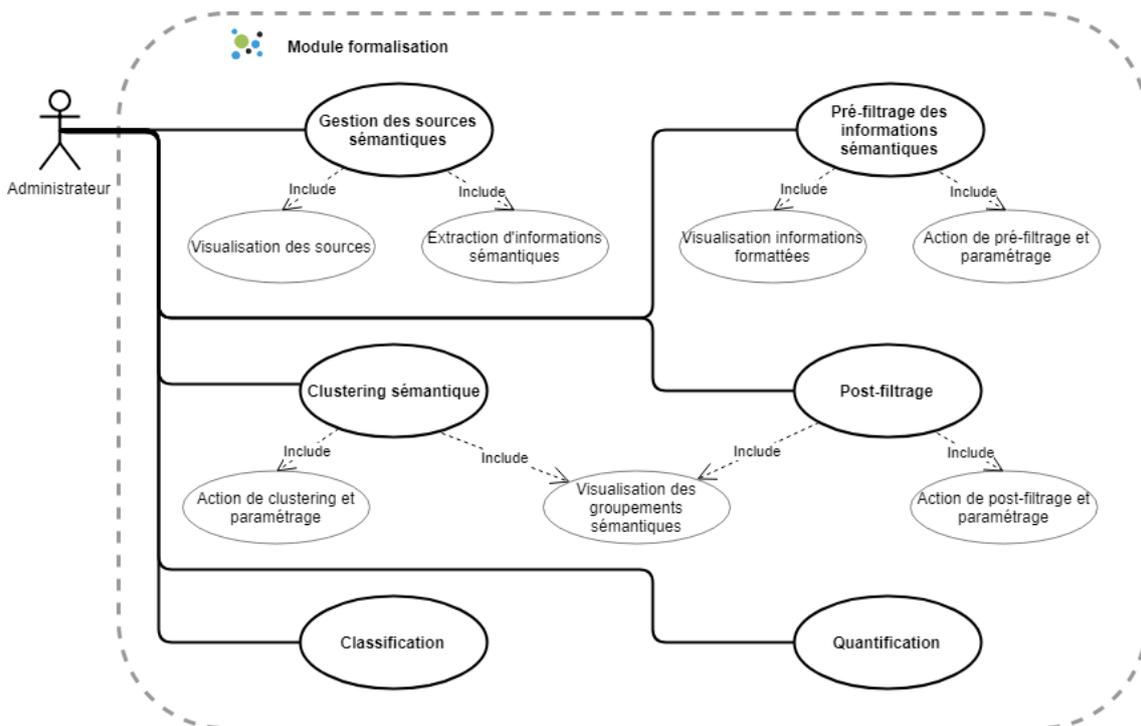


Figure 5.7 – Cas d'utilisation du module **Formalisation**

56. UML : <http://www.uml.org/>

Il s'agit au travers de ce module, de permettre à un utilisateur administrateur de construire ou d'améliorer semi-automatiquement un modèle de description à partir de sources sémantiques. Les différentes actions possibles visent également à donner un certain contrôle sur la modélisation des connaissances, pour ajuster si besoin le résultat obtenu. Dans le cadre de cette étude, l'utilisation de ce module s'est limitée à la construction du modèle exposé dans le chapitre 2. Ainsi, l'interface développée reste pour l'instant rudimentaire et utilisable par un utilisateur développeur. Néanmoins, il est envisagé de l'améliorer afin de faciliter son utilisation et ainsi permettre la génération de nouveaux modèles (ou de modèles améliorés). Nous envisageons ainsi le cas où un industriel souhaite construire un modèle à partir d'informations ou de documents lui appartenant.

Concernant les modules de **représentation** et d'**enrichissement** des connaissances, les figures 5.8 et 5.9 présentent respectivement leurs diagrammes de cas d'utilisation. Les actions disponibles pour un utilisateur administrateur du système y sont ainsi visibles. Elles permettent notamment de gérer directement les connaissances de la base de connaissances de manière intelligente (avec des fonctions automatisées telles que des requêtes de filtrage ou de contextualisation), ainsi que de nouvelles informations (obtenues par exemple au travers de l'application de la méthodologie de mise en place du contrôle). Les diagrammes de séquence des cas d'utilisation permettant l'interaction générique avec les bases de connaissances (BDC) globale et d'expérience sont donnés en annexe D.

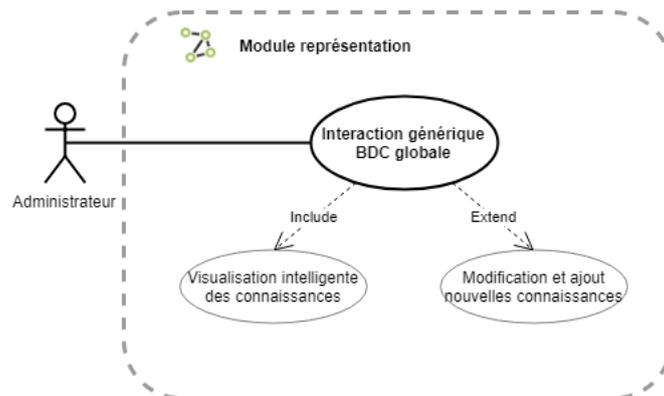


Figure 5.8 – Cas d'utilisation du module **Représentation**

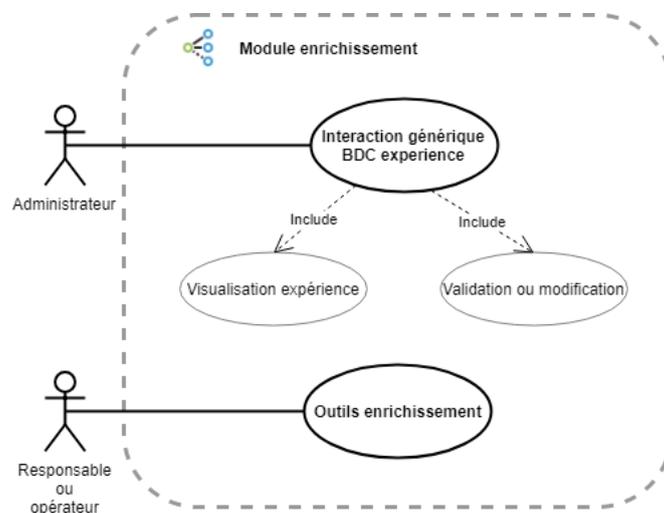


Figure 5.9 – Cas d'utilisation du module **Enrichissement**

Une interface générique a ainsi été conçue pour l'interaction avec la base de connaissances. Celle-ci utilise la structure générique de classes décrite précédemment. Un exemple de cette interface utilisateur est présenté en figure 5.10 pour le descripteur *Leathery*.

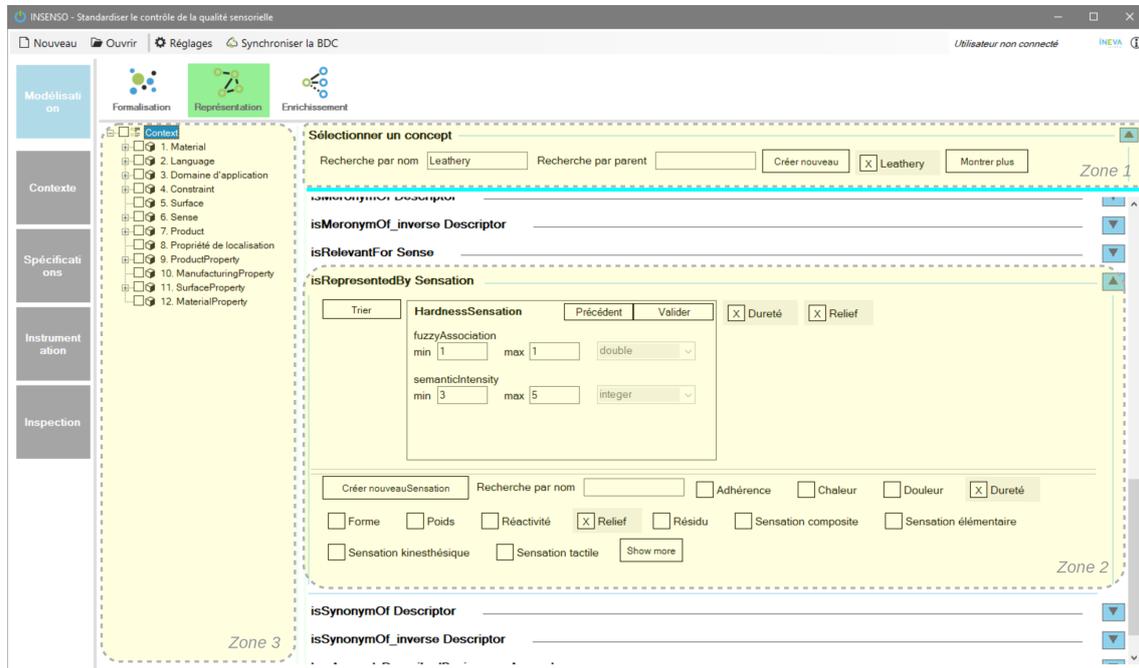


Figure 5.10 – Capture d'écran de l'interface développée pour interagir de manière générique avec la base de connaissance

La partie droite de cette interface regroupe l'ensemble des propriétés et relations d'intérêt, ayant été inférées grâce à l'ontologie, pour un concept sélectionné (en haut à droite dans la zone 1 de la figure). On peut par exemple observer les relations avec les sensations élémentaires, ainsi que les attributs de ces relations (valeurs d'intensité et coefficients de confiance) dans la zone 2 de la figure. Ces informations sont modifiables et des fonctions de validation apparaissent lorsqu'une valeur a été modifiée (manuellement ou automatiquement par expérience). De plus, la partie gauche de l'interface permet de contextualiser les informations présentées sur la partie de droite. Ainsi, si un ou plusieurs éléments de contexte (matériaux, domaine d'application, etc.) sont sélectionnés à gauche (zone 3 de la figure), seules les informations pertinentes pour ce contexte sont visibles à droite. De la même manière, si dans ce cas une information est ajoutée, celle-ci ne sera vraie que pour ce contexte. En l'absence de sélection sur la partie gauche, les informations présentes sur la partie de droite sont considérées vraies pour tout contexte.

5.3.2 Définition du contexte d'application d'un projet de contrôle

La gestion du contexte d'application d'un projet de contrôle est effectuée au travers de trois modules : **Projets**, **Produits** et **Utilisateurs**. Les figures 5.11 et 5.13 synthétisent respectivement les cas d'utilisation des modules **Projets** et **Produits**. Ces modules sont destinés à être utilisés par un responsable (ou expert). Le module **Projets** permet de visualiser rapidement les projets de contrôle déjà créés et d'en créer de nouveaux. Un exemple d'interface est visible en figure 5.14 pour le cas d'étude du bracelet de montre. Le module **Produits** permet la gestion des produits et des surfaces. Il s'agit de définir le contexte d'application du contrôle en sélectionnant les éléments proposés par la base de connaissances (domaine d'application, matériaux, contraintes de contrôle, etc.) ou d'en ajouter de nouveaux. La figure 5.12 présente un exemple d'interface de ce module pour le cas d'étude. Le module **Utilisateurs** gérant les comptes utilisateurs et les catégories d'utilisateur (administrateur, responsable ou opérateur) n'est pas détaillé ici.

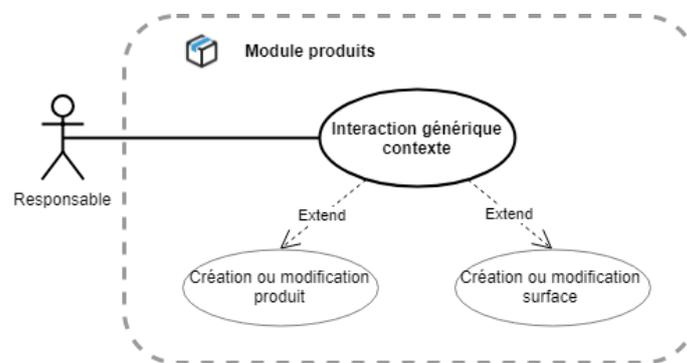


Figure 5.11 – Cas d'utilisation du module **Produits**

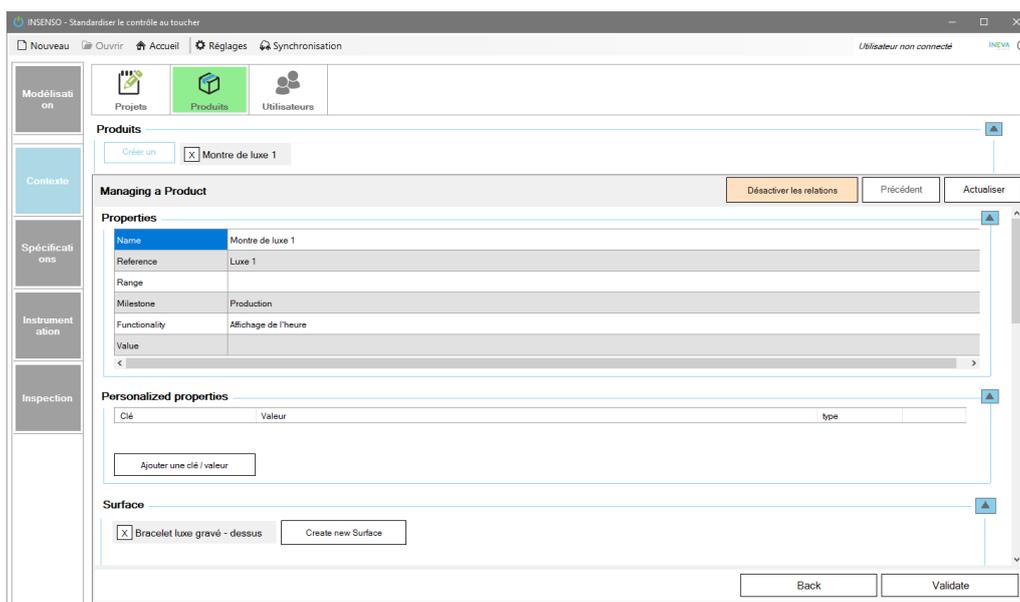


Figure 5.12 – Capture d'écran de l'interface du module **Produits**

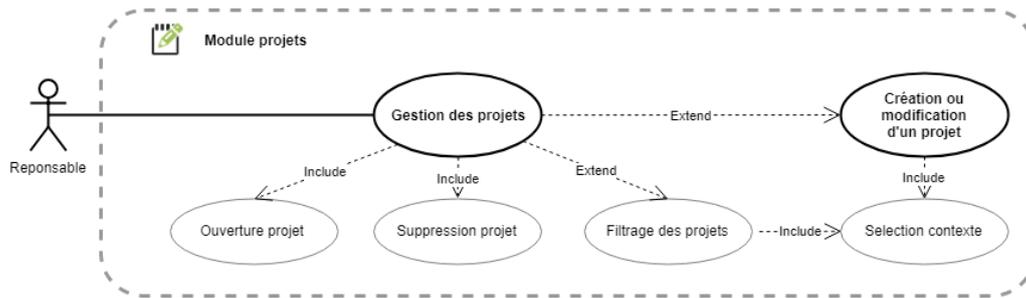


Figure 5.13 – Cas d'utilisation du module **Projets**

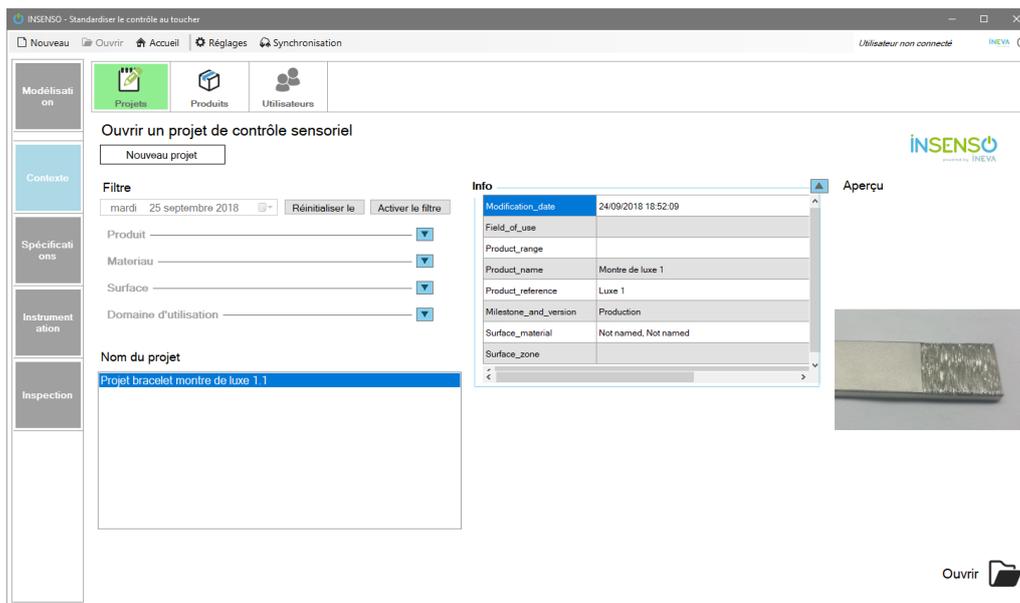


Figure 5.14 – Capture d'écran de l'interface du module **Projets**

5.3.3 Définition des spécifications

Comme nous l'avons détaillé dans le chapitre 4, la méthodologie que nous proposons pour la définition de spécifications et la mise en place d'un contrôle haptique se décompose en trois étapes principales, ainsi que de deux phases d'analyse initiale et de validation finale, en amont et en aval. Nous prenons l'exemple du bracelet de montre pour illustrer le rendu des interfaces de cette partie du logiciel. L'ensemble des captures d'écran est disponible en annexe D et quelques-unes d'entre elles sont expliquées plus en détail ci-après.

Module analyse initiale

L'interface logicielle de ce module comporte trois sous-parties pour la définition de la problématique générale de contrôle, la définition des échantillons utilisés pour la mise en place du contrôle, ainsi qu'un test R²&E² pour obtenir une « image » de la variabilité initiale. Un exemple de ces éléments est visible en annexe D : figures D.5, D.6 et D.7.

Module description

La figure 5.15 présente le diagramme de cas d'utilisation pour le module **Description**.

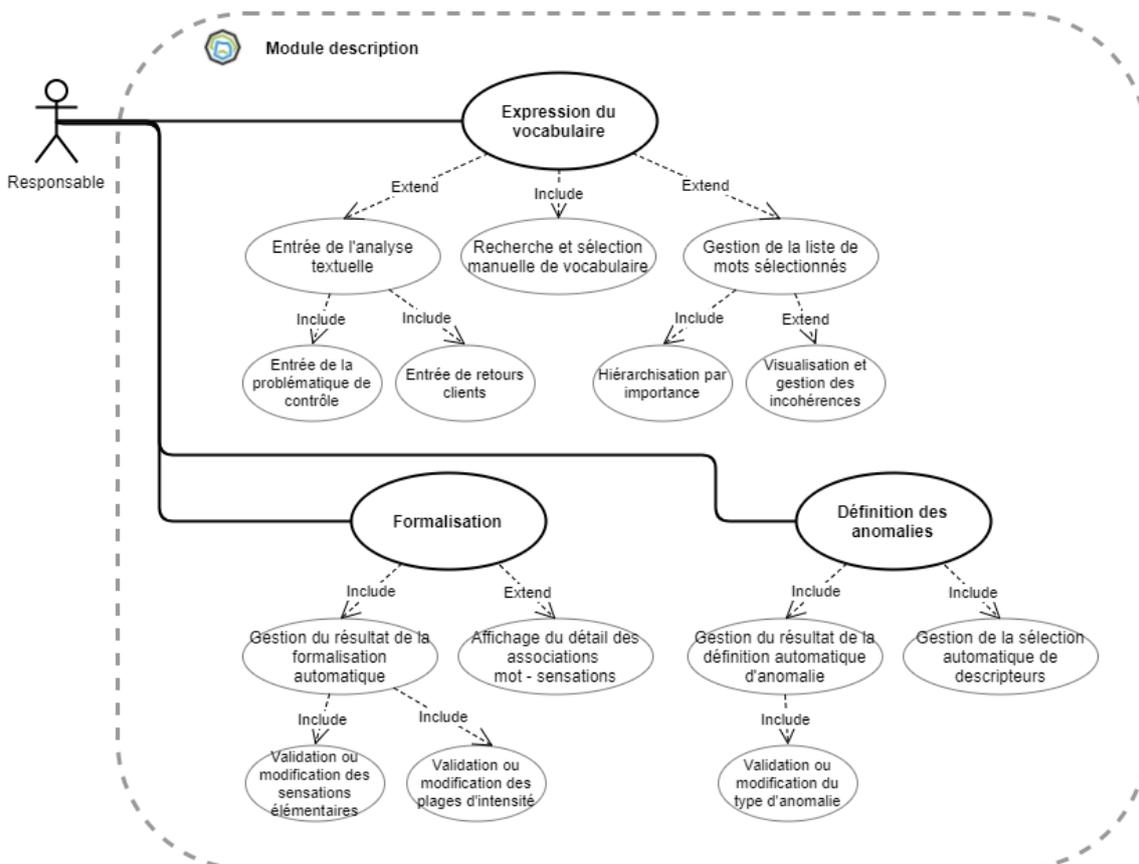


Figure 5.15 – Cas d'utilisation du module **Description**

Le vocabulaire fourni par l'utilisateur au travers du test de variabilité est analysé et entré dans la liste de mots décrivant les sensations souhaitées ou non souhaitées au contact de la surface considérée. Grâce à l'interface visible en figure 5.16, l'utilisateur peut ensuite compléter cette liste en sélectionnant les mots directement depuis la base, puis en réorganisant l'ordre d'importance des mots. L'outil peut suggérer des mots proches de ceux déjà sélectionnés et pouvant affiner la description. Il permet également l'ajout et la classification de nouveaux mots si ceux recherchés ne sont encore pas présents dans la base.

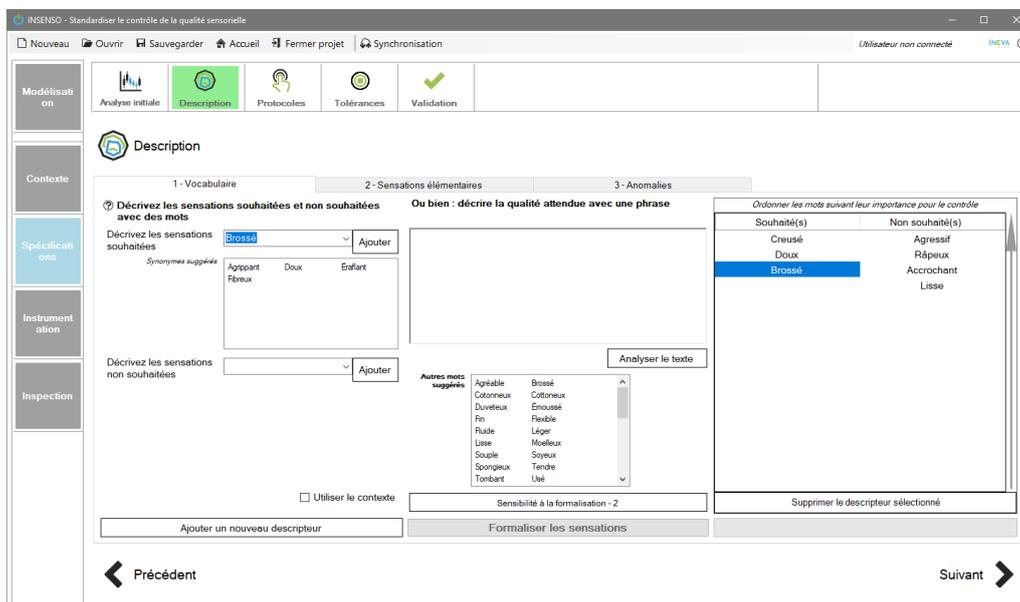


Figure 5.16 – Capture d'écran de l'interface : sélection du vocabulaire

L'action de formalisation de la description utilise les mots sélectionnés pour retourner une description formelle des sensations à contrôler. La figure 5.17 montre un exemple de résultat de formalisation. Les indicateurs de confiance et d'intérêt y sont également présents pour guider l'utilisateur dans le choix des sensations élémentaires à conserver. De plus, le détail de l'association entre les mots et les sensations est également accessible (voir la figure D.10 en annexe).

La dernière partie de ce module comprend la définition des anomalies qui découlent des sensations élémentaires et des niveaux d'intensité d'intérêt. L'interface visible en figure 5.18 permet donc la suggestion des anomalies à contrôler et des descripteurs de référence appropriés. L'utilisateur est alors en mesure de valider ces sélections et de confirmer les anomalies à contrôler.

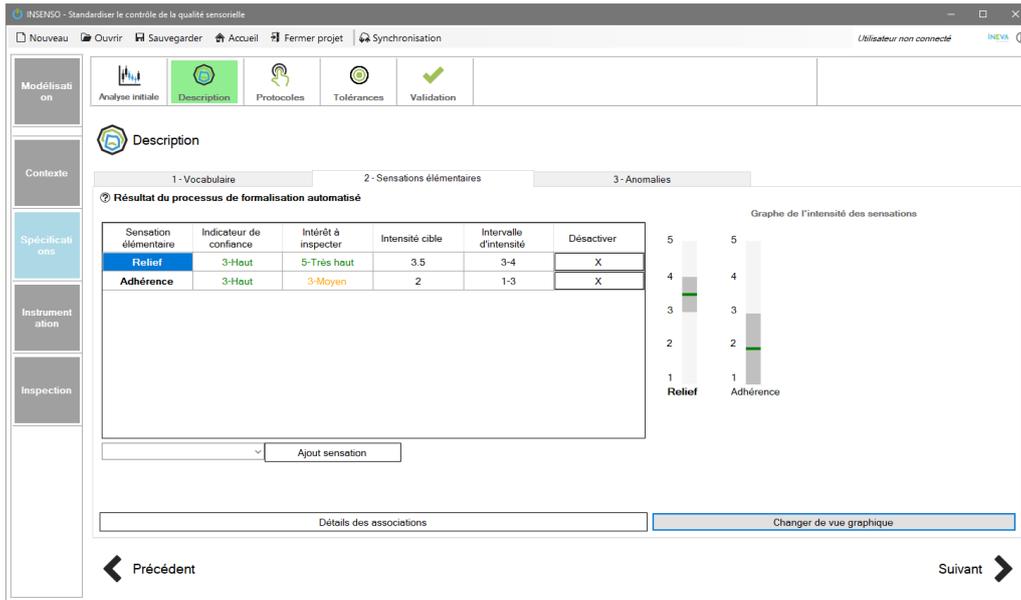


Figure 5.17 – Capture d’écran de l’interface : formalisation de la description

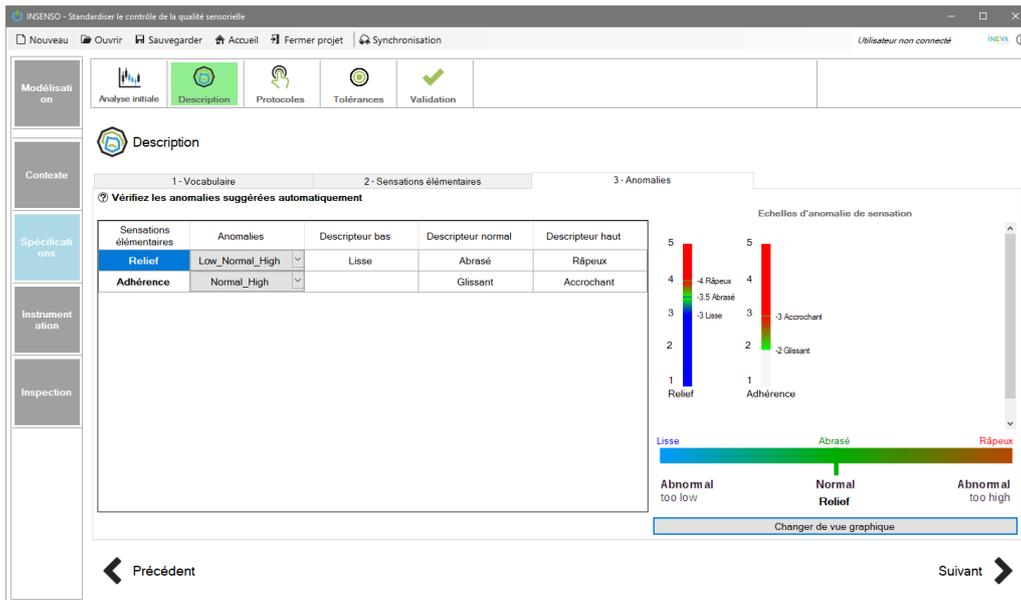


Figure 5.18 – Capture d’écran de l’interface : définition des anomalies

Module protocoles

La figure 5.19 montre les cas d'utilisation du module **Protocoles**.

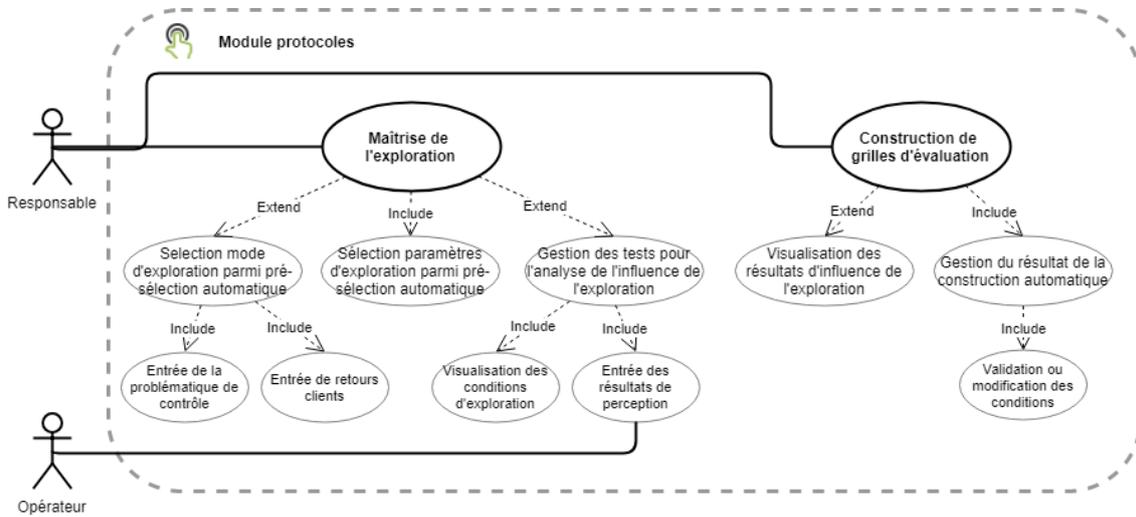


Figure 5.19 – Cas d'utilisation du module **Protocoles**

Les sensations élémentaires d'intérêt donnent lieu à la suggestion de modes d'exploration adaptés (figure D.13 en annexe), puis à l'analyse de l'influence des paramètres du mode d'exploration sur la perception (figure D.14 en annexe). Une grille d'évaluation est alors construite automatiquement (figure D.15 en annexe). L'utilisateur expert peut alors valider ou ajuster les grilles d'évaluation.

Module tolérances

La figure 5.20 présente le diagramme de cas d'utilisation du module **Tolérances**.

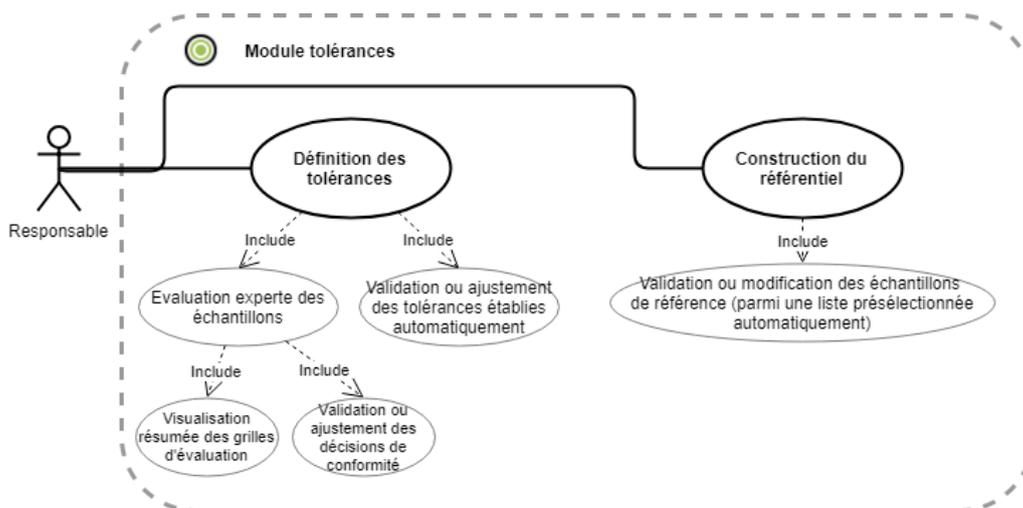


Figure 5.20 – Cas d'utilisation du module **Tolérances**

Après la mise en place des grilles d'évaluation, l'utilisateur expert peut les utiliser pour évaluer des échantillons en employant les conditions d'exploration définies (figure

D.16 en annexe). Ensuite, en comparant ces valeurs aux décisions de conformité des échantillons données par un expert (ou par plusieurs experts en consensus) lors du test initial, il est alors possible de calculer les limites de conformité sur l'échelle de gravité. Ces limites, appelées tolérances, sont affichées sur l'interface présentée en figure 5.21. Des échantillons de référence sont également proposés grâce à ces résultats.

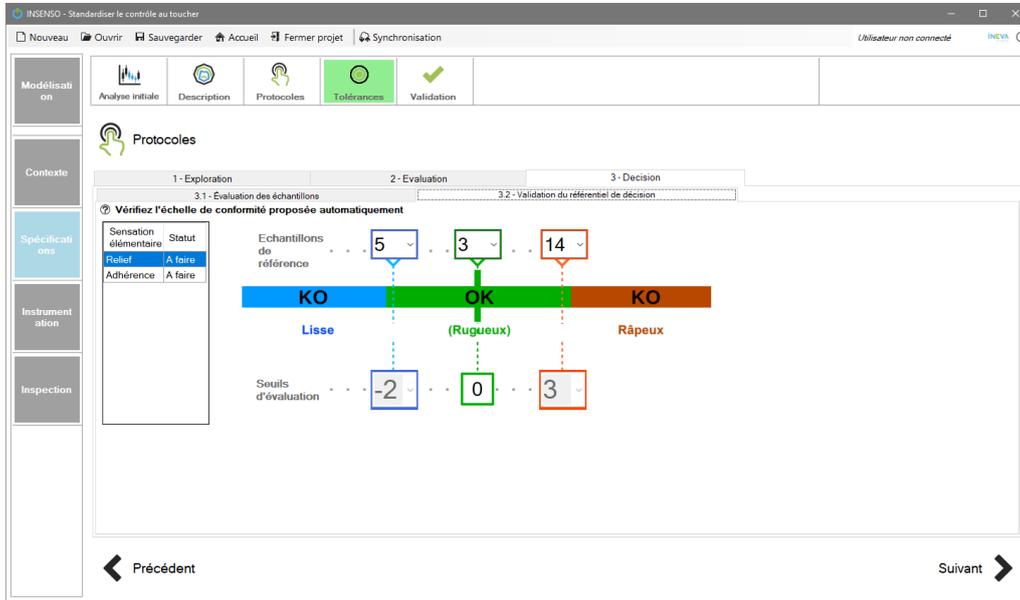


Figure 5.21 – Capture d'écran de l'interface : définition tolérances et référentiel de contrôle

Module validation

Ce module met en œuvre un second test $R^2&E^2$ permettant de vérifier les performances effectives du contrôle. Les résultats sont entrés dans l'interface de la figure 5.22 et un tableau comparatif de la variabilité avant / après est affiché.

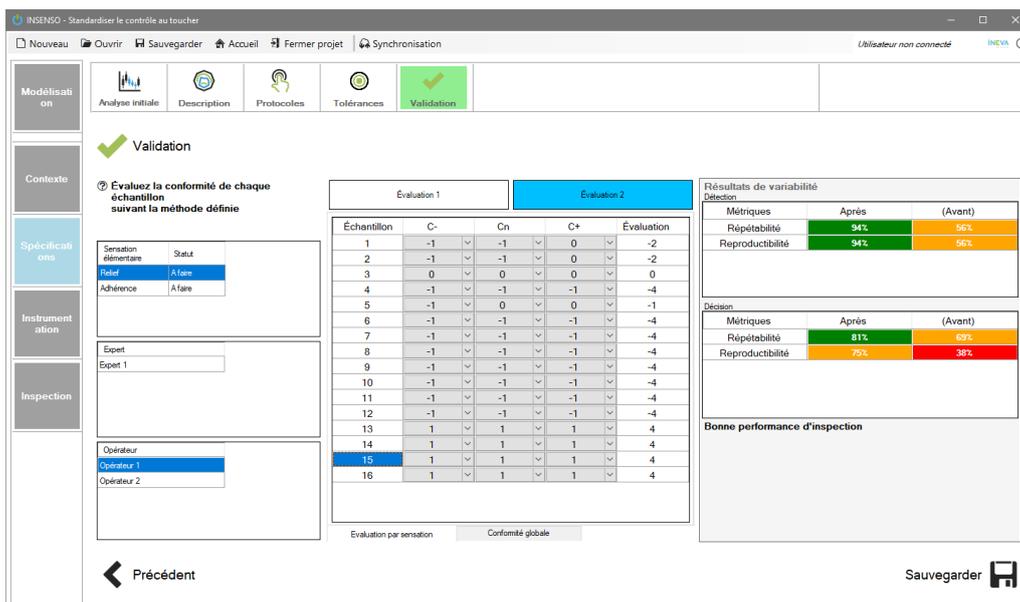


Figure 5.22 – Capture d'écran de l'interface : test de variabilité final, par sensation

5.4 Conclusion

Nous avons détaillé dans ce chapitre la conception et le développement de l'outil logiciel **INSENSO** qui intègre les méthodes proposées au cours de ce projet de recherche. L'architecture du logiciel a été introduite suivant les points de vue utilisateur, développeur et système. Les modules composant ce logiciel, ainsi que les interfaces s'y référant, ont ensuite été présentés.

Bien qu'il s'agisse à l'heure actuelle d'une version prototype, cet outil est aujourd'hui fonctionnel et a été testé sur plusieurs cas d'étude. Le cas d'étude du bracelet de montre ayant été réalisé en parallèle du développement, il n'a pas été possible d'appliquer les méthodes proposées en utilisant uniquement l'outil. Néanmoins, une utilisation a posteriori de l'outil nous a permis de trouver des résultats équivalents, et donc de vérifier son bon fonctionnement. Par la suite, la réalisation de tests d'utilisation en conditions réelles par des utilisateurs industriels (des responsables qualité par exemple) pourra par ailleurs être nécessaire. Cela permettra à la fois d'améliorer les interfaces utilisateur, les méthodes de l'outil et d'enrichir la base existante de connaissances.

Nous avons vu que la mise en place d'un contrôle sensoriel haptique avec les méthodes existantes peut être problématique, notamment en raison de durées importantes d'application. L'utilisation des méthodes proposées et du logiciel **INSENSO** permet de limiter cette durée et d'arriver plus rapidement à la définition de spécifications et de référentiels adaptés au contrôle. Sans recourir au logiciel, l'application des méthodes proposées sur le cas d'étude du bracelet de montre a nécessité cinq journées au total⁵⁷, dont un jour et demi impliquant tous les participants aux tests de variabilité. Le reste du temps a été dédié à des échanges pour la validation des choix avec les responsables qualité et la présentation des résultats. Bien que relativement faible, cette durée d'application de cinq jours avait été étalée sur dix demi-journées de juin 2016 à janvier 2017 en raison des disponibilités des participants et du temps nécessaire pour l'analyse des résultats ainsi que leur mise en forme (le logiciel étant en construction durant cette étude). Le logiciel **INSENSO** a en effet pour objectif d'accélérer et de simplifier ces étapes. Bien que l'application de certaines phases soit toujours dépendante des ressources disponibles dans l'entreprise, le fait de faciliter l'accès à l'expertise et d'automatiser certaines analyses permet de réduire le temps de mise en place. En effet, en simulant une utilisation du logiciel pour le cas d'étude (pour éviter de répéter l'étude), la durée de mise en place du contrôle a pu être réduite de moitié, passant à deux jours et demi.

57. Quelques jours supplémentaires ont également été nécessaires à l'entreprise pour fabriquer les échantillons.

Conclusion générale et perspectives

Sommaire

6.1	Synthèse générale	154
6.2	Quelques extensions possibles à nos travaux	156
6.2.1	Extensions possibles pour la méthode de formalisation	156
6.2.2	Extensions possibles pour la méthodologie de contrôle	159
6.3	Extensions possibles pour l'instrumentation du contrôle de la qualité haptique	161
6.3.1	Quelques capteurs et appareils pour la mesure des sensations élémentaires	162
6.3.2	Essai d'instrumentation sans contact pour le cas d'étude PIAGET	163
6.4	Perspectives : de nouvelles opportunités dans le domaine de la qualité sensorielle	167
6.4.1	Résultats complémentaires dérivés de l'application de la méthodologie	167
6.4.2	Ouvertures à d'autres domaines	168

6.1 Synthèse générale

Nous avons vu que la perception haptique humaine pose certaines difficultés lorsqu'elle est utilisée dans le contexte d'un contrôle des produits. La complexité des phénomènes physiques et psychologiques, ainsi que l'expertise requise pour ce type de contrôle, rendent en effet parfois difficile la mise en oeuvre d'un contrôle haptique dans l'industrie. Au démarrage de nos travaux, avec l'ensemble des partenaires (la société **INEVA**, et les laboratoires **SYMME** et **ICube**), nous nous étions ainsi posés la question suivante : « Comment maîtriser le contrôle haptique d'un produit ? »

Les résultats de nos travaux ont montré qu'il est effectivement possible de guider les industriels vers une meilleure maîtrise de la qualité haptique de leurs produits, et cela en mettant à leur disposition des solutions pour gérer l'expertise associée au contrôle. Ce projet a abouti à la réalisation de quatre contributions principales :

1. Nous avons tout d'abord mis en évidence la possibilité de formaliser les connaissances du contrôle sensoriel haptique, et cela d'une manière générique et systématique. Nos travaux ont ainsi abouti à la proposition d'un modèle de description des connaissances haptiques à partir d'une analyse sémantique approfondie de l'ensemble des mots relevant du sens du toucher. Nous avons en particulier identifié neuf groupes de mots, formant chacun une sensation haptique élémentaire, et représentant de manière isolée ou combinée l'ensemble des sensations qu'un contrôleur peut avoir au contact de la surface d'un objet. La création de ces groupes permet non seulement une classification de l'ensemble des mots du vocabulaire commun utilisé pour décrire les sensations haptiques, mais ils servent également d'axes d'intensité pour la quantification des sensations. Celles-ci forment l'élément central d'une perception haptique auquel peuvent être associées d'autres types de connaissances (mouvement d'exploration, effecteurs, récepteurs sensoriels, caractéristiques de l'instrumentation, etc.).
2. L'objectif d'organiser et de représenter au mieux ces connaissances, à la fois pour y accéder rapidement et pour être en situation de pouvoir raisonner sur ces connaissances, nous a amené à proposer une ontologie de domaine pour le contrôle de la qualité sensorielle. Appliquée au contrôle haptique, cette ontologie se base sur plusieurs modèles formels de représentation existants et éprouvés, lui apportant ainsi une architecture robuste. Un système d'enrichissement des connaissances a de plus été proposé afin de rendre évolutive la base de connaissances au fur et à mesure de son exploitation (application à des matériaux différents ou dans des contextes de contrôles variés).
3. Ensuite, une méthodologie a été proposée pour aider les industriels à mettre en oeuvre le contrôle haptique de leurs produits. Cette méthodologie se compose de trois étapes principales, appliquées dans le cadre d'une problématique spécifique de contrôle d'un produit. Grâce à l'exploitation des connaissances formalisées et stockées dans le modèle ontologique, il est ainsi possible de définir rapidement et simplement des spécifications précises et pertinentes, et ainsi de construire des protocoles de contrôle intégrant les limites de conformité. En particulier, le vocabulaire communément employé par un industriel est formalisé grâce au modèle de description et les sensations élémentaires les plus pertinentes pour le contrôle sont identi-

fiées et quantifiées. La définition d'anomalies haptiques génériques en découle. De plus, une approche basée sur la modélisation de l'influence de l'exploration a été proposée pour établir des grilles d'évaluation qui modulent la perception des anomalies haptiques. Cette méthodologie a été appliquée dans l'entreprise PIAGET. L'amélioration des performances du contrôle a été validée en comparant deux tests de variabilité R^2 & E^2 , réalisés respectivement avant et après son application. Une forte réduction de la variabilité de contrôle a ainsi pu être observée, ainsi qu'une amélioration globale de la communication entre les participants de l'étude sur les problèmes de conformité haptique des produits.

4. Enfin, un outil logiciel appelé **INSENSO** a été développé. Cet outil intègre les méthodes proposées tout au long de ce projet et donne la possibilité aux industriels de les mettre en application. Conçu suivant une architecture client-serveur, le logiciel implémente le système « intelligent » à base de connaissances qui fournit les informations appropriées selon le cas d'application rencontré et son contexte. Il rend également possible l'enrichissement de la base à partir des données de l'utilisation.

L'ensemble des éléments proposés s'inscrivent dans le contexte d'une demande des industriels de plus en plus forte sur des outils et méthodes dédiés au contrôle de la qualité haptique des produits. Nous leur proposons ainsi une approche cohérente, systématique et ciblée sur les problèmes de qualité rencontrés. Au travers de cette thèse, nous avons validé la pertinence et les performances de chaque contribution et illustré leur application sur un cas d'étude concret. Les résultats obtenus nous confortent dans l'intérêt des méthodes et outils proposés et nous invitent à ce stade à suggérer des extensions possibles à nos travaux. Celles-ci sont détaillées dans la section qui suit.

6.2 Quelques extensions possibles à nos travaux

Ces travaux de recherche s’inscrivant dans le cadre d’une thèse CIFRE au sein de l’entreprise **INEVA**, ils avaient pour objectif d’être rapidement applicables et utilisables par des industriels. Les premiers retours d’expériences sur l’utilisation de notre outil **INSENSO** nous amènent à envisager plusieurs améliorations et extensions possibles. Celles-ci concernent en particulier la formalisation des connaissances haptiques, la méthodologie de contrôle et l’instrumentation du contrôle. Nous détaillons ces extensions, envisagées ou en cours de réalisation (certaines ont déjà fait l’objet d’essais de faisabilité) avant de conclure sur l’ouverture possible de nos résultats vers d’autres domaines d’application.

6.2.1 Extensions possibles pour la méthode de formalisation

La méthode de formalisation proposée s’appuie sur un processus d’analyse sémantique et, plus précisément, sur des étapes de recherche de sources, de filtrage, de regroupement et de quantification des données sémantiques. L’ensemble de ces étapes ayant mené à un modèle de description des sensations haptiques, l’amélioration de chacune de ces étapes peut voir un effet bénéfique sur la pertinence des informations fournies pour un cas d’application donné.

Concernant les sources utilisées, nous nous sommes durant cette thèse limités aux sources trouvées dans la littérature (les articles et documents du domaine de la perception haptique), ainsi qu’à des dictionnaires classiques et structurés en ligne (tels que *Wordnet*⁵⁸ par exemple). Bien que celles-ci nous aient fourni de grandes quantités d’informations, elles pourraient être complétées par d’autres sources. L’utilisation de bases fournissant d’autres informations de relations sémantiques, telles que par exemple les bases formatées grâce à la méthode *Word2Vec* (Mikolov et al., 2013), permettrait d’obtenir plus directement des valeurs de distances sémantiques entre les mots. Cela pourrait ainsi potentiellement améliorer la pertinence et la précision du modèle. Certaines de ces bases ont en effet été développées en intégrant un très grand nombre de données sources (par exemple celles de Google⁵⁹), améliorant ainsi le caractère générique de la construction du modèle.

Les étapes de filtrage sont très importantes dans le processus développé car elles aident à cibler les informations relevant effectivement du domaine de la perception haptique. Le fait d’avoir au préalable analysé la littérature scientifique du domaine avant d’ouvrir sur d’autres sources plus générales a constitué une première pré-sélection. L’utilisation de coefficients flous d’association au sens du toucher a permis de nous assurer que nous ne nous écartions pas pour autant du domaine ciblé. Nous avons vu que plusieurs mots de la base faisaient tout de même référence à la modalité sensorielle de la vue. En effet, de nombreuses sensations haptiques sont perceptibles visuellement ou inversement, même s’il s’agit parfois uniquement d’un a priori visuel d’une sensation haptique. Un certain nombre de mots relèvent donc des deux modalités. Le regroupement sémantique nous a permis d’identifier et d’écarter les groupes qui ne relevaient que de la perception

58. WordNet : <https://wordnet.princeton.edu/>.

59. Projet Word2Vec de Google : <https://code.google.com/archive/p/word2vec/>

visuelle. Néanmoins, réaliser cette séparation plus tôt dans l'analyse aurait pu permettre de ne pas mélanger les modalités au moment du regroupement. Pour les mots français, le dictionnaire de Bassereau et Charvet-Pello (2011) donne certaines indications pour les mots qui y sont listés. Il serait peut-être également possible d'observer les distances sémantiques données par la base *Word2Vec* entre d'un côté les mots et, de l'autre côté, les sens du toucher et de la vue. À l'inverse, conserver ces mots dans l'analyse permet d'obtenir les composantes d'autres sens qui sont associées aux sensations haptiques identifiées (comme nous l'avons déjà partiellement observé pour les groupes 10 et 13 de la figure 2.7 du chapitre 2). Cela compléterait ainsi le modèle de description proposé et ouvrirait d'autres perspectives pour la modélisation des relations entre ces différentes modalités, ainsi que pour leur contrôle.

Concernant l'étape de clustering, le processus actuel d'analyse sémantique s'appuie principalement sur un algorithme de clustering appelé *Openord*. Bien que cette méthode soit très performante et permette de gérer une grande quantité de noeuds et de liens, d'autres méthodes de clustering pourraient être utilisées pour compléter les résultats. En considérant l'utilisation de graphes sémantiques, il serait intéressant d'étudier les méthodes de clustering basées sur les réseaux de Markov (Kindermann & Snell, 1980). En effet, le graphe sémantique dont nous disposons étant non dirigé (les relations sont valables dans les deux sens) et très probablement cyclique (des boucles de relations peuvent être trouvées), il rentre dans le cadre des hypothèses de champ aléatoire de Markov. En considérant plus largement le domaine scientifique du traitement automatique du langage, la méthode appelée *Latent Dirichlet Analysis (LDA)* (Blei, Ng, & Jordan, 2003) est en général utilisée pour analyser des documents et en déduire des thèmes par rapprochement sémantique. Dans notre cas, il serait possible, soit d'utiliser cette méthode directement sur les textes du corpus – mais il s'agirait alors d'identifier des thèmes dans les documents et le résultat ne serait pas générique – soit plutôt de l'appliquer directement à un corpus de mots rassemblés suivant leurs relations. Par exemple, pour un mot donné, tous les mots ayant une relation sémantique avec ce mot seraient rassemblés dans un fichier.

C'est cette deuxième voie que nous avons testée. La méthode *LDA* a été appliquée à un corpus composé d'un fichier pour chaque mot de la base (c'est-à-dire plus de 2.800 fichiers). Cela permet de rechercher l'association à des thèmes communs pour chaque mot. La figure 6.1 montre une comparaison de l'association des descripteurs *slippery* (glissant) et *cold* (froid) en utilisant la méthode actuelle et la méthode *LDA*.

On observe que les classifications sont très proches. En effet, les deux méthodes donnent les mêmes associations principales entre les mots et les sensations élémentaires. La méthode *LDA*, qui fournit ici des probabilités d'association de chaque mot aux catégories, semble apporter une information complémentaire concernant la possibilité d'association de *slippery* à la sensation *Warmth*. Le modèle actuel ne prend pas en compte l'association d'un mot à plusieurs catégories (par exemple, *slippery* est un descripteur de référence de la sensation *Grip* et n'est associé qu'à cette sensation). Néanmoins, la méthode *LDA* donne des probabilité d'association d'environ 0,4 à toutes les catégories ce qui indique la présence d'un « bruit » qui pourrait perturber le modèle d'association. De manière générale, il ressort deux éléments de cet essai :

- La méthode *LDA* pourrait possiblement améliorer le regroupement et préciser l'association de chaque mot aux différentes catégories de sensation. Il faut alors dans ce cas être très attentifs aux mots hors contexte pouvant être associés aux sensations de manière incorrecte.

- Cette méthode nécessite de connaître le nombre de catégories au préalable. Elle ne pourrait donc pas être utilisée pour trouver ou ajuster le nombre de catégories.



Figure 6.1 – Comparaison des associations obtenues avec le modèle actuel et grâce à la méthode LDA

Une autre amélioration possible du processus concerne la boucle d’optimisation entourant les étapes de pré-filtrage, clustering et de post-filtrage (visibles en figure 2.2 du chapitre 2). Le fait, par exemple, d’ajuster le pré-filtrage pour retenir plus ou moins de mots à traiter, ou le post-filtrage pour conserver plus ou moins de descripteurs de référence, constituent deux possibilités d’amélioration. Le modèle actuel est déjà issu d’ajustements itératifs de ce type (illustrés par les évolutions du graphe sémantique dans nos publications (Albert, Maire, et al., 2016; Albert, Zanni-Merk, et al., 2016)), mais l’utilisation d’algorithmes d’optimisation est une piste étudiée actuellement pour automatiser ces ajustements. Une autre manière d’effectuer cette boucle d’amélioration consiste à s’appuyer sur les informations obtenues lors de l’utilisation de ce modèle pour l’enrichir progressivement et le valider. Cette perspective, introduite au travers des chapitres 3 et 4, nécessite l’application du modèle de connaissances sur un nombre plus important de cas concrets (cela est possible avec le logiciel [INSENSO](#)).

Concernant la quantification des sensations, les retours obtenus suite à l’application de nos travaux nous ont amené à améliorer la modélisation de l’intensité d’une sensation. Les développements futurs se tourneront ainsi vers l’utilisation d’une fonction de Gauss (au lieu d’une fonction binaire) employant toutefois les mêmes coefficients γ et δ . Cela permet de mieux exprimer la notion de flou de positionnement sur l’échelle d’intensité de sensation, les principes de modélisation et de classification restant similaires.

Un autre point de développement de la méthode de formalisation concerne la gestion et l’interprétation d’adverbes parfois accolés aux mots exprimés pour décrire les sensations souhaitées ou non, au contact d’un produit. Par exemple, le souhait d’un rendu haptique *faiblement rugueux* indiquerait que l’on souhaite que la surface soit un peu rugueuse, sans l’être trop pour autant. Il s’agirait alors de réduire la valeur d’intensité de sensation en fonction des caractéristiques de l’adverbe *faiblement*.

Concernant le contexte géographique d'utilisation, il serait également intéressant de faire bénéficier la méthode d'une ouverture vers d'autres langues ou cultures, qui élargiraient le spectre d'application possible. Même si certains documents ont déjà des auteurs originaires de la culture asiatique, cela constituerait une validation supplémentaire.

6.2.2 Extensions possibles pour la méthodologie de contrôle

La méthodologie proposée vise à exploiter les connaissances formalisées pour mettre en place le contrôle au travers des trois étapes de description, construction de protocoles et définition de tolérances. Au final, l'utilisateur de l'outil **INSENSO** obtient des spécifications précises pour le produit à contrôler par toucher. Plusieurs pistes pour l'amélioration de ce processus de mise en place sont évoquées ci-après.

Concernant la sélection des mots dans l'étape de description, trois points d'amélioration possibles ont été identifiés. Le premier concerne l'interprétation de la subtilité de description qui pourrait être apportée par l'utilisation d'adverbes. Le second point d'amélioration réside dans l'utilisation d'une méthode d'analyse hiérarchique (par exemple la méthode *AHP* (Saaty, 2008)) pour obtenir une pondération plus juste des mots sélectionnés. Cela amènerait ainsi à mieux identifier les sensations d'intérêt pour le contrôle. Le troisième point concerne le développement d'un outil de visualisation plus abouti pour la sélection des mots (sous forme de graphe sémantique par exemple) qui donnerait la possibilité à l'utilisateur de fournir plus de détails dans la description.

Concernant les protocoles et les tolérances de contrôle proposés, quelques limites ont été observées, notamment lors de l'application sur le cas d'étude. Tout d'abord, avoir recours à des échantillons du produit considéré peut constituer un frein à l'application de la méthodologie. En effet, pour le cas d'étude sur le bracelet de montre, nous avons la chance de disposer d'échantillons dédiés à cette application grâce à leur fabrication par l'entreprise PIAGET. Le fait de ne pas en disposer pour d'autres cas d'application (ou de ne pas en avoir suffisamment) peut être gênant. Néanmoins, étant donné que notre méthode s'appuie au départ sur des informations sémantiques, il serait possible de détecter un nombre insuffisant d'échantillons représentant certaines anomalies. Par exemple, si pour les bracelets nous n'avions pas observé de variation de conformité pour certaines anomalies, il aurait pu s'agir soit d'une erreur dans la définition des anomalies, soit d'un manque d'échantillons. De plus, il serait possible de compenser un nombre réduit d'échantillon par un ajustement des tolérances au fur et à mesure de l'application du contrôle (lors d'une phase de test par exemple avec un contrôle approfondi des produits). Par contre, si l'utilisation d'échantillons s'avérait complètement impossible, il serait tout de même possible de s'appuyer sur l'expertise acquise par la base de connaissances dans le domaine concerné, pour proposer des protocoles et des tolérances automatiquement (en les ajustant au besoin par la suite).

L'exploration ayant une influence sur le niveau d'intensité perçue, les tolérances sont définies pour certaines conditions d'exploration spécifiques. Une modification de ces conditions d'exploration, et donc des protocoles de contrôle, pourrait donc amener à reconsidérer les tolérances définies. Le système de gestion de l'évolution des spécifications permet de suivre les modifications, mais pas d'y palier. L'intégration de nouvelles connaissances concernant l'influence de l'exploration sur la perception pourrait par contre apporter des précisions complémentaires. Par exemple, une analyse approfondie des caractéristiques des récepteurs sensoriels (et de leurs relations avec les différents paramètres

d'exploration identifiés) pourrait fournir des résultats d'influence plus précis. Une utilisation de ces éléments serait par exemple de guider les utilisateurs vers des grilles d'évaluation pré-remplies. D'autre part, l'amélioration de la modélisation de l'influence de l'exploration serait également bénéfique à la construction de ces grilles. Même si, pour le cas d'étude considéré, un modèle relativement simple suffisait, l'étude de l'utilisation d'autres types d'algorithmes de régression, non linéaire par exemple, pourrait sensiblement améliorer les performances de contrôle.

Par ailleurs, la méthode de contrôle proposée se limite actuellement à l'évaluation de l'intensité de sensation. La prise en compte d'autres paramètres comme, par exemple, la régularité⁶⁰ ou les lois de Gestalt⁶¹, pourrait contribuer à compléter la définition des anomalies haptiques. Une méthode de calcul de la gravité prenant en compte ces nouveaux éléments pourrait fournir des résultats d'évaluation plus fins et ainsi améliorer la précision de la mesure. De plus, pour l'instant, une approche simple est utilisée pour combiner les résultats des décisions partielles pour chaque sensation élémentaire. Il serait possible d'envisager des approches plus complexes qui impliqueraient par exemple le coefficient d'intérêt de chaque sensation, ou encore le nombre d'anomalies identifiées dans le calcul de la décision de conformité globale.

Une autre manière d'améliorer la pertinence des informations fournies au cours de l'utilisation de la méthodologie réside dans le fait d'emmagasiner de l'expérience et d'enrichir l'ontologie avec de nouvelles connaissances grâce à son application. Par exemple, les résultats du cas d'étude sur le bracelet de montre ont apporté de nouvelles connaissances en termes de l'utilisation de certains mots dans le domaine de la joaillerie, des cibles de qualité pour ce domaine, des conditions d'exploration et de leur influence, etc. Toutes ces informations, une fois intégrées à la base de connaissances et validées par le processus d'enrichissement, faciliteront les utilisations futures du logiciel. Dans le cas d'étude, l'application s'était focalisée sur deux sensations élémentaires uniquement. L'utilisation de cette méthodologie sur des cas d'étude impliquant d'autres sensations élémentaires permettrait d'élargir le retour d'expérience, ainsi que d'étoffer la validation du modèle de description.

Le système d'enrichissement proposé pose néanmoins la question de la confidentialité des informations et de la volonté des industriels de mettre en commun ces données d'utilisation (expérience) afin d'enrichir la base de connaissances globale. Bien que ce système prévoit un mécanisme d'abstraction qui ne permet pas de retracer l'identification de l'industriel en utilisant des informations de contexte de plus haut niveau, certains industriels pourraient, à juste titre, souhaiter conserver ces données et faire enrichir cette base de manière locale (ou limitée à leur société). Ceci est tout à fait possible dans le système proposé et il s'agirait alors de proposer une ontologie « globale » qui serait en fait dédiée à une société en particulier. Le reste du système de gestion fonctionnerait alors de la même manière, mais l'échange de nouvelles connaissances serait alors également limité.

60. La régularité, l'uniformité, etc. sont des éléments qui pourrait constituer une catégorie sémantique à part entière (voir le groupe sémantique 11 de la figure 2.10) et ainsi être utilisés pour caractériser les anomalies.

61. Voir les travaux de Baudet (2012) pour des détails sur l'application de ces lois dans le contrôle d'aspect

6.3 Extensions possibles pour l'instrumentation du contrôle de la qualité haptique

Outre la construction de méthodes pour le contrôle manuel des produits par des opérateurs, le développement de méthodes instrumentées est une piste considérable pour l'amélioration de la maîtrise de la qualité haptique des produits. Quelques rares solutions instrumentées ont été proposées dans la littérature pour tenter de répondre à un objectif de contrôle sensoriel. Il s'agit en général, par rapport au contrôle effectué manuellement par des opérateurs, d'améliorer la précision et la répétabilité des mesures, et d'automatiser tout ou partie du processus de contrôle. Pour certaines de ces solutions, la mesure instrumentée s'opère en contact avec la surface du produit tandis que pour d'autres, celle-ci peut s'effectuer sans contact physique.

Par exemple, au début des années 2000, un brevet a été déposé pour la conception d'un appareil de mesure de caractéristiques du toucher (Duchamp, Bassereau, Dubois, & Luong, 2002) mais à notre connaissance, cet appareil n'a pas été pour l'instant commercialisé. La solution plus récente proposée par Syntouch (SynTouch, 2017) est constituée d'un doigt **bio-fidèle** instrumenté en silicone capable de mesurer certaines caractéristiques physiques de l'état de surface d'un objet. Les mesures obtenues permettent ensuite à Syntouch d'établir un parallèle avec certaines sensations tactiles. Si cette solution est intéressante pour la caractérisation d'une sensation tactile, le temps d'acquisition des mesures et la nécessité de mettre ce capteur en contact avec les surfaces peuvent constituer un frein à son utilisation dans un contexte industriel de contrôle en production. En effet, les solutions avec contact ne sont pas utilisables dans tous les cas d'application, en particulier lorsque ce contact peut dégrader la qualité du produit. Dans ce cas, les systèmes de mesure sans contact s'avèrent plus intéressants.

Néanmoins ces solutions sont peu nombreuses pour le contrôle haptique. Une des rares études menées dans ce sens est celle proposée par H. Zhang, Dana, et Nishino (2016) qui vise à mesurer les coefficients de friction de matériaux grâce à des données de **réflectance** optique. Ce type d'instrumentation n'a par contre pas été testé dans le cadre d'un contrôle industriel. En revanche, certaines solutions destinées au contrôle esthétique des produits pourraient être appliquées au contrôle haptique. C'est le cas par exemple de la solution développée au laboratoire SYMME (Désage et al., 2014 ; Pitard, 2016) qui contrôle l'aspect de la surface d'un objet à l'aide d'un système composé d'une caméra et de plusieurs éclairages répartis sur un dôme. Il faudrait cependant s'assurer que ce système est capable de discerner visuellement certaines différences parfois très fines entre les sensations perçues au toucher.

De manière générale, les solutions instrumentées « prêtes à l'emploi » sont limitées. Il convient donc de commencer par définir correctement le contrôle manuel afin de disposer de spécifications et de protocoles fiables, avant de proposer des solutions de capteurs permettant de compléter les mesures ou d'automatiser le processus. Nous proposons d'ouvrir les pistes d'instrumentation du contrôle haptique en listant différents capteurs et solutions techniques qui pourraient apporter des mesures pertinentes des sensations élémentaires. De plus, afin d'approfondir la possibilité de mesure sans contact de certaines sensations haptiques, nous avons réalisé deux études pilotes. La première a été effectuée conjointement aux travaux de Thomas Lacombe, doctorant au laboratoire **SYMME**, dans le domaine de l'instrumentation optique de pièces plastiques. Cette étude, qui a fait l'objet d'une publication (Lacombe, Albert, et al., 2017), est décrite de manière résumée ci-après.

La deuxième étude réalisée a consisté à utiliser un rugosimètre optique pour la mesure des échantillons du cas d'étude PIAGET. Cette étude est également détaillée ci-après.

6.3.1 Quelques capteurs et appareils pour la mesure des sensations élémentaires

Le tableau E.1 (visible en annexe E) présente une liste non exhaustive de capteurs et d'appareils pouvant être utilisés pour une mesure instrumentée des sensations haptiques élémentaires. Ce tableau a été obtenu en cherchant parmi les mots donnés dans les fiches de caractéristiques de ces instruments (dont certains liens sont donnés en notes), ceux ne se trouvant pas dans notre base sémantique. La modélisation de ces mots étant connue, il nous a ensuite été possible de positionner ces instruments sur les sensations élémentaires. Par exemple, le capteur *rugosimètre* est positionné sur la sensation élémentaire de relief (case colorée en vert). Il pourrait donc répondre à un besoin de mesure de cette sensation, en raison du positionnement du mot *rugosité* dans notre modèle. Ces indications pourraient par exemple servir à orienter le choix d'instruments suivant les sensations à mesurer pour un contrôle haptique. Par ailleurs, ce tableau étant le résultat d'une analyse semi-automatisée, il faudrait bien sûr vérifier concrètement que ces instruments permettent effectivement de mesurer les sensations associées. Deux pistes d'instrumentation ont été examinées en ce sens.

Une première étude pilote a impliqué le système de mesure optique du laboratoire SYMME mentionné précédemment, ainsi que des échantillons de surface divers. Il s'agissait notamment de comparer les résultats obtenus avec l'oeil humain et avec un système optique pour la sensation d'adhérence. Cette étude a été menée en collaboration avec un autre projet de recherche du laboratoire SYMME visant à contrôler l'aspect de pièces plastiques. Les résultats, détaillés dans une publication (Lacombe, Albert, et al., 2017), ont notamment montré la supériorité du système instrumenté, pour cette sensation haptique, par rapport à la vue humaine. En effet, lorsqu'il s'agit d'évaluer la sensation d'adhérence en utilisant uniquement ses perceptions visuelles, nous avons montré que l'être humain peut être facilement trompé. La mesure optique effectuée, combinée à un système d'éclairage spécifique et un traitement des images dédié, a permis d'identifier un ensemble de paramètres ayant une corrélation forte avec la perception haptique d'adhérence. Il serait donc possible, grâce à ce système et en considérant les échantillons utilisés, d'instrumenter la mesure de la sensation d'adhérence sans contact avec les surfaces. Une seconde étude, décrite ci-dessous a permis de tirer des conclusions similaires, avec un autre système de mesure et les échantillons du cas d'étude sur les bracelets de montre.

6.3.2 Essai d'instrumentation sans contact pour le cas d'étude PIAGET

Nous avons pu, au cours de ce projet, grâce au matériel dont dispose le laboratoire SYMME, et en partenariat avec l'entreprise PIAGET, effectuer des mesures de topographie micrométrique de la surface des échantillons de bracelet de montre. L'appareil qui a été utilisé est un Altimet 520 de la société Altisurf⁶², qui utilise la technologie de mesure optique confocale à codage chromatique⁶³. Cet appareil fournit ainsi des mesures sans contact en trois dimensions de la surface observée. La figure 6.2 montre les échantillons pendant l'acquisition du cet appareil. Le point lumineux visible sur le premier échantillon constitue le point de mesure au moment de la prise de vue.

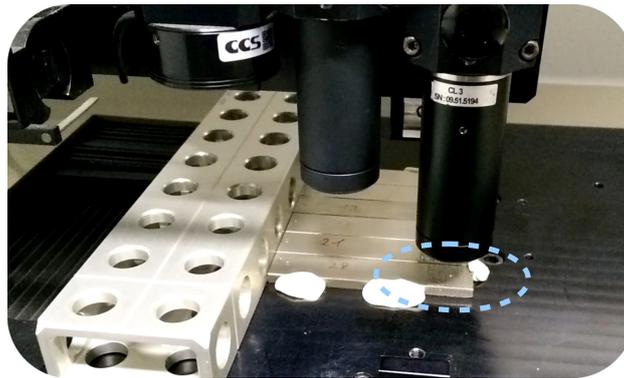


Figure 6.2 – Les échantillons de bracelet pendant la mesure sur l'appareil Altimet 520

Les images en trois dimensions obtenues rendent compte d'une zone carrée de 7 mm de côté à la surface de l'échantillon. Chaque point de mesure composant l'image est écarté de 10 μm suivant les axes latéraux (X et Y) et dispose d'une résolution de 33 nm suivant l'axe orthogonal à la surface (Z). Pour limiter le temps d'acquisition et de traitement dans le cadre de cette étude complémentaire, nous avons sélectionné six échantillons représentant les différents niveaux de conformité observés pour chaque sensation élémentaire d'intérêt (relief et adhérence). Le tableau 6.1 donne une synthèse de la conformité des échantillons et des valeurs d'évaluation pour chaque sensation (données par les experts PIAGET au travers de la méthodologie proposée).

Echantillons	Evaluation anomalie adhérence	Conformité adhérence	Evaluation anomalie relief	Conformité Relief	Conformité globale
3	0	0	0	0	0
5	0	0	-2	1	1
14	4	2	3	1	2
18	0	0	-4	2	2
21	0	0	0	0	0
28	1	1	-3	2	2

Tableau 6.1 – Conformité et valeurs d'évaluation de la gravité des anomalies pour les échantillons du cas d'étude

62. Altisurf, Altimet 520 : http://www.altimet.fr/?page_id=236&lang=en.

63. Dans un capteur optique utilisant le principe de mesure confocale chromatique, la lumière blanche est subdivisée en différents spectres grâce à des lentilles confocales (dont les points focaux coïncidents), ce qui permet une mesure de distance extrêmement précise.

La figure 6.3 montre des illustrations en trois dimensions des mesures obtenues grâce à l'appareil Altimet 520. La figure 6.4 montre le détail des niveaux de profondeur en μm de ces mesures.

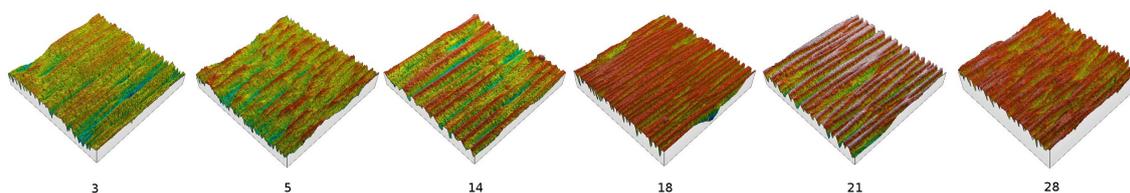


Figure 6.3 – Illustration de l'état de surface des échantillons de bracelet (en trois dimensions)

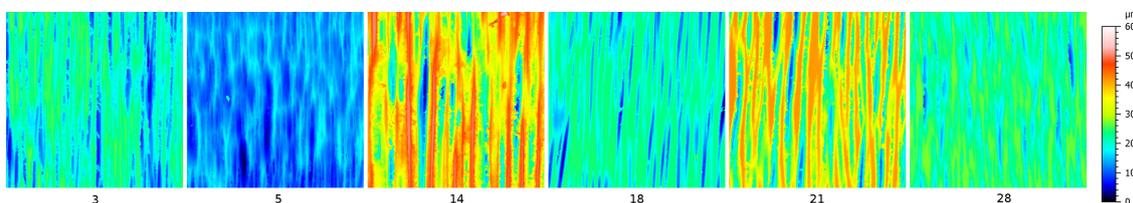


Figure 6.4 – Niveaux de profondeur en μm de l'état de surface des échantillons de bracelet

A l'œil, nous pouvons déjà observer de manière nette les différences de rendu des stries présentes sur la surface des échantillons. Il nous est même parfois possible d'imaginer, à partir de ces images, certaines perceptions haptiques pouvant être générées au contact de ces échantillons. Néanmoins, les méthodes d'analyse et de calcul existantes à partir de ce type de données peuvent aller bien plus loin. Par exemple, la figure 6.5 montre une visualisation fréquentielle de l'état de surface mesuré des échantillons, obtenue grâce l'application de la transformée de Fourier (FFT : *Fast Fourier Transform*).

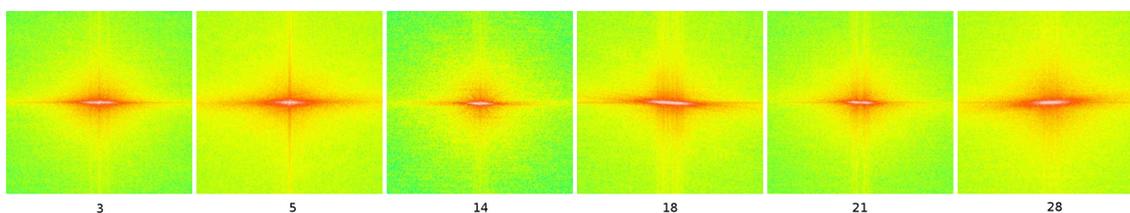
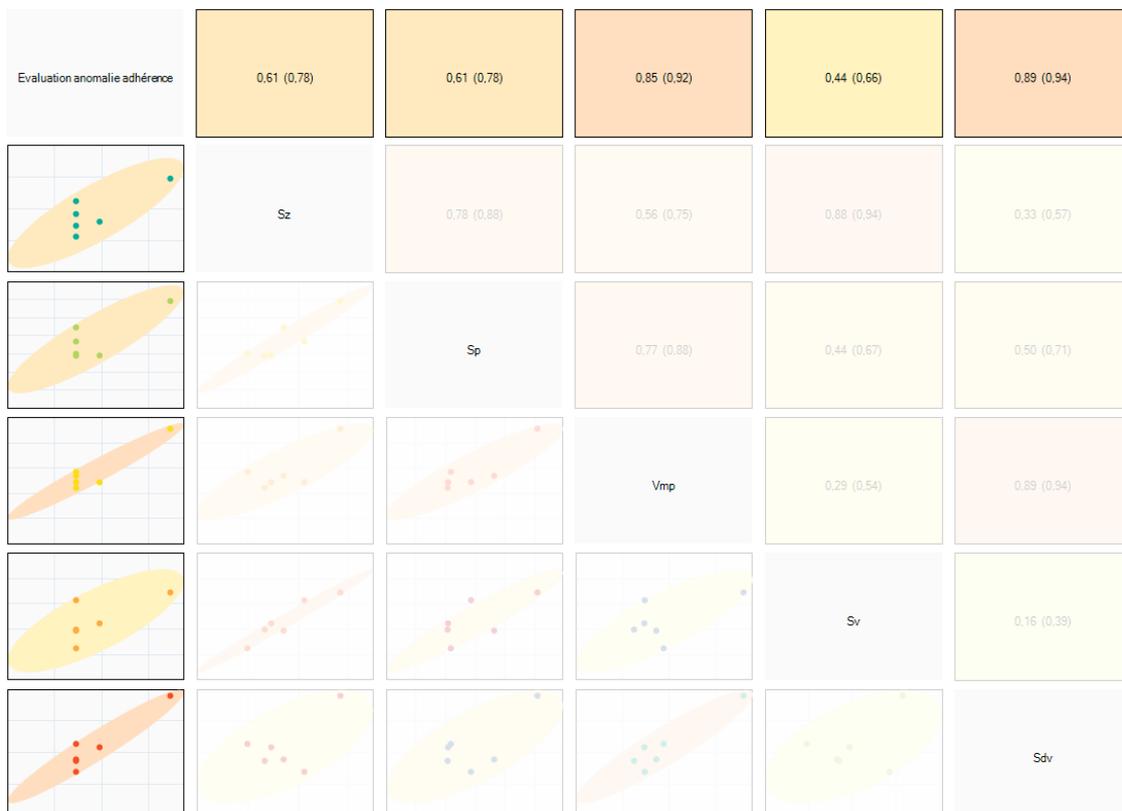


Figure 6.5 – Visualisation fréquentielle de l'état de surface grâce à une analyse FFT

Des différences dans la distribution fréquentielle de chaque image peuvent clairement être observées. En particulier, il est possible de noter, en comparant ces résultats aux valeurs de conformité, que les échantillons sans anomalie (3 et 21) ont une répartition fréquentielle assez proche et relativement étalée et uniforme. L'échantillon 5 s'en approche, mais les fréquences centrales ayant une amplitude plus élevée et une répartition plus étalée, on peut supposer que c'est ce qui indique que l'intensité de relief de l'échantillon est anormalement basse (qui tend vers le descripteur *lisse*). Les échantillons 18 et 28 ont tous

deux une signature fréquentielle ayant une amplitude centrale encore plus importante et une répartition encore plus étalée (et déviant même de l'axe horizontal) qui pourrait également indiquer le caractère *lisse* des échantillons. Pour ce qui est de l'échantillon 14, la répartition fréquentielle se resserre au centre, ce qui pourrait indiquer que l'intensité d'adhérence est anormalement haute (qui tend vers le descripteur *accrochant*).

Nous avons également extrait de ces images 3D les paramètres de rugosité donnés par la norme ISO 25178 (2016) grâce au logiciel *Mountains Map* de *DigitalSurf*⁶⁴. Certains de ces paramètres s'avèrent être fortement corrélés aux différentes valeurs données dans le tableau 6.1. Plus précisément, plusieurs paramètres sont fortement corrélés à la gravité des anomalies d'adhérence : il s'agit par exemple des paramètres Vmp (Volume matériel de crête), Sdv (Volume de vallée moyen), Sp (Hauteur de crête maximale) et Sz (Hauteur maximale). La matrice de corrélation du tableau 6.2 suivant donne plus de détails sur ces corrélations.



Les valeurs fournies sont les coefficients de détermination, soit le carré des coefficients de corrélation linéaires donnés entre parenthèses. Les ellipses illustrent ces valeurs, plus elles sont resserrées, plus la corrélation est forte.

Tableau 6.2 – Matrice de corrélation entre la gravité des anomalies d'adhérence et les paramètres de rugosité les plus fortement corrélés

Un certain nombre de paramètres de rugosité peuvent également être mis en relation avec l'évaluation des anomalies de relief, mais ces corrélations semblent logiques étant donné la nature de la sensation de relief.

En utilisant une régression linéaire, il est alors possible de modéliser le lien entre ces paramètres et la gravité des anomalies. Par exemple, une équation polynomiale simple

64. Logiciel Mountains Map de Digital Surf : <https://www.digitalsurf.com/>.

incluant les coefficients Sz , Vmp et Sdv permet de modéliser la gravité des anomalies d'adhérence. La figure 6.6 présente les effets des paramètres de rugosité du modèle. Notons que le coefficient de détermination ajusté de ce modèle est de 99,9%, mais ceci uniquement pour les six échantillons mesurés. Par ailleurs, d'autres méthodes de traitement de ces données pourraient fournir des paramètres supplémentaires, sans doute encore plus pertinents pour l'évaluation de ces anomalies (la réalisation d'une analyse modale, telle que celle utilisée dans l'étude de Pitard (2016), pourrait par exemple s'avérer intéressante).

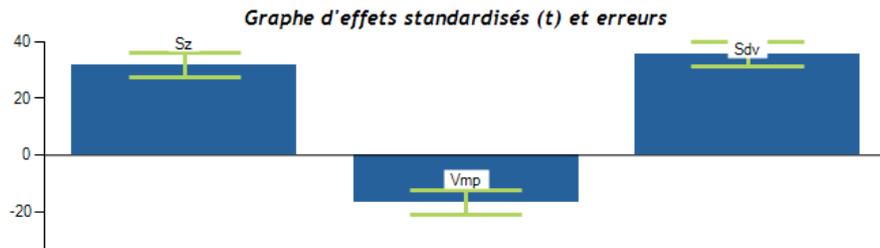


Figure 6.6 – Graphe des effets des paramètres de rugosité des bracelets sur la gravité des anomalies d'adhérence

Il serait donc possible, grâce à une mesure sans contact de ce type de déterminer la gravité perçue des anomalies d'adhérence et de relief. Toutefois, pour généraliser et valider ces résultats, des études complémentaires seraient nécessaires, incluant un nombre plus élevé d'échantillons. Ces informations viendront ainsi par la suite enrichir la base de connaissances en créant des liens entre les concepts de l'instrumentation, de la perception et des spécifications.

6.4 Perspectives : de nouvelles opportunités dans le domaine de la qualité sensorielle

Les méthodes proposées et les résultats obtenus au cours de ce projet de recherche ouvrent la voie vers de nouvelles opportunités dans le domaine de la qualité sensorielle. Tout d'abord, certains résultats complémentaires aux études menées font état de la possibilité de mettre en relation d'autres éléments de connaissances avec la description formelle proposée. Le fait par exemple de connaître l'impact des paramètres de fabrication d'un produit sur la qualité sensorielle peut avoir un intérêt pour maîtriser la qualité sensorielle durant la fabrication. C'est ce que nous avons constaté avec le cas d'étude du bracelet de montre. Nous détaillons quelques résultats ci-dessous.

Par ailleurs, notre approche de modélisation des connaissances s'étant avérée pertinente dans le cas du contrôle haptique des produits, il est possible d'imaginer son intérêt pour d'autres modalités sensorielles. La formalisation générique de la description des sensations, grâce à un processus d'analyse sémantique, amène à considérer des pistes nouvelles dans la définition de spécifications de contrôle. De plus, le lien étroit entre la définition de la qualité sensorielle et la notion d'anomalie, qui n'était alors que rarement exprimée dans la littérature, a ici été mis en évidence pour le cas de l'haptique. Ces éléments auraient donc probablement un réel intérêt pour la maîtrise de la qualité sensorielle en général.

6.4.1 Résultats complémentaires dérivés de l'application de la méthodologie

En complément de la mise en place du contrôle haptique dans le cas du bracelet de montre PIAGET, nous avons pu effectuer une analyse générale de l'impact de la fabrication sur la qualité haptique. En effet, les échantillons de bracelet ayant été réalisés en suivant un plan d'expérience comprenant différents facteurs de fabrication, il a été possible d'évaluer leur impact sur l'évaluation des anomalies de chaque sensation élémentaire.

Nous observons par exemple que, pour les anomalies d'*adhérence*, il y a un impact significatif des paramètres d'usure de l'outil et d'effort de coupe⁶⁵ sur la gravité évaluée. La figure 6.7 montre les effets de ces paramètres sur la gravité des anomalies. Grâce à ces résultats, il serait ainsi possible d'optimiser les paramètres de fabrication. Ces effets devraient toutefois être validés étant donné que l'incertitude relevée est assez importante.

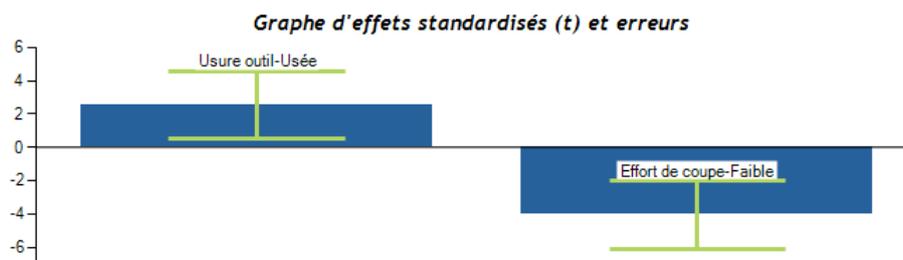


Figure 6.7 – Graphe des effets de paramètres de fabrication des bracelets sur la gravité des anomalies d'*adhérence*

65. L'intitulé des paramètres est simplifié pour conserver la confidentialité de la réalisation des bracelets.

6.4.2 Ouvertures à d'autres domaines

Bien que nous nous soyons ici focalisés sur le sens du toucher, les méthodes proposées dans le cadre de ce projet peuvent s'adresser au domaine plus large de la qualité sensorielle. En effet, étant donné les similarités entre les processus de perception des différents sens de l'être humain et le caractère générique des approches utilisées, ces travaux ouvrent la voie vers de nouvelles perspectives pour le contrôle de la qualité relative à d'autres modalités sensorielles (la vue par exemple). Nous avons vu notamment lors du regroupement sémantique que certains groupes de mots relevaient de plusieurs sens (vue et toucher). Leur modélisation, aussi bien sur les sensations élémentaires haptiques identifiées que sur des sensations élémentaires visuelles à définir, permettrait la mise en place de contrôles plus adaptés au caractère multi-sensoriel de la perception. Pour construire un modèle de ce type, la méthode de formalisation sémantique proposée fournit d'ores et déjà un processus générique. L'étude des combinaisons et des interactions entre les sens est donc également un sujet d'avenir afin de maîtriser et d'optimiser les phases de contrôle, que celles-ci soient manuelles ou instrumentées.

De plus, nous nous sommes ici concentrés sur le contrôle industriel, mais une piste d'application dérivée de ces travaux pourrait concerner les phases situées en amont de la conception des produits. Par exemple, la notion d'hédonisme pourrait être modélisée au travers de la base de connaissances développée, en identifiant les proximités sémantiques entre les mots de la base et certains mots caractéristiques de l'hédonisme. Il s'agirait d'une nouvelle catégorie dont l'intensité serait quantifiable selon les mots utilisés (*plaisant* décrivant un niveau d'intensité élevé et *désagréable* un niveau faible par exemple). Il serait alors possible au travers de ce modèle d'identifier les mots ayant une connotation hédonique élevée ou faible, et de les privilégier ou non pour la conception d'un produit. Ensuite, en utilisant l'expérience de cas d'application de contrôle, il serait possible de préciser ces associations suivant le contexte. Par ailleurs, la mise en place, dès la conception, de spécifications sensorielles (et en particulier haptiques) standardisées, pourrait faciliter la communication entre les acteurs de la qualité d'un produit. Cela permettrait également d'accélérer ensuite la définition des contrôles.

Finalement, les nouvelles technologies de toucher virtuel, telles que par exemple celles basées sur l'utilisation d'actionneurs vibrotactiles (qui font vibrer les surfaces pour créer certaines sensations souhaitées), pourraient bénéficier des modèles de connaissances proposés au travers de ces travaux. En effet, il s'agirait par exemple de mettre en relation les signaux vibratoires des actionneurs et les niveaux d'intensité de sensation élémentaire. Ainsi, le passage des mots à la génération de sensations serait immédiat. De nombreuses applications émergent dans ce domaine. En particulier, l'interaction avec les écrans des appareils couramment utilisés de nos jours se limite généralement à l'utilisation de la vue, tandis que le toucher est la plupart du temps uniquement impliqué en tant qu'effecteur (pour appuyer sur les boutons d'une interface par exemple). Néanmoins, certains appareils transmettent déjà des informations via le sens du toucher, et les années à venir verront très probablement l'essor de nombreux produits générant des sensations de manière dynamique. Les travaux réalisés dans cette étude contribuent ainsi à préparer la maîtrise de leur qualité sensorielle.

Publications

Reuves internationales à comité de lecture

- Albert, B., Maire, J. L., Pillet, M., Zanni-merk, C., de Bertrand de Beuvron, F., Knecht, C., Charrier, J. (Soumis). Systematic Formalization of Haptic Sensations for the Definition of Perceived Quality Specifications.
- Albert, B., De Bertrand De Beuvron, F., Zanni-Merk, C., Maire, J.-L., Pillet, M., Charrier, J., Knecht, C. (2019). A Smart System for Haptic Quality Control : A Knowledge-Based Approach to Formalize the Sense of Touch. In Communications in Computer and Information Science (Vol. 914, pp. 173–190). https://doi.org/10.1007/978-3-319-99701-8_8
- Albert, B., Zanni-Merk, C., de Beuvron, F. de B., Pillet, M., Maire, J.-L., Knecht, C., Charrier, J. (2017). A Smart System to Standardize the Specifications of Haptic Quality Control. *Procedia Computer Science*, 112(September), 723–730. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.08.155>

Conférences à comité de lecture

Conférences internationales

- Albert, B., Maire, J.-L., Pillet, M., Zanni-Merk, C., de Bertrand de Beuvron, F., Charrier, J., Knecht, C. (2017). A haptic quality control method based on the human somatosensory system. In 2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications (CIVEMSA) (pp. 135–140). Annecy : IEEE. <https://doi.org/10.1109/CIVEMSA.2017.7995315>
- Lacombe, T., Albert, B., Dereli, H., Tomczyk, M., Nait-Youcef, Y., Philppa, J., Favreliere, H. (2017). Voir pour Toucher ? Caractérisation Optique de la Sensation d'Adhérence. In *Qualita*. Bourges. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.28442.29122>
- 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 Representation of Sensory Perception Knowledge. In Proceedings of the 8th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management (pp. 21–30). Porto : SCITEPRESS - Science and Technology Publications. **BEST STUDENT PAPER**. <https://doi.org/10.5220/0006048300210030>
- 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 *KEER*. Leeds, UK. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.31797.73441>

Conférences nationales

- Albert, B., Beuvron, F. D. B. De, Zanni-merk, C., Maire, J., Pillet, M., Charrier, J., Knecht, C. (2017). Augmenting Human Haptic Perceptions through Knowledge Modeling for Industrial Quality Control. In JCI (Journée du Campus d'Illkirch).
<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.25086.84805>
- Albert, B., Knecht, C., Charrier, J., Pillet, M., Maire, J.-L., Zanni-Merk, C., De Beuvron, F. (2016). Formalisation du Contrôle Qualité Haptique : Structuration Sémantique des Sensations Haptiques. IC.
<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.15316.60806>

Autres publications et présentations

- Atelier de l'association Le Sensolier⁶⁶ (présentation). 2018.
- Congrès tendances décors et matière de la SIA et SFIP⁶⁷ (présentation). 2017.
- **Premier prix** du concours de l'association La Fabrique de l'industrie⁶⁸ dans la catégorie articles scientifiques. 2017.
 - Article en ligne⁶⁹ : <https://www.la-fabrique.fr/fr/blog/standardiser-controle-de-qualite-toucher/>
 - Vidéo de la présentation : <https://www.youtube.com/watch?v=WC7jy738m84&t=1s>
- Journées des doctorants de l'école doctorale SISEO (poster). 2016, 2017.
- Pitch PME PFA filière automobile et mobilité⁷⁰ au mondial de l'auto (présentation). 2016
- Journée de la recherche à l'Insa de Strasbourg (poster). 2016.

66. Le sensolier : <http://www.lesensolier.com/>.

67. Congrès tendances décors et matières 2017 : <http://www.sia.fr/evenements/87-tendances-decors-matieres-design-qualite-percue>.

68. La Fabrique de l'Industrie : <https://www.la-fabrique.fr/fr/>.

69. Voir également l'article en ligne de l'université Savoie Mont Blanc : <https://www.univ-smb.fr/2017/09/26/bruno-albert-doctorant-au-symme-remporte-le-concours-de-la-fabrique-de-lindustrie-dans-la-categorie-article-2/>.

70. Pitch PME PFA 2016 : <http://www.id4car.org/IMG/UserFiles/Images/2016%2010%2006%20Programme%20Pitches%20PME%20PFA.pdf>

Références

- Abele, A., McCrae, J. P., Buitelaar, P., Jentsch, A., & Cyganiak, R. (2017). *Linking Open Data cloud diagram 2017*. Consulté sur <http://lod-cloud.net/>
- AFNOR. (2003, 09). *Afnor bp x10-040 – caractérisation sensorielle des matériaux – méthodologie générale – recommandations méthodologiques pour l’analyse sensorielle de la matière première au produit fini* (Vol. 2003; Standard). La Plaine Saint-Denis, FR : Association française de normalisation.
- 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 *Keer*. Leeds, UK. Consulté sur <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.31797.73441>
- 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 Representation of Sensory Perception Knowledge. In *Proc. 8th int. jt. conf. knowl. discov. knowl. eng. knowl. manag.* (pp. 21–30). Porto : SCITEPRESS - Science and Technology Publications. Consulté sur <http://www.scitepress.org/DigitalLibrary/Link.aspx?doi=10.5220/0006048300210030>
- Allen, J. F., & Ferguson, G. (1997). Actions and events in interval temporal logic. In *Spat. temporal reason.* (pp. 205–245). Springer.
- Ashino, T. (2010). Materials Ontology : An Infrastructure for Exchanging Materials Information and Knowledge. *Data Sci. J.*, 9(July), 54–61.
- Avanzini, C., Mantelet, F., & Aoussat, A. (2017). Elaboration d’une Méthodologie de Conception Collaborative sur la Qualité Perçue en Intégrant la Méthode d’Ingénierie Sensorielle : Une Application au Marché du Luxe. In *Confere colloq. des sci. la concept. l’innovation*. Séville, Spain.
- Avanzini, C., Mantelet, F., Aoussat, A., & Jeanningros, F. (2018). Evaluating Perceived Quality through Sensory Evaluation in the Development Process of New Products : A Case Study of Luxury Market State of the Art and Research Goals. In *Keer* (pp. 1–10). Kuching, Malaysia.
- Ayadi, A., Zanni-Merk, C., De Beuvron, F. D. B., & Krichen, S. (2017). BNO : An ontology for describing the behaviour of complex biomolecular networks. *Procedia Comput. Sci.*, 112, 524–533.
- Ballesteros, S., & Heller, M. A. (2008). Haptic object identification. In *Hum. haptic percept. basics appl.* (pp. 207–222). Basel : Birkhäuser Basel. Consulté sur http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-3-7643-7612-3_{_}16
- Ballu, A., Mathieu, L., & Dantan, J.-Y. (2001). Global View of Geometrical Specifications. *7th CIRP Int. Semin. Comput. Toler.*, 19–30.
- Bassereau, J. F. (1995). *Cahier des charges qualitatif design, élaboration par le mécanisme des sens*. École nationale supérieure d’arts et métiers. Consulté sur

- <https://books.google.fr/books?id=2K3QMgEACAAJ>
- Bassereau, J.-F., & Charvet-Pello, R. (2011). *Dictionnaire des mots du sensoriel* (TECHNIQUE & DOCUMENTATION, Ed.). Lavoisier. Consulté sur <http://e.lavoisier.fr/produit/9782743017774>
- 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* (Thèse de doctorat non publiée). Université de Grenoble.
- Baudet, N., Maire, J. L., & Pillet, M. (2013). The visual inspection of product surfaces. *Food Qual. Prefer.*, 27(2), 153–160. Consulté sur <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950329312001620>
- Bensmaïa, S., & Hollins, M. (2005). Pacinian representations of fine surface texture. *Percept. Psychophys.*, 67(5), 842–854.
- Benson, P. G., & Ohta, H. (1986). Classifying Sensory Inspectors with Heterogeneous Inspection-Error Probabilities. *J. Qual. Technol.*, 18(2), 79–90. Consulté sur <https://doi.org/10.1080/00224065.1986.11978991>
- BFO. (2015). *Basic formal ontology (bfo)*. Consulté le 24.04.2018, sur <http://ifomis.uni-saarland.de/bfo/>
- Blei, D. M., Ng, A. Y., & Jordan, M. I. (2003). Latent Dirichlet Allocation. *J. Mach. Learn. Res.*, 3, 993–1022.
- Bārzdīņš, J., Bārzdīņš, G., Čerāns, K., Liepiņš, R., & Sproģis, A. (2010). UML Style Graphical Notation and Editor for OWL 2. *Perspect. Bus. Informatics Res.*, 128(SEPTEMBER), 102–114. Consulté sur http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-16101-8_{_}9
- Carroll, J. J., & Klyne, G. (2004). *Resource Description Framework ({RDF}) : Concepts and Abstract Syntax* (Rapport technique). W3C. Consulté sur <http://www.w3.org/TR/2004/REC-rdf-concepts-20040210/>
- Chelewiak, R. W., & Collins, A. A. (1991). Sensory and physiological bases of touch. *Psychol. Touch*(July), 23–60. Consulté sur <https://books.google.de/books?id=mC4VAgAAQBAJ{&}dq=the+physiology+of+touch+hillsdale{&}lr={&}hl=de{&}source=gbs{&}navlinks{&}s>
- Chen, X., Barnes, C., Childs, T., Henson, B., & Shao, F. (2009). Materials' tactile testing and characterisation for consumer products' affective packaging design. *Mater. Des.*, 30(10), 4299–4310. Consulté sur <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909001708>
- Chen, X., Shao, F., Barnes, C., Childs, T., & Henson, B. (2009). Exploring relationships between touch perception and surface physical properties. *Int. J. Des.*, 3(2), 67–76.
- Choi, K., & Jun, C. (2007). A systematic approach to the Kansei factors of tactile sense regarding the surface roughness. *Appl. Ergon.*, 38(1), 53–63. Consulté sur <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16533495>
- Compton, M., Barnaghi, P., Bermudez, L., García-Castro, R., Corcho, O., Cox, S., ... Taylor, K. (2012). The SSN ontology of the W3C semantic sensor network incubator group. *J. Web Semant.*, 17, 25–32. Consulté sur <http://dx.doi.org/10.1016/j.websem.2012.05.003>
- Crochemore, S., Nesa, D., & Couderc, S. (2004). *Analyse sensorielle des matériaux d'habitable automobile : toucher/vision*. Ed. Techniques Ing{é}nieur.
- Crochemore, S., Vergneault, C., & Nesa, D. (2003). A new reference frame for tactile perceptions : Sensotact. *5th Rose Mary Pangborn, Bost. MA, USA*, 20–24.

- Darden, M. A., & Schwartz, C. J. (2009). Investigation of skin tribology and its effects on the tactile attributes of polymer fabrics. *Wear*, 267(5-8), 1289–1294.
- Davenport, T. H., & Prusak, L. (1998). *Working knowledge : How organizations manage what they know*. Harvard Business Press.
- David, S. (1997). Représentations sensorielles et marques de la personne : contrastes entre olfaction et audition. *Catégorisation Cogn. la Percept. 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* (Thèse de doctorat non publiée). Université de Grenoble.
- De Rossi, D., & Scilingo, E. P. (2006). Skin-like sensor arrays. *Enycl. sensors*, 10, 1–22.
- Debrosse, T., Pillet, M., Maire, J. L., & Baudet, N. (2010). Sensory perception of surfaces quality - Industrial practices and prospects. *Proc. Kansei Eng. Emot. Res.*, 252. Consulté sur <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00484281/en/>
- Depled, F. (2009). *Evaluation sensorielle - Manuel méthodologique* (ISHA, Ed.). La-voisier.
- Desage, S.-f. (2016). *Contraintes et opportunités pour l'automatisation de l'inspection visuelle au regard du processus humain* (Thèse de doctorat non publiée). Université Savoie Mont-Blanc.
- Désage, S.-F., Pitard, G., Pillet, M., Favrelière, H., Frelin, F., Samper, S., ... Jochum, P. (2014). Visual quality inspection and fine anomalies..
- Dietrich, A. (1999). La dynamique des compétences, point aveugle des techniques managériales. *Form. Empl.*, 67(1), 9–23.
- Dingemane, M., & Majid, A. (2012). The semantic structure of sensory vocabulary in an African language. ... *34th Annu. Conf. ...*, 1, 300–305. Consulté sur <http://pubman.mpdl.mpg.de/pubman/item/escidoc:1383595:13/component/escidoc:1508800/paper0064.pdf>
- DOLCE. (2006). *Descriptive ontology for linguistic and cognitive engineering (dolce)*. Consulté le 24.04.2018, sur <http://www.loa.istc.cnr.it/old/DOLCE.html>
- 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*.
- DUL. (2010). *Dolce+dns_ultralite (dul)*. Consulté le 25.05.2016, sur http://ontologydesignpatterns.org/wiki/Ontology:DOLCE+DnS_Ultralite
- 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* (Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers).
- Dutu, L.-C. (2015). *Analyse de Signaux Vibrotactiles et Modèles Flous de la Perception . Application aux Interfaces Tactiles pour l'Automobile et l'Aéronautique*. (Thèse de doctorat non publiée).
- Etteradossi, O. (2011). *Une approche cartographique des propriétés d'aspect des matériaux* (Habilitation à Diriger les Recherches). Université Jean Monnet.
- Favreliere, H. (2009). Tolérancement Modal : De la Métrologie vers les Spécifications.
- Fruchterman, T. M., & Reingold, E. M. (1991). Graph drawing by force-directed placement. *Softw. Pract. Exp.*, 21(11), 1129–1164.
- Gartiser, N., Zanni-Merk, C., Boullosa, L., & Casali, A. (2014). A semantic layered architecture for analysis and diagnosis of SME. *Procedia - Procedia Comput. Sci.*,

- Herrera, F., & Martinez, L. (2000). A 2-tuple fuzzy linguistic representation model for computing with words. *IEEE Trans. fuzzy Syst.*, 8(6), 746–752.
- Hobbs, J. R., & Pan, F. (2017). *Time ontology in owl (owl-time)*. Consulté le 24.04.2018, sur <https://www.w3.org/TR/owl-time/>
- Hollins, M., Faldowski, R., Rao, S., & Young, F. (1993). Perceptual dimensions of tactile surface texture : a multidimensional scaling analysis. *Percept. Psychophys.*, 54(6), 697–705.
- Hollins, M., & Risner, S. R. (2000). Evidence for the duplex theory of tactile texture perception. *Percept. Psychophys.*, 62(4), 695–705.
- Horridge, M., Jupp, S., Moulton, G., Rector, A., Stevens, R., & Wroe, C. (2007). *Matthew Horridge, Simon Jupp, Georgina Moulton, Alan Rector, Robert Stevens, Chris Wroe* (Rapport technique). The University Of Manchester.
- IDTechEx. (2017). *Haptics 2017-2027 : Technologies, markets and players*. Consulté le 01.12.2017, sur <https://www.idtechex.com/research/reports/haptics-2017-2027-technologies-markets-and-players-000532.asp?viewopt=desc>
- ISO. (1994, 12). *Iso 11035 :1994 – sensory analysis – identification and selection of descriptors for establishing a sensory profile by a multidimensional approach* (Vol. 1994; Standard). Geneva, CH : International Organization for Standardization Geneva.
- ISO. (2008). *Iso 5492 :2008 – sensory analysis – vocabulary* (Vol. 2008; Standard). Geneva, CH : International Organization for Standardization Geneva.
- ISO. (2012, 12). *Iso 8586 :2012 – sensory analysis – general guidelines for the selection, training and monitoring of selected assessors and expert sensory assessors* (Vol. 2012; Standard). Geneva, CH : International Organization for Standardization.
- ISO. (2016, 03). *Iso 13299 :2016 – sensory analysis – methodology – general guidance for establishing a sensory profile* (Vol. 2016; Standard). Geneva, CH : International Organization for Standardization Geneva.
- ISO. (2016, 04). *Iso 25178-1 :2016 – geometrical product specifications (gps) — surface texture : Areal* (Vol. 2016; Standard). Geneva, CH : International Organization for Standardization.
- ISO. (2017, 07). *Iso 6658 :2017 – sensory analysis – methodology – general guidance* (Vol. 2017; Standard). Geneva, CH : International Organization for Standardization.
- Issa, M., Schacher, L., & Adolphe, D. (2008). Development of a New Experimental Technique for Mechanical Characterization of Fabric. *Exp. Tech.*, 32(6), 24–29. Consulté sur <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1747-1567.2007.00268.x>
- Issa, M., Schacher, L., & Adolphe, D. C. (2005). Invariant attributes in the tactile characterization of fabrics. In *Proceeding, fiber soc. spring conf.*
- Janowicz, K., & Compton, M. (2010). The stimulus-sensor-observation ontology design pattern and its integration into the semantic sensor network ontology. *CEUR Workshop Proc.*, 668.
- Johansson, R. S., & Vallbo, Å. B. (1983). Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand. *Trends Neurosci.*, 6(C), 27–32.
- Johnson, S. L., & Funke, D. J. (1980). An Analysis of Human Reliability Measures in Visual Inspection. *J. Qual. Technol.*, 12(2), 71–74. Consulté sur <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980939>

- Jones, L. A., & Lederman, S. J. (2006). *Human hand function*. Oxford University Press.
- Karaouzene, Z., & Cheikh, A. (2015). Test de cohérence des données pour un système expert d'aide au diagnostic de pannes. In *Concept. prod. intégrées*. Tanger, Maroc.
- Katz, D. (1989). *The world of touch (LE Krueger, Trans.)*. Mahwah, NJ : Erlbaum.(Original work published 1925).
- Kim, H. M., Fox, M. S., & Grüninger, M. (1999). Ontology for quality management - enabling quality problem identification and tracing. *BT Technol. J.*, 17(4), 131–140.
- Kindermann, R., & Snell, J. L. (1980). *Markov random fields and their applications* (Vol. 1) (N° 211739). Consulté sur <http://www.ams.org/publications/online-books/conm1-conm1-chI.pdf>
- Klatzky, R. L., & Lederman, S. J. (1988). The Intelligent Hand. *Psychol. Learn. Motiv. - Adv. Res. Theory*, 21(C), 121–151.
- Klatzky, R. L., Lederman, S. J., & Metzger, V. a. (1985). Identifying objects by touch : an "expert system". *Percept. Psychophys.*, 37(4), 299–302.
- Klatzky, R. L., Loomis, J. M., Lederman, S. J., Wake, H., & Fujita, N. (1993). Haptic identification of objects and their depictions. *Percept. Psychophys.*, 54(2), 170–8. Consulté sur <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8361831>
- Klatzky, R. L., & Peck, J. (2012). Please Touch : Object Properties that Invite Touch. *IEEE Trans. Haptics*, 5(2), 139–147.
- Lacombe, T., Albert, B., Dereli, H., Tomczyk, M., Nait-Youcef, Y., Philppa, J., & Favreliere, H. (2017). Voir pour Toucher ? Caractérisation Optique de la Sensation d'Adhérence. In *Qualita*. Bourges. Consulté sur <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.28442.29122>
- Lacombe, T., Pillet, M., & Favreliere, H. (2017). Inspection visuelle automatisée de surfaces : Perspectives d'évolutions industrielles Echelle d'inspection, quantité d'information acquise et apprentissage non-supervisé. In *15ème colloq. natl. aip-priméca concev. produire dans les ind. du futur*. La Plagne, France. Consulté sur <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01521464>
- Larousse. (2018). *Dictionnaire de français*. Consulté le 01.09.2018, sur <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais>
- Lavastre, D., & Bouvet, P. (2012). GUIDE POUR LA RADIOGRAPHIE NUMÉRIQUE DES PIÈCES MOULÉES. *Fonderie Mag.*(23), 34–38.
- Lawless, H. T., & Heymann, H. (1999). Sensory Evaluation in Quality Control. In *Sens. eval. food* (pp. 548–584). Boston, MA : Springer US. Consulté sur https://books.google.com.br/books?id=vrAACAAAQBAJhttp://link.springer.com/10.1007/978-1-4615-7843-7_{_}16
- Le Goic, G. (2012). *Qualité géométrique & Aspect des surfaces approches locales et globales* (Thèse de doctorat non publiée). Université de Grenoble.
- Lebaz, S. (2011). Perception haptique d'images aux traits en relief par des individus aveugles et voyants. , 1–130.
- Lederman, S., & Klatzky, R. L. (2009). Haptic perception : A tutorial. *Atten. Percept. Psychophys.*, 71(3), 1439–1459.
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1987). Hand movements : A window into haptic object recognition. *Cogn. Psychol.*, 19(3), 342–368.
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (2010). Human Haptics. *Encycl. Neurosci.*, 5, 11–18.
- 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* (Vol. 47)

- (N° 1).
- Maedche, A., Motik, B., Stojanovic, L., Studer, R., & Volz, R. (2003). Ontologies for enterprise knowledge management. *IEEE Intell. Syst.*, 18(2), 26–33. Consulté sur <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1193654>
- Maire, J.-l. (2018). *Identification, formalisation et déploiement des bonnes pratiques industrielles Application au Benchmarking et au Contrôle sensoriel de la Qualité* (Thèse de doctorat non publiée). Université Savoie Mont Blanc.
- Maire, J.-L., Pillet, M., & Baudet, N. (2012). Good Practices in Human Visual Inspection.
- Maire, J.-L., Pillet, M., & Baudet, N. (2013a). Gage r2&e2 : an effective tool to improve the visual control of products. *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, 30(2), 161–176.
- Maire, J.-L., Pillet, M., & Baudet, N. (2013b). Measurement of the perceived quality of a product - Characterization of aesthetic anomalies. *Int. J. Metrol. Qual. Eng.*, 4(2), 63–69.
- Markets, & Markets. (2017). *Haptic technology market - global forecast to 2022*. Consulté le 01.12.2017, sur <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/haptic-technology-market-443.html>
- 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. Consulté sur <http://dx.doi.org/10.1117/12.871402>
- Martínez, L. (2007). Sensory evaluation based on linguistic decision analysis. *Int. J. Approx. Reason.*, 44(2), 148–164.
- Martínez, L., & Herrera, F. (2012). An overview on the 2-tuple linguistic model for computing with words in decision making : Extensions, applications and challenges. *Inf. Sci. (Ny)*, 207, 1–18.
- Mikolov, T., Chen, K., Corrado, G., & Dean, J. (2013). Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space. , 1–12. Consulté sur <http://arxiv.org/abs/1301.3781>
- Milligan, G. W., & Cooper, M. C. (1987). Methodology Review : Clustering Methods. *Appl. Psychol. Meas.*, 11(4), 329–354.
- Milton, N. R. (2010). *Knowledge Technologies*. Consulté sur <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=qXwBQmMmMtQC&oi=fnd&pg=PA41&dq=Knowledge+technologies&ots=rVhw{ }y1X8Y&sig=TYeSXLkjaEz71t15K1UTwEd4QvM{% }5Cnhttp://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474034609000500>
- Monticolo, D., Badin, J., Gomes, S., Bonjour, E., & Chamoret, D. (2015). A meta-model for knowledge configuration management to support collaborative engineering. *Comput. Ind.*, 66, 11–20. Consulté sur <http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2014.08.001>
- Monticolo, D., Hilaire, V., Koukam, A., & Gomes, S. (2007). Ontodesign ; a Domain Ontology for Building and Exploiting Project Memories in Product Design Projects. *CoDeKF Proj.*, 1–6.
- Myrgiotti, E., Bassiliades, N., & Miliou, A. (2013). Bridging the HASM : An OWL ontology for modeling the information pathways in haptic interfaces software. *Expert Syst. Appl.*, 40(4), 1358–1371. Consulté sur <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.053>
- Myrgiotti, E., Chouvardas, V., & Miliou, A. (2009). Ontological representation of tactile information for software development. *Appl. Ontol.*, 4(April 2016), 139–167.

- Nagorny, P., Pillet, M., Pairel, E., Le Goff, R., Loureaux, J., Wali, M., & Kiener, P. (2017). Quality prediction in injection molding : Neural networks geometric dimension prediction on raw signals and thermographic images. *2017 IEEE Int. Conf. Comput. Intell. Virtual Environ. Meas. Syst. Appl. CIVEMSA 2017 - Proc.*, 141–146.
- Ohta, H., Kase, S., & Asao, M. (1980). Evaluation of Inspectors in Sensory Tests—Qualification by Geometrical Method and Classification by Bayesian Diagnosis Rule. *J. Qual. Technol.*, *12*(1), 19–24. Consulté sur <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980926>
- Okamoto, S., Nagano, H., & Yamada, Y. (2013). Psychophysical dimensions of tactile perception of textures. *IEEE Trans. Haptics*, *6*(1), 81–93.
- OWL. (2002). *Web ontology language (owl)*. Consulté le 24.04.2018, sur <https://www.w3.org/2001/sw/wiki/OWL>
- Passaro, C. (2014). *Du Couple Matériau-Procédé À La Qualité Perçue : Élaboration D'un Outil Prédicatif De La Perception Visuelle Des Pièces En Injection De Polypropylène D'intérieur Du Véhicule* (Thèse de doctorat non publiée).
- Philippe, F., Schacher, L., Adolphe, D. C., & Dacremont, C. (2004). Tactile feeling : Sensory analysis applied to textile goods. *Text. Res. J.*, *74*(12), 1066–1072.
- Picard, D., Dacremont, C., Valentin, D., & Giboreau, A. (2003). Perceptual dimensions of tactile textures. *Acta Psychol. (Amst.)*, *114*(2), 165–184. Consulté sur <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0001691803000751>
- 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 *Qualita 2009* (p. nc).
- Pitard, G. (2016). *Métrie et modélisation de l'aspect pour l'inspection qualité des surfaces* (Thèse de doctorat non publiée). Université Savoie Mont-Blanc.
- Purves, D., Augustine, G., Fitzpatrick, D., Katz, L. C., Lamantia, A.-S., McNamara, J. O., ... Augustine, G. J. (2001). *Neuroscience. 2nd edition*. Sinauer Associates. Consulté sur <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK10799/>
- RDF. (1999). *Resource description framework (rdf)*. Consulté le 24.04.2018, sur <https://www.w3.org/2001/sw/wiki/RDF>
- Research, & Markets. (2017). *Haptic technology : Applications and global markets*. Consulté le 01.12.2017, sur <https://www.researchandmarkets.com/reports/4327627/haptic-technology-applications-and-global-markets>
- Révész, G. (1950). *Psychology and art of the blind*. (Longmans, Ed.). Oxford : Longmans, Green.
- Roda, F., & Musulin, E. (2014). An ontology-based framework to support intelligent data analysis of sensor measurements. *Expert Syst. Appl.*, *41*(17), 7914–7926. Consulté sur <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957417414003741>
- Roussey, C., Pinet, F., Kang, M. A., & Corcho, O. (2011). An Introduction to Ontologies and Ontology Engineering. In *Ontol. urban dev. proj.* (pp. 9–38). London : Springer London. Consulté sur http://dx.doi.org/10.1007/978-0-85729-724-2_{ }2
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Serv. Sci.*, *1*(1), 83.
- Sagot, B., & Darja, F. (2008). Building a free French wordnet from multilingual resources. *Ontolex 2008*, 6.
- Sakamoto, M., & Watanabe, J. (2017). Exploring tactile perceptual dimensions using

- materials associated with sensory vocabulary. *Front. Psychol.*, 8(APR), 1–10.
- Schaeffer, S. E. (2007). Graph clustering. *Comput. Sci. Rev.*, 1(1), 27–64.
- Schreiber, G., Akkermans, H., Anjewierden, A., Hoog, R. D., Shadbolt, N., Velde, W. V. D., & Wielinga, B. (2000). *The CommonKADS Methodology*.
- Shirado, H., & Maeno, T. (2005). Modeling of human texture perception for tactile displays and sensors. *Proc. - 1st Jt. Eurohaptics Conf. Symp. Haptic Interfaces Virtual Environ. Teleoperator Syst. World Haptics Conf. WHC 2005*(April 2005), 629–630.
- 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 Trav. en Animat. Simul.*, 1–10.
- Sola, C. (2007). Y a pas de mots pour le dire, il faut sentir : Décrire et dénommer les happerceptions professionnelles. *Terrain*(49).
- Sola, C. (2015). *Toucher et savoir. une anthropologie des happerceptions professionnelles*. Consulté le 03.05.2018, sur <http://www.ethnographiques.org/2015/Sola>
- Soufflet, I., Calonnier, M., & Dacremont, C. (2004). A comparison between industrial experts' and novices' haptic perceptual organization : A tool to identify descriptors of the handle of fabrics. *Food Qual. Prefer.*, 15(7-8 SPEC.ISS.), 689–699.
- Sparna. (2016). *Ontologie, thesaurus et taxonomie sur le web de données*. Consulté le 01.07.2018, sur <http://blog.sparna.fr/2013/12/07/ontologie-thesaurus-taxonomie-web-de-donnees/>
- SSN. (2017). *Semantic sensor network ontology (ssn) version 2*. Consulté le 24.04.2018, sur <https://www.w3.org/TR/vocab-ssn/>
- Stevens, S. (1946). On the Theory of Scales of Measurement. *Science* (80-.), 103(2684), 677–680.
- Summers, I. R., Irwin, R. J., & Brady, A. C. (2007). Haptic discrimination of paper. In *Hum. haptic percept. basics appl.* (pp. 525–535). Basel : Birkhäuser Basel. Consulté sur http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-3-7643-7612-3_{_}44
- SUMO. (2001). *Suggested upper merged ontology (sumo)*. Consulté le 24.04.2018, sur <http://www.adampease.org/OP/>
- Suzuki, K., & Arashida, R. (1992). Geometrical haptic illusions revisited : haptic illusions compared with visual illusions. *Percept. Psychophys.*, 52(3), 329–335.
- SynTouch. (2017). *Biomimetic process and syntouch standard*. Consulté le 01.12.2017, sur <https://www.syntouchinc.com/en/biomimetic-process/>
- Tiest, W. M. B., & Kappers, A. M. L. (2009). Tactile perception of thermal diffusivity. *Atten. Percept. Psychophys.*, 71(3), 481–489.
- University of Washington. (2009). Chapter 10 the Somatosensory System. In (pp. 58–67). Consulté sur <http://courses.washington.edu/psych333/coursepack.shtml>
- Usman, Z., Young, R. I. M., Chungoora, N., Palmer, C., Case, K., & Harding, J. (2011). A manufacturing core concepts ontology for product lifecycle interoperability. *Lect. Notes Bus. Inf. Process.*, 76 LNBIP, 5–18.
- van Laack, A. W. (2014). *Measurement of Sensory and Cultural Influences on Haptic Quality Perception of Vehicle Interiors*. van Laack GmbH. Consulté sur <https://books.google.fr/books?id=NdzxAwAAQBAJ>
- Watanabe, J., Kano, A., & Sakamoto, M. (2014). Trend Visualization of Emotional Judg-

- ments on Materials in Contact Using Distribution Map of Japanese Onomatopoeic Words. , *13*(2), 353–359.
- Wikipedia. (2018). *Encyclopédie libre*. Consulté le 01.09.2018, sur <https://fr.wikipedia.org/wiki/>
- Wiktionnaire. (2018). *Dictionnaire libre de français*. Consulté le 01.09.2018, sur <https://fr.wiktionary.org/wiki/Wiktionnaire>
- Yoshida, M. (1968). Dimensions of tactual impressions. *Jpn. Psychol. Res.*, *10*(3), 123–137.
- Yoshioka, T., Gibb, B., Dorsch, a. K., Hsiao, S. S., & Johnson, K. O. (2001). Neural coding mechanisms underlying perceived roughness of finely textured surfaces. *J. Neurosci.*, *21*(17), 6905–6916.
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Inf. Control*. Consulté sur <https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR{%&}q=Zadeh+1965{%&}btnG={%&}lr={#}0>
- Zanni-Merk, C. (2014). *Knowledge Technologies for Problem Solving in Engineering* (Habilitation à Diriger les Recherches). 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., & de Bertrand de Beuvron, F. (2015). A Layered Architecture for a Fuzzy Semantic Approach for Satellite Image Analysis. *Int. J. Knowl. Syst. Sci.*, *6*(2), 31–56. Consulté sur <http://services.igi-global.com/resolvedoi/resolve.aspx?doi=10.4018/IJKSS.2015040103>
- Zhang, H., Dana, K., & Nishino, K. (2016). Friction from Reflectance : Deep Reflectance Codes for Predicting Physical Surface Properties from One-Shot In-Field Reflectance. , 1–16. Consulté sur <http://arxiv.org/abs/1603.07998>
- Zhang, P., Essaid, A., Zanni-Merk, C., & Cavallucci, D. (2017). Case-based Reasoning for Knowledge Capitalization in Inventive Design Using Latent Semantic Analysis. *Procedia Comput. Sci.*, *112*, 323–332. Consulté sur <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877050917313431>
- Zhang, Y., Luo, X., Zhao, Y., & Zhang, H. C. (2015). An ontology-based knowledge framework for engineering material selection. *Adv. Eng. Informatics*, *29*(4), 985–1000. Consulté sur <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2015.09.002>

Glossaire

Termes	Définitions
Antonyme	« Mot ayant un sens contraire à celui d'un autre (par exemple chaud et froid, laideur et beauté). » (Larousse, 2018)
Automatiser	« Procéder à l'automatisation d'un processus, d'une opération : exécution totale ou partielle de tâches techniques par des machines fonctionnant sans intervention humaine. » (Larousse, 2018)
Axiome	Expression d'une relation, d'un attribut ou de propriété entre une ou plusieurs entités de l'ontologie.
Base de connaissances	Base s'appuyant sur une représentation formelle des connaissances d'un domaine (ici le contrôle sensoriel) pour en permettre l'accès et effectuer des raisonnements grâce à des outils informatiques.
Bio-fidèle	Reproduit des caractéristiques biologiques, d'un doigt humain par exemple pour le cas d'un doigt bio-fidèle.
Concept	Il s'agit dans une ontologie d'une expression formelle d'une entité réelle.
Conformité	Description de l'état d'accord avec les exigences attendues pour un produit. Ainsi, un produit conforme est en accord avec les exigences de qualité spécifiées pour ce produit.
Contrôleur	Personne réalisant le contrôle en ligne de production (opérateur de contrôle).
Défauthèque	Bibliothèque de défauts, souvent utilisée dans l'industrie pour lister les défauts pouvant survenir sur un produit et qui doivent être détectés pour assurer sa qualité perçue.
Degré sémantique	Nombre de relations sémantiques d'un mot avec d'autres mots, dans un ensemble de mots donné.
Discriminance	« Capacité à établir une séparation, une différenciation entre deux termes, qui distingue nettement l'un de l'autre. » (Larousse, 2018)
Exhaustivité	« Caractère de ce qui est exhaustif : qui épuise un sujet, une matière. » (Larousse, 2018)
Expert	Personne ayant une expertise, c'est-à-dire des connaissances et une fiabilité prouvée, concernant la qualité des produits considérés (responsable qualité, qualité perçue ou décideur marketing dans le cas de la qualité sensorielle).
Exploration	Manière d'interagir avec un produit dans le but de l'évaluer, de le contrôler. Manière de le toucher en ce qui concerne le contrôle haptique.
Formaliser	Réduire les connaissances à une structure formelle, c'est-à-dire poser explicitement les règles de déduction suivant lesquelles un raisonnement pourra être fait.

Généricité	Caractère de ce qui est générique : « se dit d'un mot de sens suffisamment général pour englober une classe naturelle d'objets dont chacun, pris séparément, reçoit une dénomination spécifique. » (Larousse, 2018)
Générique	Ce qui est suffisamment général pour englober une classe d'éléments, ce qui est commun
Haptique	Combinaison des aspects tactile et kinesthésique de la sensibilité humaine. Également appelé système somesthésique.
Hédonique	Ce qui plaît, ce qui procure du plaisir.
Holonyme	« Terme lié à un autre de la même langue par une relation sémantique de tout à partie. » (Wikitionnaire, 2018)
Hyperonyme	« Terme dont le sens inclut le sens d'un ou plusieurs autres termes, qui sont ses hyponymes. » (Larousse, 2018)
Hyponyme	« Mot dont le sens (sa compréhension sémantique) est plus spécifique que celui d'un autre. » (Wikitionnaire, 2018)
Indépendance	« État de plusieurs choses, phénomènes, actions, etc., qui n'ont entre eux aucune relation de subordination. » (Larousse, 2018)
Inférence	Une conclusion obtenue sur la base de fait et grâce à une opération de raisonnement.
Kinesthésique	Perception humaine liée aux récepteurs sensoriels localisés dans les muscles, tendons et articulations, c'est-à-dire à l'intérieur du corps humain (principalement les propriocepteurs).
Mécanorécepteur	Récepteur sensoriel sensible aux phénomènes mécaniques de contact (pression, étirement, vibrations, formes, persistance).
Mécatronique	« Combinaison des domaines de la mécanique, de l'électronique, de l'automatique et de l'informatique. L'intérêt est de concevoir des systèmes automatiques puissants et de permettre le contrôle de systèmes complexes. » (Wikipedia, 2018)
Méronyme	« Terme lié à un autre d'une même langue par une relation sémantique de partie à tout. » (Wikitionnaire, 2018)
Nocicepteur	Récepteur sensoriel sensible aux stimuli extrêmes et aux dégradations de la peau.
Ontologie	Étude philosophique de la nature de la réalité. En sciences informatiques il s'agit d'une représentation formelle et partagée du vocabulaire décrivant des connaissances ainsi qu'une manière de permettre leur conceptualisation et leur modélisation.
Pertinence	Approprié au contexte dans lequel quelque chose est employé (dans cette étude ce terme est souvent associé au mots de vocabulaire en rapport avec le contexte de description de la qualité au toucher).
Précision	« Aptitude à distinguer des valeurs très voisines. » (Wikitionnaire, 2018)
Propriocepteur	Récepteur sensoriel sensible à la position du corps, aux mouvements et à la force.

Proprioception	Modalité sensorielle permettant à l'être humain de connaître, entre autres, la position des différentes parties de son corps et les efforts appliqués. Les récepteurs sensoriels associés sont les propriocepteurs . Équivalent au système kinesthésique .
Raisonneur	Également appelé moteur d' inférence , il permet d'interpréter les informations de la base de connaissances, pour acquérir des informations plus complexe, ou pour résoudre des problèmes donnés.
Réfectance	Proportion de lumière réfléchiée par la surface d'un matériau. (voir https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9flectance)
Répétabilité	Capacité d'une personne ou d'un instrument à fournir plusieurs fois le même résultat pour un même test.
Reproductibilité	Capacité d'une personne ou d'un instrument à fournir le même résultat qu'une valeur de référence (fixée par un expert par exemple).
Sémantique	« Relatif à la signification et au sens des unités linguistiques. » (Wiktionnaire, 2018)
Somesthésie	Combinaison des aspects tactile et kinesthésique de la sensibilité humaine. Également appelé système haptique.
Spécifications	« Ensemble d'exigences ou de caractéristiques » à suivre dans un contexte de fabrication ou de contrôle industriel. (Wiktionnaire, 2018)
Standardiser	« Mettre sur le même modèle » (Larousse, 2018). « Rendre conforme à un standard, c'est dire un modèle, un étalon de mesure » (Wiktionnaire, 2018).
Stimulus	« Tout élément physique, chimique ou biologique capable de déclencher des phénomènes dans l'organisme, notamment des phénomènes nerveux, musculaires ou endocriniens. » (Larousse, 2018)
Synonyme	« Se dit de termes que l'on peut substituer l'un à l'autre dans un énoncé sans changer le sens de celui-ci. » (Larousse, 2018)
Systématiser	Rendre systématique, organiser quelque chose sous la forme d'un système.
Système à base de connaissances	Système mettant en œuvre une base de connaissances afin d'en permettre l'accès et d'effectuer des raisonnements pour la réalisation d'une tâche.
Tactile	Perception humaine liée aux récepteurs sensoriels localisés dans la peau, c'est-à-dire sur la surface externe du corps humain, en contact avec le monde extérieur (principalement les mécanorécepteurs , thermorécepteurs et nocicepteurs).
Taxonomie	Catégorisation hiérarchique d'éléments de connaissances.
Texture	« Structure de la surface d'un matériau telle qu'on la perçoit par le toucher. » (Wiktionnaire, 2018)
Thermorécepteur	Récepteur sensoriel sensible aux transferts thermiques.
Thesaurus	Liste organisée de termes. Sert principalement à indexer des contenus ou des ressources.

Web sémantique Standard défini par le W3C <https://www.w3.org/> en faveur de formats de données et de protocoles d'échanges communs sur le web.

Glossaire – Explication lexicale ou technique des termes utilisés dans ce document. Définitions tirées soit d'une synthèse de recherches bibliographique réalisées et de dictionnaires de français.

Table des figures

1	Contexte des recherches de la thèse	3
2	Vue d'ensemble de la structure du manuscrit	7
1.1	Quelques exemples d'application du contrôle haptique	11
1.2	Logo de l'entreprise PIAGET	12
1.3	Le test R ² &E ² dans l'entreprise PIAGET	13
1.4	Principaux résultats du test R ² &E ²	13
1.5	Les mots utilisés par les participants durant le contrôle	14
1.6	Quelques modes d'exploration utilisés lors du contrôle	14
1.7	La perception humaine dans le contrôle sensoriel	15
1.8	Les procédures exploratoires du toucher (S. J. Lederman & Klatzky, 1987)	16
1.9	Les mots utilisés pour décrire une sensation haptique	21
1.10	Estimation de la correspondance entre les textes du corpus et le contexte d'application : ratio en pourcentage des textes associés à chaque élément de contexte. (a) : correspondance aux domaines d'application; (b) : correspondance aux matériaux impliqués	22
1.11	Segmentation du processus de contrôle visuel (Guerra, 2008, p.86)	29
1.12	Synthèse des éléments présentés dans les chapitres 2, 3 et 4	32
2.1	Fréquence d'utilisation des mots (cas d'étude sur les bracelets de montres de luxe)	35
2.2	Les étapes de la méthode de construction du modèle de description des sensations haptiques - module formalisation	37
2.3	Graphe sémantique (simplifié) des mots et des relations entre mots	39
2.4	Graphe sémantique de la liste de mots (langue anglaise)	40
2.5	(a) Nombre de mots et relations pondérées pour la recherche du seuil bas de degré sémantique (filtrage des mots non pertinents); (b) Nombre de mots et relations pondérées pour la recherche du seuil haut de degré sémantique (filtrage des mots non précis)	43
2.6	Graphe sémantique après pré-filtrage des mots non pertinents et non précis	43
2.7	Résultat du regroupement des mots avec la méthode OpenOrd (Martin et al., 2011)	45
2.8	Le mot <i>waxy</i> et ses relations	47
2.9	Graphe sémantique obtenu après post-filtrage par indépendance et discrimination	48
2.10	Graphe obtenu après seconde application de l'algorithme de clustering sur les descripteurs de référence	49
2.11	Échelle d'intensité de la sensation élémentaire relief (EHS 2)	53

2.12	Exemple d'illustration de la fonction $S_a(x)$ d'association binaire aux niveaux d'intensité de la catégorie de sensation s_a	55
2.13	Quantification du mot <i>leathery</i> sur les sensations EHS 2 et EHS 3 : $W_{leathery} = \{ \alpha_2 S_2(x); \alpha_3 S_3(x) \}$	57
2.14	Description formelle du mot <i>leathery</i>	58
2.15	(a) : Correspondance entre les mots de la base et les domaines d'application ; (b) : Correspondance entre les mots et les matériaux impliqués	59
2.16	Distribution des mots sur les catégories de sensation (EHS)	60
2.17	Résultat du regroupement sémantique obtenu en n'utilisant que 80% de mots en anglais de la base	62
2.18	Résultat du regroupement sémantique obtenu en utilisant les mots de la base en français	63
2.19	Représentation formalisée des méthodes de description de Okamoto (Okamoto et al., 2013) (a), Sensotact (Crochemore et al., 2003) (b) et Syntouch (SynTouch, 2017) (c) dans l'espace de description proposé	65
3.1	Logo du W3C (<i>World Wide Web Consortium</i>)	72
3.2	Synthèse des types d'ontologies suivant le niveau de généralisation : de bas en haut, du plus spécifique au plus générique	73
3.3	Vue d'ensemble de l'ontologie SSN (2017)	75
3.4	Extrait de l'ontologie SSN focalisé sur le motif SSO (Compton et al., 2012; Janowicz & Compton, 2010)	75
3.5	Cadre structurel pour le développement d'un système à base de connaissances KREM (Zanni-Merk, 2015)	78
3.6	Architecture générale de la représentation ontologique proposée	80
3.7	Ontologie de contexte d'application (AC) et relations avec les ontologies existantes (SSN et OML-Material)	83
3.8	Alignement de l'ontologie de contexte d'application (AC) sur l'ontologie de haut niveau DUL	84
3.9	Ontologie de perception sensorielle (SP) et relations avec les ontologies existantes (SSN et HASM)	84
3.10	Superposition de la partie SSO de l'ontologie SSN et de l'ontologie de perception sensorielle (SP) proposée	86
3.11	Synthèse de la représentation de l'exemple simplifié du concept <i>Leathery</i> vue dans l'éditeur <i>Protégé</i> (voir note 29)	88
3.12	Représentation graphique au format UML (voir note 37) d'une partie de l'ontologie SP focalisée sur le descripteur <i>Leathery</i> et les concepts associés	89
3.13	Ontologie d'instrumentation sensorielle (SI) et relations avec l'ontologie SSN, incluant la partie SSN-system	90
3.14	Taxonomies simplifiées des ontologies SS et CP	91
3.15	Relations temporelles pour l'organisation d'actions et d'évènements (proposées dans (Allen & Ferguson, 1997))	92
3.16	Résultat de l'analyse de l'ontologie <i>feliCity</i> par l'outil OOPS (voir note 40)	93
3.17	Vue générale des modules proposés pour la gestion des connaissances du contrôle sensoriel	94
3.18	Architecture proposée pour la gestion et l'enrichissement des connaissances	95

4.1	Analyse de l'environnement du contrôle haptique suivant la méthode des 5M	103
4.2	Illustration de la différence entre contrôle et conception	104
4.3	Schéma de principe de la méthodologie proposée pour la mise en place du contrôle haptique - vue des modules-outils	106
4.4	Schéma de principe de l'étape Description de la méthodologie de mise en place du contrôle haptique	107
4.5	Légende des diagrammes présentés	107
4.6	Détails de la sélection de l'intervalle d'intensité pour la sensation de relief dans le cas d'étude sur le bracelet de montre : (a) Intervalles d'intensité des mots ; (b) Combinaison de l'intensité et seuil de sélection	111
4.7	Illustration synthétique sous la forme d'un diagramme radar de la description formelle obtenue pour le cas d'étude sur le bracelet de montre	112
4.8	Illustration synthétique de l'échelle d'anomalie de la sensation de <i>relief</i> obtenue pour le cas d'étude sur le bracelet de montre	113
4.9	Synthèse des anomalies retenues pour le cas du bracelet de montre	114
4.10	Schéma de principe de l'étape Protocoles de la méthodologie de mise en place du contrôle haptique	115
4.11	Illustration d'une variation de l'angle de contact entre le doigt et l'échantillon : (a) Angle de 30° ; (b) Angle de 60°	117
4.12	Échelle permettant une mesure relative de l'écart de niveaux d'intensité perçue	119
4.13	Résultats des écarts d'intensité normalisés de la sensation relief entre les 12 conditions d'exploration	120
4.14	Modèle d'influence de l'exploration sur la perception de l'intensité de relief : (a) modèle incluant les effets simples ; (b) modèle incluant les effets d'interactions et quadratiques	121
4.15	Les trois conditions d'exploration particulières et leur positionnement sur l'échelle de niveau d'intensité perçue	123
4.16	Exemple de grille d'évaluation des anomalies de relief proposée pour le cas d'étude	123
4.17	Pondération des réponses données à chaque condition d'exploration, pour le calcul de la gravité d'une anomalie	125
4.18	Schéma de principe de l'étape Tolérances de la méthodologie de mise en place du contrôle haptique	126
4.19	Résultat des tolérances et du référentiel associé pour la sensation de relief pour le cas d'étude	128
4.20	Processus d'application du contrôle haptique	129
4.21	Synthèse du protocole de contrôle et des tolérances pour la sensation de relief pour le cas d'étude	130
4.22	Synthèse des résultats du test R^2 & E^2 (J.-L. Maire et al., 2013a) final réalisé sur les 32 échantillons du cas d'étude	131
5.1	Logo de l'outil INSENSO	136
5.2	Architecture de l'outil logiciel INSENSO	137
5.3	Vue d'accueil de l'interface d'INSENSO	139
5.4	Diagramme condensé des classes génériques développées pour échanger les connaissances	140

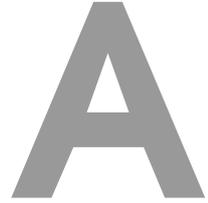
5.5	Diagramme des classes « complexes » développées pour échanger les connaissances	141
5.6	Extrait du diagramme UML des classes dédiées aux modules	141
5.7	Cas d'utilisation du module Formalisation	142
5.8	Cas d'utilisation du module Représentation	143
5.9	Cas d'utilisation du module Enrichissement	143
5.10	Capture d'écran de l'interface développée pour interagir de manière générique avec la base de connaissance	144
5.11	Cas d'utilisation du module Produits	145
5.12	Capture d'écran de l'interface du module Produits	145
5.13	Cas d'utilisation du module Projets	146
5.14	Capture d'écran de l'interface du module Projets	146
5.15	Cas d'utilisation du module Description	147
5.16	Capture d'écran de l'interface : sélection du vocabulaire	148
5.17	Capture d'écran de l'interface : formalisation de la description	149
5.18	Capture d'écran de l'interface : définition des anomalies	149
5.19	Cas d'utilisation du module Protocoles	150
5.20	Cas d'utilisation du module Tolérances	150
5.21	Capture d'écran de l'interface : définition tolérances et référentiel de contrôle	151
5.22	Capture d'écran de l'interface : test de variabilité final, par sensation . . .	151
6.1	Comparaison des associations obtenues avec le modèle actuel et grâce à la méthode <i>LDA</i>	158
6.2	Les échantillons de bracelet pendant la mesure sur l'appareil Altimet 520	163
6.3	Illustration de l'état de surface des échantillons de bracelet (en trois dimensions)	164
6.4	Niveaux de profondeur en μm de l'état de surface des échantillons de bracelet	164
6.5	Visualisation fréquentielle de l'état de surface grâce à une analyse FFT . .	164
6.6	Graphe des effets des paramètres de rugosité des bracelets sur la gravité des anomalies d'adhérence	166
6.7	Graphe des effets de paramètres de fabrication des bracelets sur la gravité des anomalies d'adhérence	167
C.1	Résultats des analyses ANOVA et Kruskal-Wallis pour la sensation relief	12
C.2	Résultats des écarts d'intensité de la sensation relief entre les 12 conditions d'exploration	13
C.3	Modèle simple d'influence de l'exploration sur la perception de l'intensité de relief : (a) graphe d'effets des facteurs, (b) prévisions d'effets, (c) graphes d'écart entre résidus et valeurs prédites	14
C.4	Modèle plus complexe (avec interactions) d'influence de l'exploration sur la perception de l'intensité de relief : (a) graphe d'effets des facteurs, (b) prévisions d'effets, (c) graphes d'écart entre résidus et valeurs prédites . .	15
C.5	Résultats des analyses ANOVA et Kruskal-Wallis pour la sensation adhérence	16
C.6	Résultats des écarts d'intensité de la sensation adhérence entre les 12 conditions d'exploration	16

C.7	Modèle simple d'influence de l'exploration sur la perception de l'intensité d'adhérence : (a) graphe d'effets des facteurs, (b) prévisions d'effets, (c) graphes d'écart entre résidus et valeurs prédites	17
C.8	Modèle plus complexe (avec interactions) d'influence de l'exploration sur la perception de l'intensité d'adhérence : (a) graphe d'effets des facteurs, (b) prévisions d'effets, (c) graphes d'écart entre résidus et valeurs prédites	18
C.9	Facteurs influent significativement sur la variabilité des mesures (écart-type des résultats pour les sensations de relief et d'adhérence)	19
C.10	Exemple de protocoles pour le contrôle des anomalies de relief et d'adhérence proposées pour le cas d'étude PIAGET	20
D.1	Diagramme condensé des classes génériques développées pour échanger les connaissances au sein du système d' INSENSO	22
D.2	Diagramme des classes dédiées au modules de l'outil INSENSO	24
D.3	Diagramme de séquence du cas d'utilisation « Interaction générique BDC globale » du module Représentation	25
D.4	Diagramme de séquence du cas d'utilisation « Interaction générique BDC expérience » du module Enrichissement	25
D.5	Capture d'écran de l'interface : définition de la problématique de contrôle	26
D.6	Capture d'écran de l'interface : définition ou génération des échantillons .	27
D.7	Capture d'écran de l'interface : test initial de variabilité	27
D.8	Capture d'écran de l'interface : expression du vocabulaire	28
D.9	Capture d'écran de l'interface : formalisation de la description	28
D.10	Capture d'écran de l'interface : enrichissement des associations descripteurs - sensations	29
D.11	Capture d'écran de l'interface : définition des anomalies	29
D.12	Capture d'écran du formulaire d'aide à la sélection des descripteurs associés aux anomalies	30
D.13	Capture d'écran de l'interface : sélection des modes d'exploration	30
D.14	Capture d'écran de l'interface : analyse de l'influence de l'exploration sur la perception	31
D.15	Capture d'écran de l'interface : définition des grilles d'évaluation	31
D.16	Capture d'écran de l'interface : évaluation des échantillons	32
D.17	Capture d'écran de l'interface : définition tolérances et référentiel de contrôle	32
D.18	Capture d'écran de l'interface : test final de variabilité , par sensation	33

Liste des tableaux

1.1	Les récepteurs sensoriels – informations et illustrations tirées de (Benson & Ohta, 1986; Chelewiak & Collins, 1991; De Boissieu, 2010; De Rossi & Scilingo, 2006; Johansson & Vallbo, 1983; S. Lederman & Klatzky, 2009; S. J. Lederman & Klatzky, 1987; Purves et al., 2001; University of Washington, 2009)	18
1.2	Corpus des textes (français et anglais datés entre 1968 et 2017) étudiés pour la recherche des mots utilisés dans la description des sensations du toucher	21
1.3	Liste de dix descripteurs proposée par Bassereau (Bassereau, 1995)	24
2.1	Les 9 sensations élémentaires haptiques identifiées et leurs 4 principaux descripteurs de référence	50
2.2	Les sensations haptiques élémentaires (dénominations et définitions)	50
2.3	Relations entre catégories de sensation, stimuli impliqués, mode d’exploration et effecteurs préférentiels	51
2.4	Analyse hiérarchique de huit descripteurs de référence de la sensation relief (code EHS 2)	53
2.5	Pourcentage de relations entre chaque catégorie de sensation	60
2.6	Liste des 20 premiers mots (classés par nombre d’occurrences) trouvés dans les sources (Crochemore et al., 2003; Okamoto et al., 2013; SynTouch, 2017) et présents dans notre base de mots	64
2.7	Liste des descripteurs principaux des méthodes existantes (Crochemore et al., 2003; Okamoto et al., 2013; SynTouch, 2017)	65
2.8	Résultats de comparaison des associations aux catégories du modèle proposé et des modèles reconstitués des méthodes de Okamoto et al. (2013) (a), Sensotact (Crochemore et al., 2003) (b) et SynTouch (2017) (c)	66
3.1	Alignements des concepts de l’ontologie <i>SP</i> proposée sur ceux de l’ontologie <i>SSN</i>	86
4.1	Exemple (réduit) des mots sélectionnés dans le cas d’étude du bracelet de montre	109
4.2	Liste de quelques paramètres d’exploration	117
4.3	Plan d’expérience pour l’analyse de l’influence de l’exploration sur la mesure de l’intensité des sensations élémentaires	118
4.4	Table de calcul de la gravité d’une anomalie	124
4.5	Résultats de l’évaluation par un expert d’un sous-ensemble d’échantillons pour la définition des tolérances des anomalies de relief	127

4.6	Règle utilisée pour simplifier le calcul de la gravité d’anomalie et la décision de conformité partielle associée (pour la sensation de relief)	130
6.1	Conformité et valeurs d’évaluation de la gravité des anomalies pour les échantillons du cas d’étude	163
6.2	Matrice de corrélation entre la gravité des anomalies d’adhérence et les paramètres de rugosité les plus fortement corrélés	165
A.1	Extrait des résultats bruts du test initial de variabilité	2
A.2	Extrait des résultats bruts de l’évaluation pour le test final de variabilité	3
A.3	Extrait des résultats de gravité pour le test final de variabilité	3
A.4	Extrait des résultats de décision pour le test final de variabilité	3
A.5	Comparaison des résultats de conformité entre les tests initial et final de variabilité, ainsi que par rapport au consensus de conformité expert	4
B.1	Métriques de l’ontologie feliCity (sans l’intégration du modèle de description).	10
C.1	Résumé des résultats pour chaque condition d’exploration pour la sensation relief	12
C.2	Résumé des résultats pour chaque condition d’exploration pour la sensation adhérence	16
E.1	Relations entre catégories de sensation et les appareils et capteurs potentiellement adaptés pour leur instrumentation.	38



Détails des tests de variabilité du cas
d'étude PIAGET

Test initial de variabilité

R²&E²		(0: anomalie non détectée, 1: anomalie détectée mais jugée acceptable, 2: anomalie détectée et jugée non acceptable)						Température : 20°C		Humidité : 50%HR		
N° échantillon	Contrôleur 1		Homme Poste : Expert réalisation gravure, bijoutier chainiste		Contrôleur 2		Femme Poste : Bijoutier (formation interne)		Contrôleur 3		Femme Poste : Contrôleuse produit fini, bijoutière, bonne connaissance technique;	
	Eval 1	Eval 2	Commentaires		Eval 1	Eval 2	Commentaires		Eval 1	Eval 2	Commentaires	
1	1	1	Trop lisse		2	2	Trop lisse		0	1		
2	0	0			2	1			1	0		
3	0	0			1	0	Profond		1	1		
4	1	0			2	0			1	0	Gratte	
25	0	2	trop agressif		2	2	Ca arrache, ça gratte, agressif		2	0	Trop profond	
26	0	0			2	2			2	0		
27	0	2	Agressif		2	2			2	2	Trop profond	
28	1	1			1	1	Différence de gravage		0	2	Pas assez de gravage	
29	0	0	Moins lisse		2	1	Trop léger		0	1		
30	1	0	Lisse		1	2			0	1		
31	1	0			0	2			0	0		
32	0	0			2	2	Trop profond		2	0		
Commentaires exploration	Effectue des mouvement dans toute les directions. Touche légèrement la face B, il ne semble pas l'évaluer en même temps, mais il compare quand même inconsciemment. Remarque : le doigt fatigue, "prend conscience au fur et à mesure". Influence échantillon tenu ou non.				Utilisation du majeur (trouvé le + sensible) et d'autres doigts, par forcément l'index qui est sont doigt le plus utilisé car le plus utilisé. Utilisation des ongles également. Utilisation du bruit également, qd gratte avec les ongles. Arrêt de quelques secondes pour reposer les doigts (doigts engourdis à force de toucher les échantillons et d'avoir des sensation proches). Pas la même sensation obtenue suivant l'angle de contact du doigt avec la surface. Pas la même note si on appui fort ou pas.				Mouvements très lents, toujours ou presque dans le même sens (en tirant le doigt) pouce ou index utilisés.			



Tableau A.1 – Extrait des résultats bruts du test initial de variabilité

Test final de variabilité

Evaluation																										
N° échantillon	Adhérence												Relief													
	Contrôle 1				Contrôle 2				Contrôle 3				Contrôle 1				Contrôle 2				Contrôle 3					
	Eval 1		Eval 2		Eval 1		Eval 2		Eval 1		Eval 2		Eval 1		Eval 2		Eval 1		Eval 2		Eval 1		Eval 2			
	Cn	C-	C+	Cn	C-	C+	Cn	C-	C+	Cn	C-	C+	Cn	C-	C+	Cn	C-	C+	Cn	C-	C+	Cn	C-	C+	Cn	C-
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	-1	0	-1	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
25	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
28	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
29	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	-1	-1	-1
30	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	-1	-1	-1
31	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau A.2 – Extrait des résultats bruts de l'évaluation pour le test final de variabilité

Gravité															
N° échantillon	Adhérence						Relief								
	Contrôle 1		Contrôle 2		Contrôle 3		Contrôle 1		Contrôle 2		Contrôle 3				
	Eval 1	Eval 2													
1	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-1	-2	-2	0			
2	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-2	0	0			
3	0	1	0	2	1	0	0	0	1	0	0	0			
4	0	0	0	0	0	0	-4	-4	-4	-4	-4	-2			
25	2	4	4	4	1	1	4	4	4	4	4	4			
26	4	4	4	3	1	1	2	0	4	0	0	3			
27	4	4	4	4	2	3	4	4	4	4	4	4			
28	4	0	4	0	0	0	-4	-4	-4	-4	-4	-4			
29	2	0	2	0	0	0	0	-4	0	-4	-4	-2			
30	4	0	2	0	0	0	0	-4	0	-4	-4	-4			
31	2	0	2	0	0	0	1	0	1	0	0	0			
32	2	4	2	4	2	1	0	0	0	0	0	0			

Tableau A.3 – Extrait des résultats de gravité pour le test final de variabilité

Décision																																
N° échantillon	Adhérence												Relief						Evaluation globale						Conformité globale							
	Contrôle 1				Contrôle 2				Contrôle 3				Contrôle 1		Contrôle 2		Contrôle 3		Contrôle 1		Contrôle 2		Contrôle 3		Contrôle 1		Contrôle 2		Contrôle 3			
	Eval 1		Eval 2		Eval 1		Eval 2		Eval 1		Eval 2		Eval 1		Eval 2		Eval 1		Eval 2		Eval 1		Eval 2		Eval 1		Eval 2		Eval 1		Eval 2	
	Seuil +:	2	Seuil -:	-1	Seuil +:	3	Seuil +:	2	Seuil -:	-1	Seuil +:	3	Seuil +:	2	Seuil -:	-1	Seuil +:	3	Seuil +:	2	Seuil -:	-1	Seuil +:	3	Seuil +:	2	Seuil -:	-1	Seuil +:	3		
1	0	0	0	0	0	0	1	2	1	2	2	0	1	2	1	2	2	0	OK	KO	OK	KO	KO	OK	OK	OK	OK	OK	OK			
2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	1	0	2	0	0	OK	OK	OK	KO	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK			
3	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK			
4	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO			
25	1	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO			
26	2	2	2	2	1	1	1	0	2	0	0	1	2	2	2	2	2	1	1	KO	KO	KO	KO	OK	OK	OK	OK	OK	OK			
27	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO			
28	2	0	2	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO			
29	1	0	1	0	0	0	0	2	0	2	2	2	1	2	1	2	2	2	OK	KO	OK	OK	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO			
30	2	0	1	0	0	0	0	2	0	2	2	2	2	2	1	2	2	2	KO	KO	OK	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO			
31	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK			
32	1	2	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	1	2	1	2	1	1	OK	KO	OK	KO	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK			

Tableau A.4 – Extrait des résultats de décision pour le test final de variabilité

Comparaison des résultats

N° échantillon	Consensus expert	Test initial de variabilité						Test final de variabilité					
		Contrôleur 1		Contrôleur 2		Contrôleur 3		Contrôleur 1		Contrôleur 2		Contrôleur 3	
		Eval 1	Eval 2	Eval 1	Eval 2	Eval 1	Eval 2	Eval 1	Eval 2	Eval 1	Eval 2	Eval 1	Eval 2
1	KO	OK	OK	KO	KO	OK	OK	OK	KO	OK	KO	KO	OK
2	OK	OK	OK	KO	OK	OK	OK	OK	OK	OK	KO	OK	OK
3	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
4	KO	OK	OK	KO	OK	OK	OK	KO	KO	KO	KO	KO	KO
25	KO	OK	KO	KO	KO	KO	OK	KO	KO	KO	KO	KO	KO
26	KO	OK	OK	KO	KO	KO	OK	KO	KO	KO	KO	OK	OK
27	KO	OK	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO
28	KO	OK	OK	OK	OK	OK	KO	KO	KO	KO	KO	KO	KO
29	KO	OK	OK	KO	OK	OK	OK	OK	KO	OK	KO	KO	KO
30	KO	OK	OK	OK	KO	OK	OK	KO	KO	OK	KO	KO	KO
31	OK	OK	OK	OK	KO	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
32	KO	OK	OK	KO	KO	KO	OK	OK	KO	OK	KO	OK	OK

Tableau A.5 – Comparaison des résultats de conformité entre les tests initial et final de variabilité, ainsi que par rapport au consensus de conformité expert

B

Détails de la représentation ontologique

Exemple de représentation ontologique dans le format *OWL* : représentation du descripteur *Leathery*

```

<!-- http://www.ineva.fr/ontologies/2017/FelicityOnto#Leathery -->
<owl:Class rdf:about="http://www.ineva.fr/ontologies/2017/FelicityOnto#Leathery">
  <rdfs:subClassOf rdf:resource="http://www.ineva.fr/ontologies/2017/FelicityOnto#Descriptor"/>
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
      <owl:onProperty rdf:resource="http://www.ineva.fr/ontologies/2017/FelicityOnto#hasLanguage"/>
      <owl:allValuesFrom rdf:resource="http://www.ineva.fr/ontologies/2017/FelicityOnto#En"/>
    </owl:Restriction>
  </rdfs:subClassOf>
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
      <owl:onProperty rdf:resource="http://www.ineva.fr/ontologies/2017/FelicityOnto#hasTranslation"/>
      <owl:allValuesFrom rdf:resource="http://www.ineva.fr/ontologies/2017/FelicityOnto#Tann"/>
    </owl:Restriction>
  </rdfs:subClassOf>
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
      <owl:onProperty rdf:resource="http://www.ineva.fr/ontologies/2017/FelicityOnto#isAntonymOf"/>
      <owl:allValuesFrom>
        <owl:Class>
          <owl:intersectionOf rdf:parseType="Collection">
            <rdf:Description rdf:about="http://www.ineva.fr/ontologies/2017/FelicityOnto#Smooth"/>
            <owl:Restriction>
              <owl:onProperty rdf:resource="http://www.ineva.fr/ontologies/2017/FelicityOnto#fuzzyCoefficient"/>
              <owl:allValuesFrom>
                <rdfs:Datatype>
                  <owl:onDatatype rdf:resource="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double"/>
                  <owl:withRestrictions rdf:parseType="Collection">
                    <rdf:Description>
                      <xsd:minInclusive rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">1.0</xsd:minInclusive>
                    </rdf:Description>
                    <rdf:Description>
                      <xsd:maxInclusive rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">1.0</xsd:maxInclusive>
                    </rdf:Description>
                  </owl:withRestrictions>
                </rdfs:Datatype>
              </owl:allValuesFrom>
            </owl:Restriction>
          </owl:intersectionOf>
        </owl:Class>
      </owl:allValuesFrom>
    </owl:Restriction>
  </rdfs:subClassOf>
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
      <owl:onProperty rdf:resource="http://www.ineva.fr/ontologies/2017/FelicityOnto#isRepresentedBy"/>
      <owl:allValuesFrom>
        <owl:Class>
          <owl:intersectionOf rdf:parseType="Collection">
            <rdf:Description rdf:about="http://www.ineva.fr/ontologies/2017/FelicityOnto#Hardness"/>
            <owl:Restriction>
              <owl:onProperty rdf:resource="http://www.ineva.fr/ontologies/2017/FelicityOnto#fuzzyAssociation"/>

```

```

        <owl:allValuesFrom>
          <rdfs:Datatype>
            <owl:onDatatype rdf:resource="http://www.w3.org
/2001/XMLSchema#double"/>
            <owl:withRestrictions rdf:parseType="Collection">
              <rdf:Description>
                <xsd:minInclusive rdf:datatype="http://www.
w3.org/2001/XMLSchema#double">1.0</xsd:minInclusive>
              </rdf:Description>
              <rdf:Description>
                <xsd:maxInclusive rdf:datatype="http://www.
w3.org/2001/XMLSchema#double">1.0</xsd:maxInclusive>
              </rdf:Description>
            </owl:withRestrictions>
          </rdfs:Datatype>
        </owl:allValuesFrom>
      </owl:Restriction>
    <owl:Restriction>
      <owl:onProperty rdf:resource="http://www.ineva.fr/ontologies
/2017/FelicityOnto#semanticIntensityAverage"/>
      <owl:allValuesFrom>
        <rdfs:Datatype>
          <owl:onDatatype rdf:resource="http://www.w3.org
/2001/XMLSchema#double"/>
          <owl:withRestrictions rdf:parseType="Collection">
            <rdf:Description>
              <xsd:minInclusive rdf:datatype="http://www.
w3.org/2001/XMLSchema#double">4.0</xsd:minInclusive>
            </rdf:Description>
            <rdf:Description>
              <xsd:maxInclusive rdf:datatype="http://www.
w3.org/2001/XMLSchema#double">4.0</xsd:maxInclusive>
            </rdf:Description>
          </owl:withRestrictions>
        </rdfs:Datatype>
      </owl:allValuesFrom>
    </owl:Restriction>
    <owl:Restriction>
      <owl:onProperty rdf:resource="http://www.ineva.fr/ontologies
/2017/FelicityOnto#semanticIntensityRange"/>
      <owl:allValuesFrom>
        <rdfs:Datatype>
          <owl:onDatatype rdf:resource="http://www.w3.org
/2001/XMLSchema#double"/>
          <owl:withRestrictions rdf:parseType="Collection">
            <rdf:Description>
              <xsd:minInclusive rdf:datatype="http://www.
w3.org/2001/XMLSchema#double">0.5</xsd:minInclusive>
            </rdf:Description>
            <rdf:Description>
              <xsd:maxInclusive rdf:datatype="http://www.
w3.org/2001/XMLSchema#double">0.5</xsd:maxInclusive>
            </rdf:Description>
          </owl:withRestrictions>
        </rdfs:Datatype>
      </owl:allValuesFrom>
    </owl:Restriction>
  </owl:intersectionOf>
</owl:Class>
</owl:allValuesFrom>
</owl:Restriction>
</rdfs:subClassOf>
<rdfs:subClassOf>
  <owl:Restriction>
    <owl:onProperty rdf:resource="http://www.ineva.fr/ontologies/2017/
FelicityOnto#isRepresentedBy"/>
    <owl:allValuesFrom>
      <owl:Class>
        <owl:intersectionOf rdf:parseType="Collection">
          <rdf:Description rdf:about="http://www.ineva.fr/ontologies/2017/
FelicityOnto#Relief"/>
        </owl:intersectionOf>
      </owl:Class>
    </owl:allValuesFrom>
  </owl:Restriction>

```

```

        <owl:onProperty rdf:resource="http://www.ineva.fr/ontologies
/2017/FelicityOnto#fuzzyAssociation"/>
        <owl:allValuesFrom>
            <rdfs:Datatype>
                <owl:onDatatype rdf:resource="http://www.w3.org
/2001/XMLSchema#double"/>
                <owl:withRestrictions rdf:parseType="Collection">
                    <rdf:Description>
                        <xsd:minInclusive rdf:datatype="http://www.
w3.org/2001/XMLSchema#double">0.9</xsd:minInclusive>
                    </rdf:Description>
                    <rdf:Description>
                        <xsd:maxInclusive rdf:datatype="http://www.
w3.org/2001/XMLSchema#double">0.9</xsd:maxInclusive>
                    </rdf:Description>
                </owl:withRestrictions>
            </rdfs:Datatype>
        </owl:allValuesFrom>
    </owl:Restriction>
    <owl:Restriction>
        <owl:onProperty rdf:resource="http://www.ineva.fr/ontologies
/2017/FelicityOnto#semanticIntensityAverage"/>
        <owl:allValuesFrom>
            <rdfs:Datatype>
                <owl:onDatatype rdf:resource="http://www.w3.org
/2001/XMLSchema#double"/>
                <owl:withRestrictions rdf:parseType="Collection">
                    <rdf:Description>
                        <xsd:minInclusive rdf:datatype="http://www.
w3.org/2001/XMLSchema#double">4.5</xsd:minInclusive>
                    </rdf:Description>
                    <rdf:Description>
                        <xsd:maxInclusive rdf:datatype="http://www.
w3.org/2001/XMLSchema#double">4.5</xsd:maxInclusive>
                    </rdf:Description>
                </owl:withRestrictions>
            </rdfs:Datatype>
        </owl:allValuesFrom>
    </owl:Restriction>
    <owl:Restriction>
        <owl:onProperty rdf:resource="http://www.ineva.fr/ontologies
/2017/FelicityOnto#semanticIntensityRange"/>
        <owl:allValuesFrom>
            <rdfs:Datatype>
                <owl:onDatatype rdf:resource="http://www.w3.org
/2001/XMLSchema#double"/>
                <owl:withRestrictions rdf:parseType="Collection">
                    <rdf:Description>
                        <xsd:minInclusive rdf:datatype="http://www.
w3.org/2001/XMLSchema#double">1.0</xsd:minInclusive>
                    </rdf:Description>
                    <rdf:Description>
                        <xsd:maxInclusive rdf:datatype="http://www.
w3.org/2001/XMLSchema#double">1.0</xsd:maxInclusive>
                    </rdf:Description>
                </owl:withRestrictions>
            </rdfs:Datatype>
        </owl:allValuesFrom>
    </owl:Restriction>
</owl:intersectionOf>
</owl:Class>
</owl:allValuesFrom>
</owl:Restriction>
</rdfs:subClassOf>
<rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
        <owl:onProperty rdf:resource="http://www.ineva.fr/ontologies/2017/
FelicityOnto#isSynonymOf"/>
        <owl:allValuesFrom>
            <owl:Class>
                <owl:intersectionOf rdf:parseType="Collection">
                    <rdf:Description rdf:about="http://www.ineva.fr/ontologies/2017/
FelicityOnto#Rough"/>

```

```

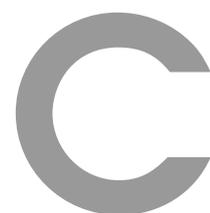
        <owl:Restriction>
          <owl:onProperty rdf:resource="http://www.ineva.fr/ontologies
/2017/FelicityOnto#fuzzyCoefficient"/>
          <owl:allValuesFrom>
            <rdfs:Datatype>
              <owl:onDatatype rdf:resource="http://www.w3.org
/2001/XMLSchema#double"/>
              <owl:withRestrictions rdf:parseType="Collection">
                <rdf:Description>
                  <xsd:minInclusive rdf:datatype="http://www.
w3.org/2001/XMLSchema#double">0.8</xsd:minInclusive>
                  </rdf:Description>
                  <rdf:Description>
                    <xsd:maxInclusive rdf:datatype="http://www.
w3.org/2001/XMLSchema#double">0.8</xsd:maxInclusive>
                    </rdf:Description>
                  </owl:withRestrictions>
                </rdfs:Datatype>
              </owl:allValuesFrom>
            </owl:Restriction>
          </owl:intersectionOf>
        </owl:Class>
      </owl:allValuesFrom>
    </owl:Restriction>
  </rdfs:subClassOf>
<rdfs:subClassOf>
  <owl:Restriction>
    <owl:onProperty rdf:resource="http://www.ineva.fr/ontologies/2017/
FelicityOnto#isSynonymOf"/>
    <owl:allValuesFrom>
      <owl:Class>
        <owl:intersectionOf rdf:parseType="Collection">
          <rdf:Description rdf:about="http://www.ineva.fr/ontologies/2017/
FelicityOnto#Tough"/>
          <owl:Restriction>
            <owl:onProperty rdf:resource="http://www.ineva.fr/ontologies
/2017/FelicityOnto#fuzzyCoefficient"/>
            <owl:allValuesFrom>
              <rdfs:Datatype>
                <owl:onDatatype rdf:resource="http://www.w3.org
/2001/XMLSchema#double"/>
                <owl:withRestrictions rdf:parseType="Collection">
                  <rdf:Description>
                    <xsd:minInclusive rdf:datatype="http://www.
w3.org/2001/XMLSchema#double">1.0</xsd:minInclusive>
                    </rdf:Description>
                    <rdf:Description>
                      <xsd:maxInclusive rdf:datatype="http://www.
w3.org/2001/XMLSchema#double">1.0</xsd:maxInclusive>
                      </rdf:Description>
                    </owl:withRestrictions>
                  </rdfs:Datatype>
                </owl:allValuesFrom>
              </owl:Restriction>
            </owl:intersectionOf>
          </owl:Class>
        </owl:allValuesFrom>
      </owl:Restriction>
    </rdfs:subClassOf>
  </owl:Class>

```

Métriques de l'ontologie **feliCity**

Metrics	
Axiom	1174
Logical axiom count	602
Declaration axioms count	432
Class count	312
Object property count	79
Data property count	24
Individual count	3
DL expressivity	ALCRIQ(D)
Class axioms	
SubClassOf	468
EquivalentClasses	16
DisjointClasses	6
GCI count	0
Hidden GCI Count	17
Object property axioms	
SubObjectPropertyOf	29
EquivalentObjectProperties	14
InverseObjectProperties	18
DisjointObjectProperties	6
FunctionalObjectProperty	0
InverseFunctionalObjectProperty	0
TransitiveObjectProperty	0
SymmetricObjectProperty	2
AsymmetricObjectProperty	0
ReflexiveObjectProperty	0
IrreflexiveObjectProperty	0
ObjectPropertyDomain	7
ObjectPropertyRange	8
SubPropertyChainOf	0
Data property axioms	
SubDataPropertyOf	12
EquivalentDataProperties	1
DisjointDataProperties	0
FunctionalDataProperty	0
DataPropertyDomain	0
DataPropertyRange	11
Individual axioms	
ClassAssertion	2
ObjectPropertyAssertion	1
DataPropertyAssertion	1
NegativeObjectPropertyAssertion	0
NegativeDataPropertyAssertion	0
SameIndividual	0
DifferentIndividuals	0
Annotation axioms	
AnnotationAssertion	140
AnnotationPropertyDomain	0
AnnotationPropertyRangeOf	0

Tableau B.1 – Métriques de l'ontologie **feliCity** (sans l'intégration du modèle de description).



Détails de la construction de protocoles de contrôle

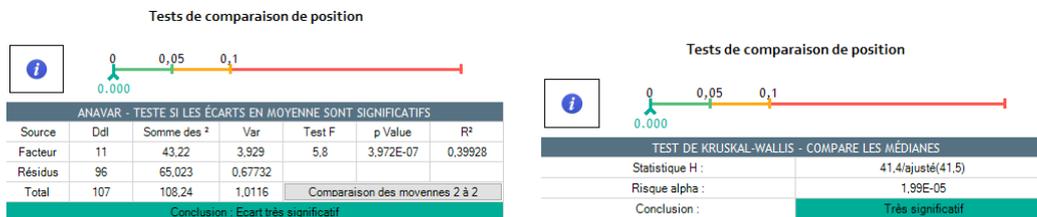
Analyse de l'influence de l'exploration sur l'intensité de sensation perçue

Les figures suivantes⁷¹ donnent les résultats obtenus pour le cas d'étude du bracelet de montre pour les analyses de l'influence de l'exploration sur l'intensité perçue des sensations de relief et d'adhérence.

Sensation de relief

	Cond 1	Cond 2	Cond 3	Cond 4	Cond 5	Cond 6	Cond 7	Cond 8	Cond 9	Cond 10	Cond 11	Cond 12
Nb	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Moyenne	-0,30111	-0,046667	0,28444	-0,16333	-0,74444	-0,28111	-0,34778	-0,63222	0,39556	0,96444	0,45333	1,5011
Médiane	-0,53	-0,37	0,18	0,14	-0,81	-0,53	-0,37	-0,81	0,25	1,02	1,01	1,7
Ecart type	0,559	1,225	0,657	0,835	0,641	0,501	0,891	0,988	0,678	0,631	1,240	0,599

Tableau C.1 – Résumé des résultats pour chaque condition d'exploration pour la sensation relief



a

Figure C.1 – Résultats des analyses ANOVA et Kruskal-Wallis pour la sensation relief

71. Illustrations principalement obtenues grâce au logiciel Ellistat : <https://ellistat.com/>

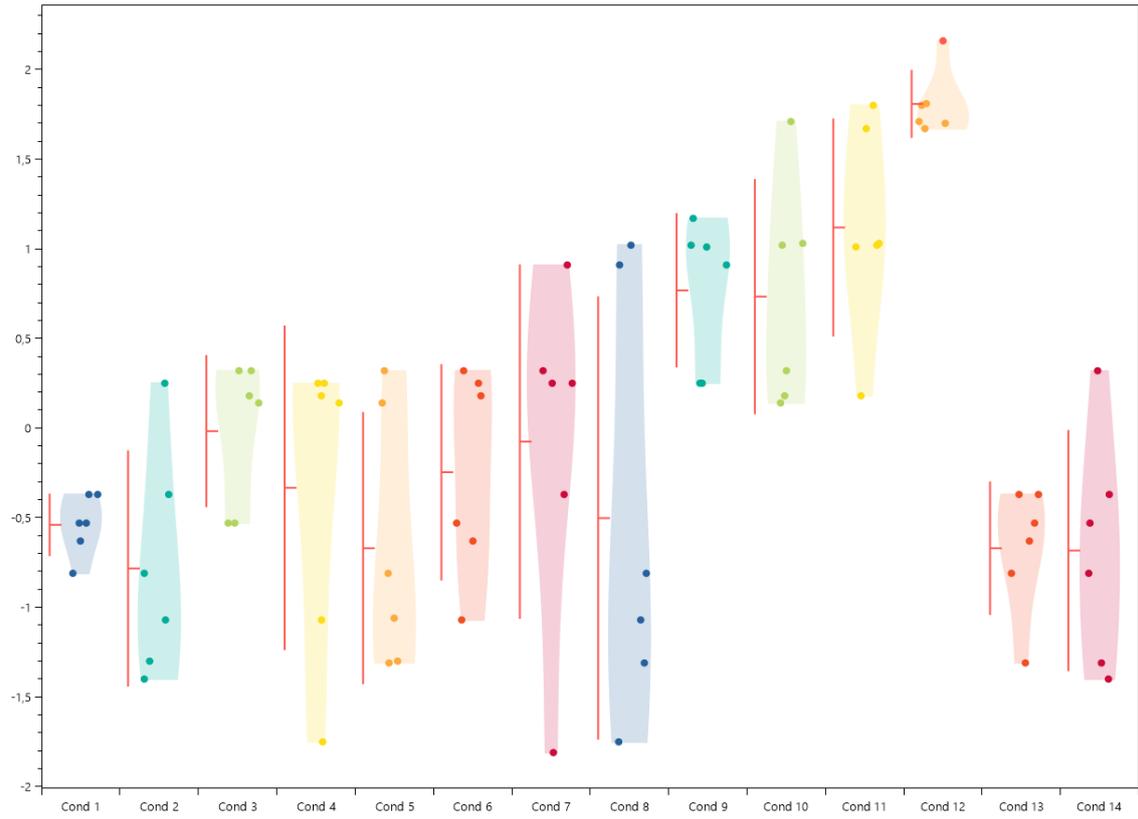
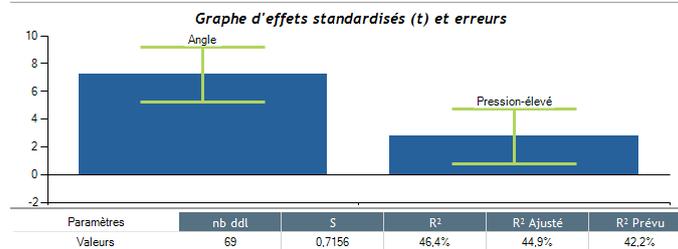


Figure C.2 – Résultats des écarts d'intensité de la sensation *relief* entre les 12 conditions d'exploration

Annexe C. Détails de la construction de protocoles de contrôle

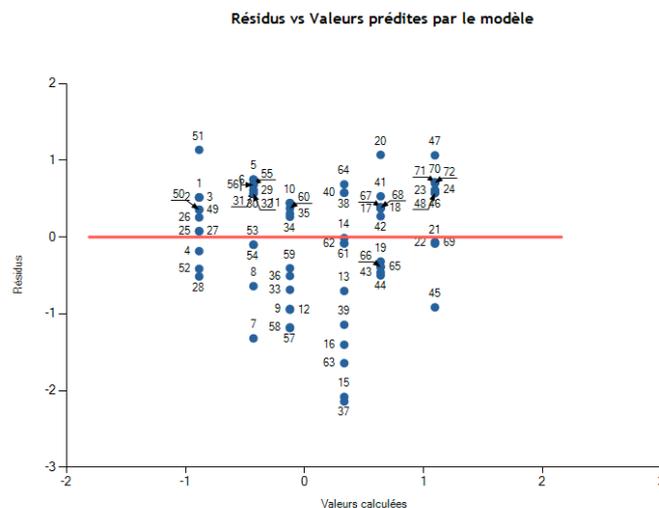
Action	Coef	Sigma	t	Proba p	Signif	éliminer	VIF	VIF
Constante	-1,72472	0,239	-7,230	0,000	Très			
Angle	0,02486	0,003	7,221	0,000	Très	Cliquer	1,00	1,00
Pression-élevé	0,46611	0,169	2,763	0,007	Très	Cliquer	1,00	1,00



(a)



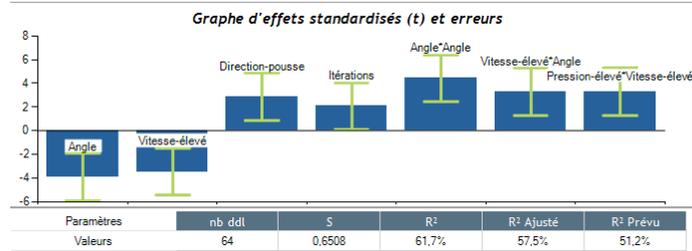
(b)



(c)

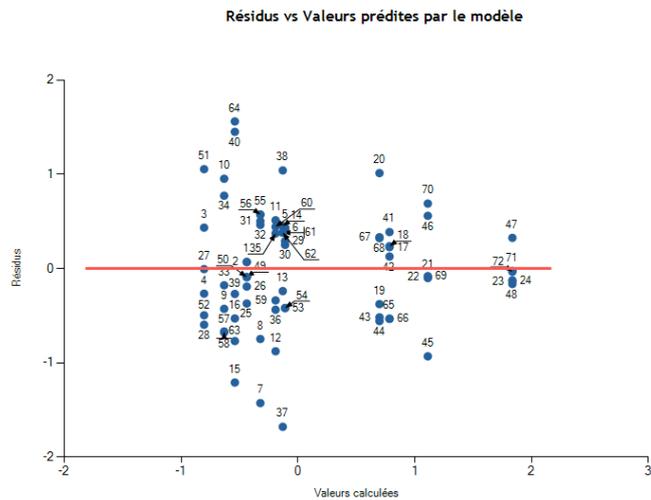
Figure C.3 – Modèle simple d'influence de l'exploration sur la perception de l'intensité de relief : (a) graphe d'effets des facteurs, (b) prévisions d'effets, (c) graphes d'écart entre résidus et valeurs prédites

Action	Coef	Sigma	t	Proba p	Signif	éliminer	VIF	VIF
Constante	1,35507	0,647	2,096	0,040	Oui			
Angle	-0,08916	0,023	-3,933	0,000	Très	Cliquer	52,43	1,00
Vitesse-élevé	-2,65597	0,764	-3,478	0,001	Très	Cliquer	24,79	1,00
Direction-pousse	0,82958	0,293	2,834	0,006	Très	Cliquer	3,64	1,00
Itérations	0,16396	0,079	2,065	0,043	Oui	Cliquer	1,07	1,00
Angle*Angle	0,00080	0,000	4,411	0,000	Très	Cliquer	49,00	
Vitesse-élevé*Angle	0,03778	0,012	3,258	0,002	Très	Cliquer	27,43	
Pression-élevé*Vitesse-élevé	0,80917	0,246	3,290	0,002	Très	Cliquer	1,93	



(a)

(b)



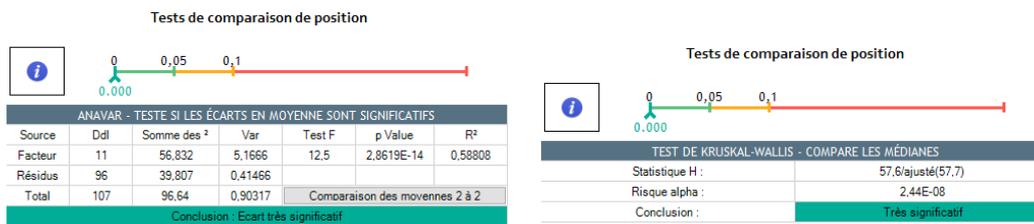
(c)

Figure C.4 – Modèle plus complexe (avec interactions) d'influence de l'exploration sur la perception de l'intensité de relief : (a) graphe d'effets des facteurs, (b) prévisions d'effets, (c) graphes d'écart entre résidus et valeurs prédites

Sensation d'adhérence

	Cond 1	Cond 2	Cond 3	Cond 4	Cond 5	Cond 6	Cond 7	Cond 8	Cond 9	Cond 10	Cond 11	Cond 12
Nb	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Moyenne	-0,65778	0,28667	-0,031111	0,85444	-1,6356	-0,27667	0,57556	-0,20444	0,34111	0,51333	0,67222	1,15
Médiane	-0,73	0,06	0	1,12	-1,53	-0,17	0,73	-0,03	0,08	0,22	0,84	0,98
Ecart type	0,3833	0,870	0,648	0,724	0,3675	0,4058	0,702	0,612	0,610	0,723	0,731	0,728

Tableau C.2 – Résumé des résultats pour chaque condition d'exploration pour la sensation adhérence



a

Figure C.5 – Résultats des analyses ANOVA et Kruskal-Wallis pour la sensation adhérence

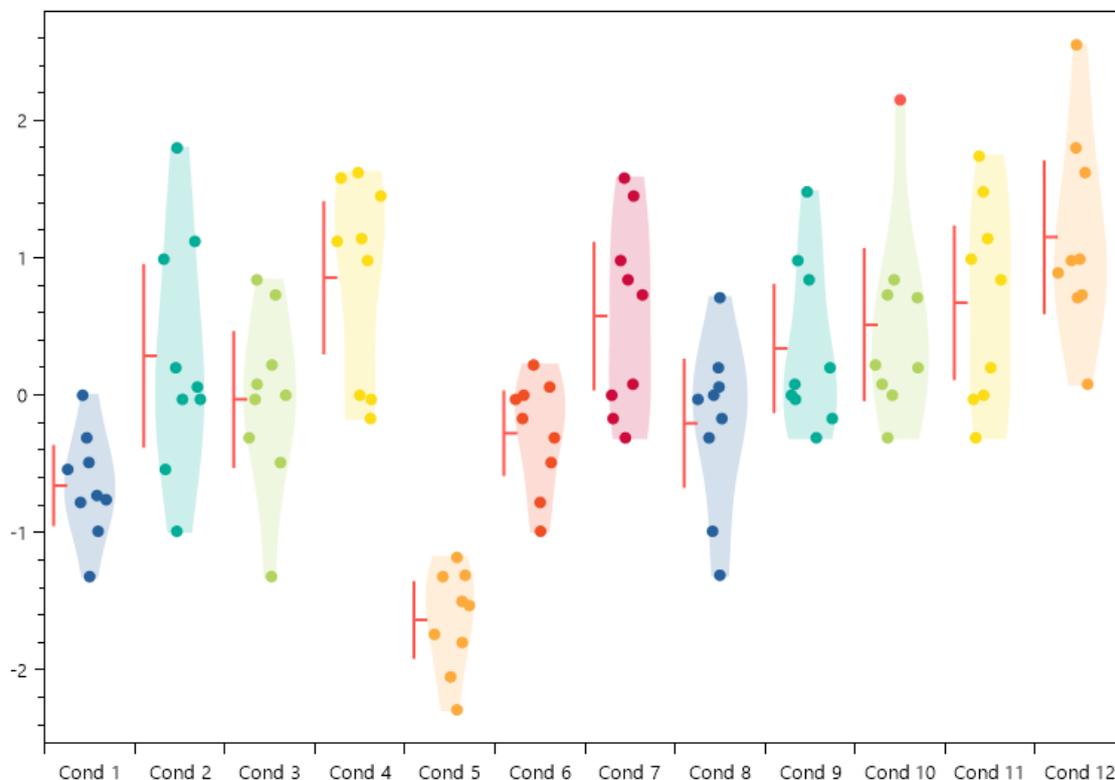
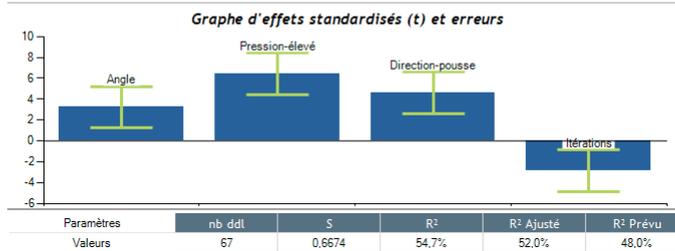


Figure C.6 – Résultats des écarts d'intensité de la sensation adhérence entre les 12 conditions d'exploration

Action	Coef	Sigma	t	Proba p	Signif	éliminer	VIF	VIF
Constante	-1,03653	0,284	-3,655	0,001	Très			
Angle	0,01034	0,003	3,220	0,002	Très	Cliquer	1,00	1,00
Pression-élevé	1,01111	0,157	6,428	0,000	Très	Cliquer	1,00	1,00
Direction-pousse	0,72333	0,157	4,599	0,000	Très	Cliquer	1,00	1,00
Itérations	-0,22556	0,079	-2,868	0,006	Très	Cliquer	1,00	1,00

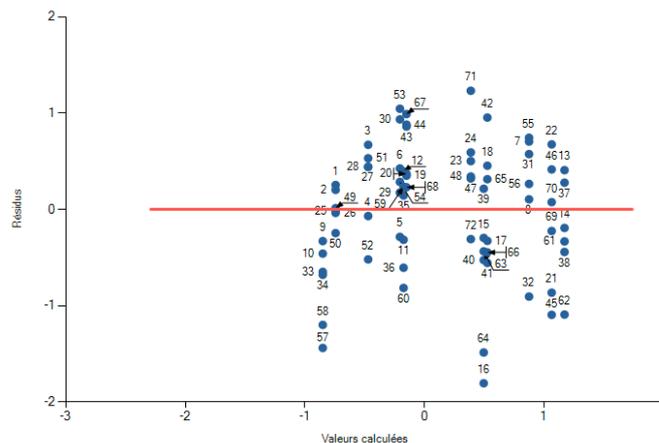


(a)



(b)

Résidus vs Valeurs prédites par le modèle

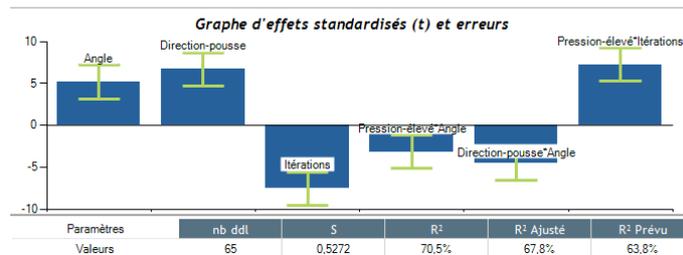


(c)

Figure C.7 – Modèle simple d'influence de l'exploration sur la perception de l'intensité d'adhérence : (a) graphe d'effets des facteurs, (b) prévisions d'effets, (c) graphes d'écart entre résidus et valeurs prédites

Annexe C. Détails de la construction de protocoles de contrôle

Action	Coef	Sigma	t	Proba p	Signif	éliminer	VIF	VIF
Constante	-0,94280	0,270	-3,490	0,001	Très			
Angle	0,02137	0,004	5,186	0,000	Très	Cliquer	2,64	1,00
Direction-pousse	2,45075	0,367	6,686	0,000	Très	Cliquer	8,70	1,00
Itérations	-0,57721	0,076	-7,576	0,000	Très	Cliquer	1,50	1,00
Pression-élevé*Angle	-0,01293	0,004	-3,188	0,002	Très	Cliquer	5,11	
Direction-pousse*Angle	-0,02469	0,005	-4,519	0,000	Très	Cliquer	9,28	
Pression-élevé*Itérations	0,87952	0,122	7,230	0,000	Très	Cliquer	5,75	

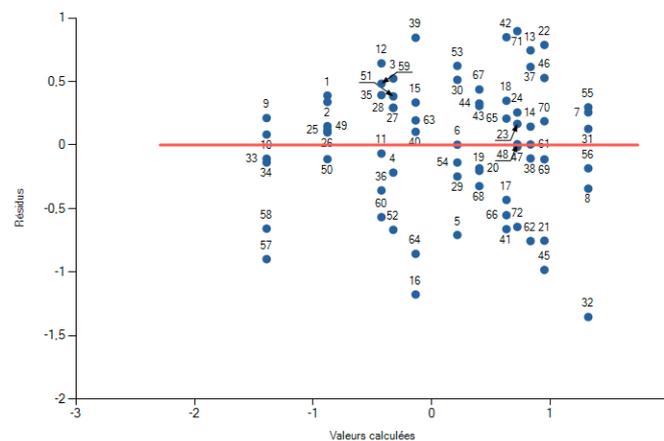


(a)



(b)

Résidus vs Valeurs prédites par le modèle



(c)

Figure C.8 – Modèle plus complexe (avec interactions) d'influence de l'exploration sur la perception de l'intensité d'adhérence : (a) graphe d'effets des facteurs, (b) prévisions d'effets, (c) graphes d'écart entre résidus et valeurs prédites

Influence de l'exploration sur la variabilité

Action	Coef	Sigma	t	Proba p	Signif	éliminer	VIF	VIF
Constante	0,65556	0,080	8,177	0,000	Très			
Vitesse-élevé	0,23889	0,113	2,107	0,043	Oui	Cliquer	1,00	1,00

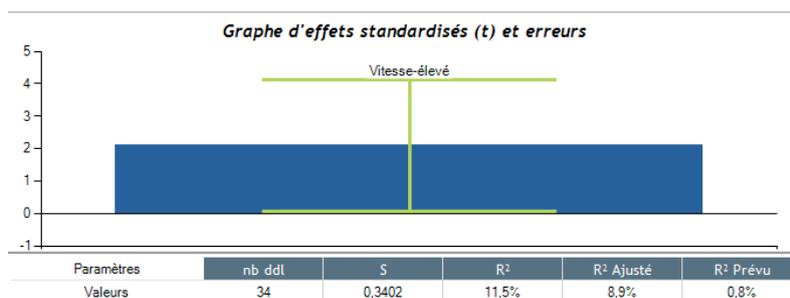


Figure C.9 – Facteurs influent significativement sur la variabilité des mesures (écart-type des résultats pour les sensations de *relief* et d'*adhérence*)

Protocoles de contrôle : grille d'évaluation et règles de tolérances

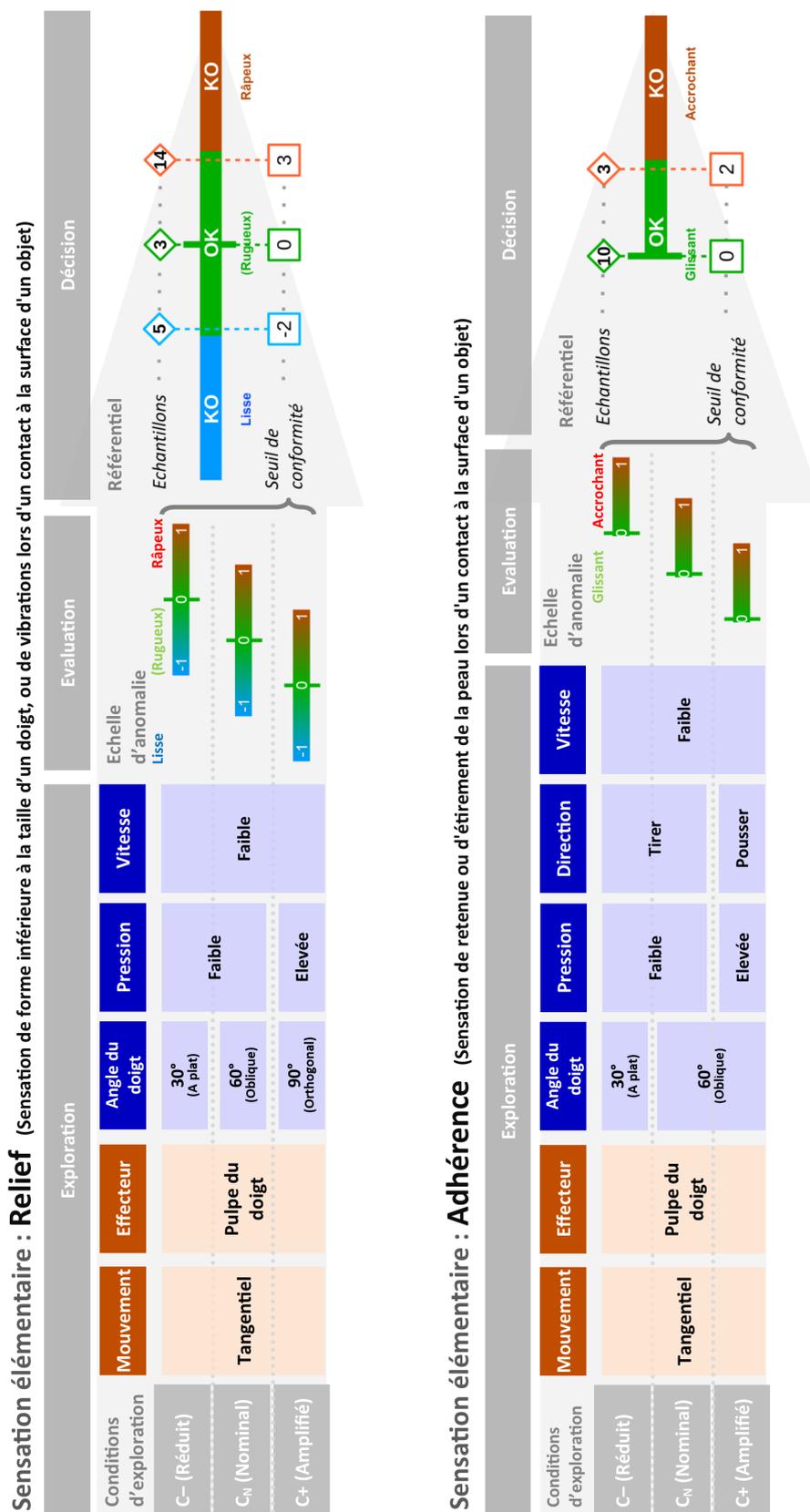


Figure C.10 – Exemple de protocoles pour le contrôle des anomalies de relief et d'adhérence proposées pour le cas d'étude PIAGET



Détails de l'outil **INSENSO**

Diagrammes de classes

Les figure suivantes présentent les diagrammes des classes utilisés pour le développement du logiciel **INSENSO**.

Classes génériques pour l'échange des connaissances

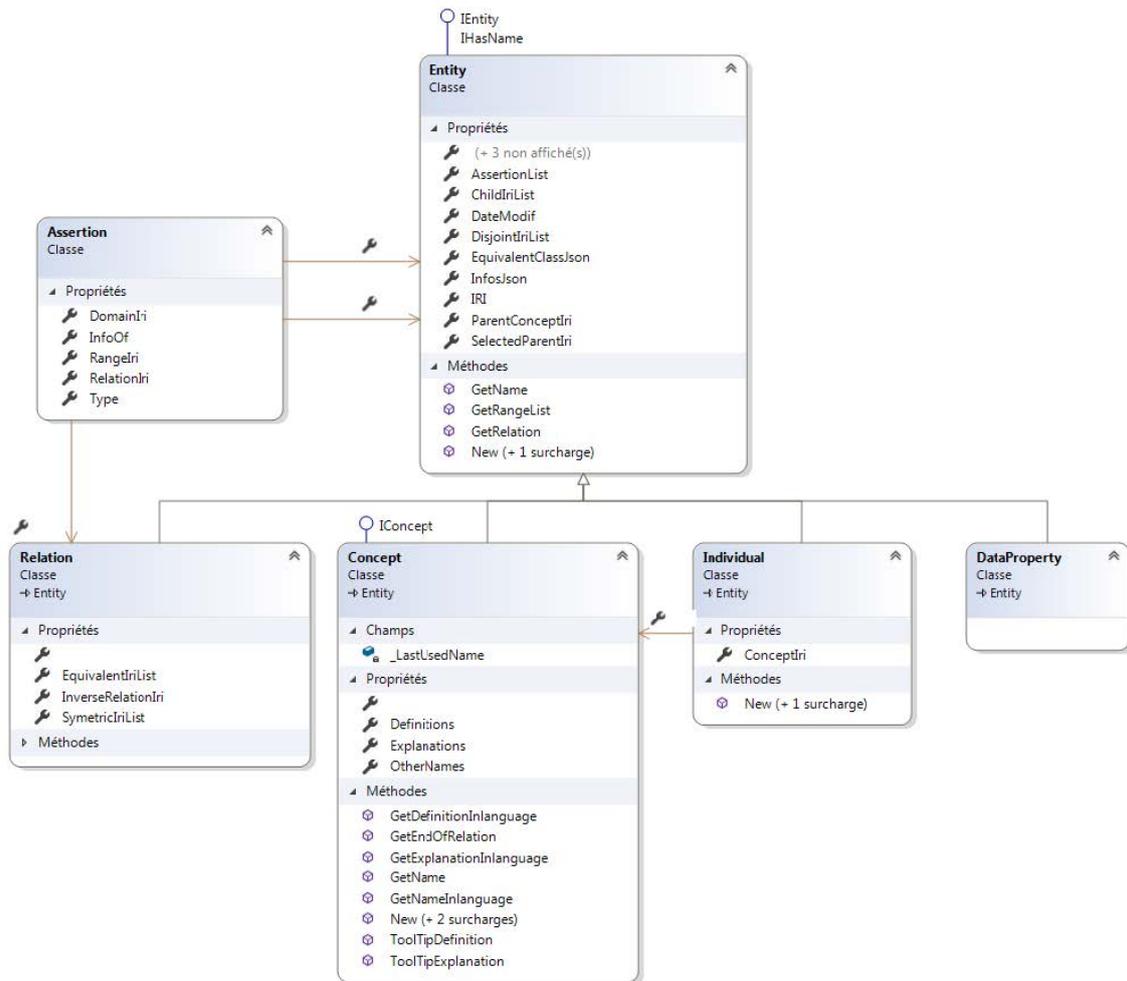
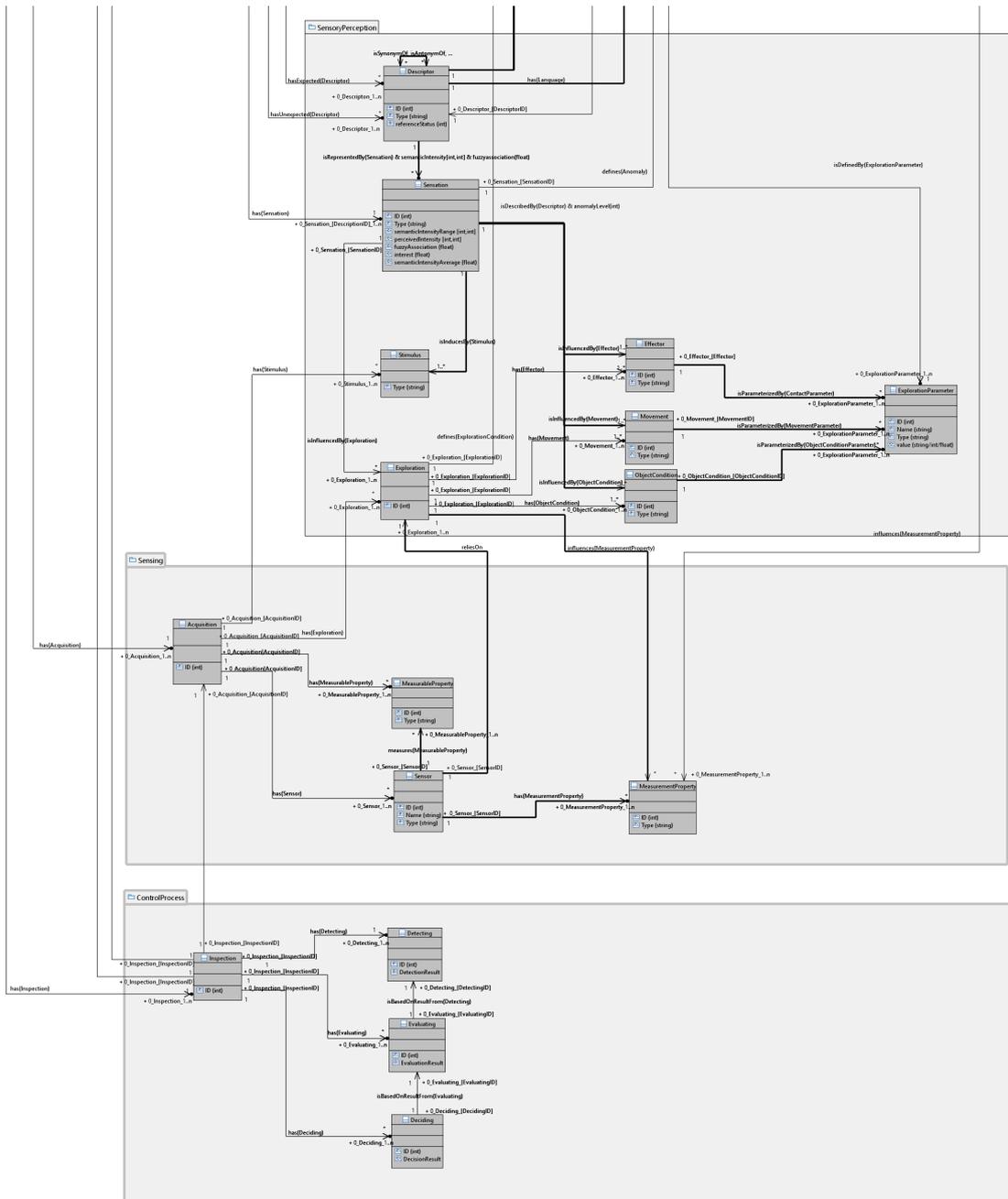


Figure D.1 – Diagramme condensé des classes génériques développées pour échanger les connaissances au sein du système d'**INSENSO**

Classes dédiées aux modules outils



(a)



(b)

Figure D.2 – Diagramme des classes dédiées au modules de l'outil INSENSO

Diagrammes de séquence de l'outil

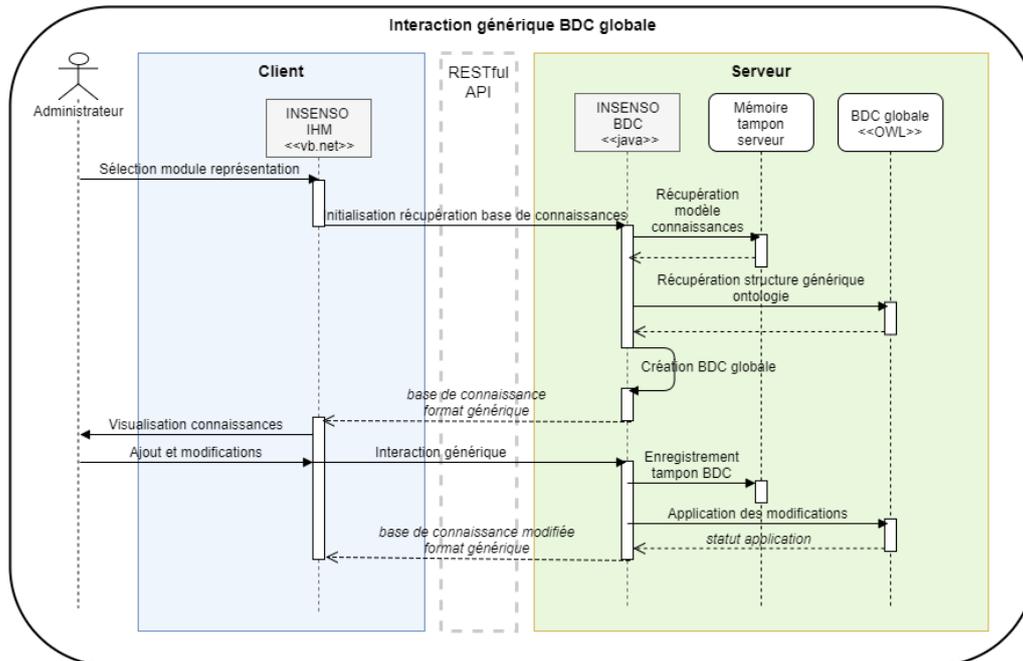


Figure D.3 – Diagramme de séquence du cas d'utilisation « Interaction générique BDC globale » du module **Représentation**

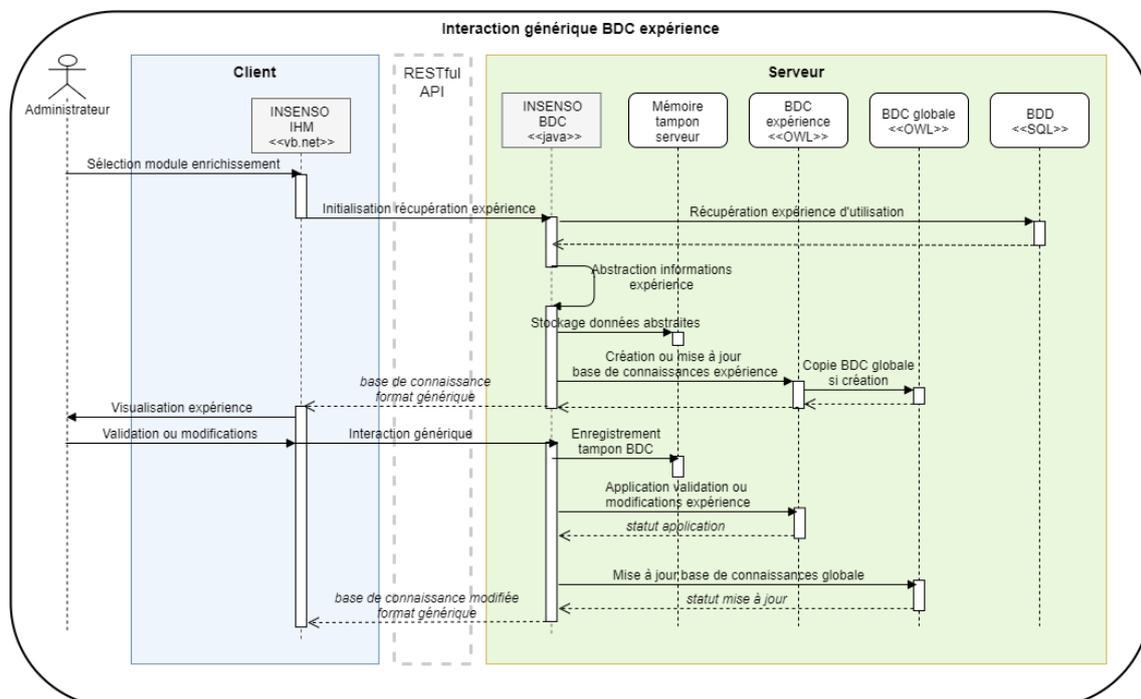


Figure D.4 – Diagramme de séquence du cas d'utilisation « Interaction générique BDC expérience » du module **Enrichissement**

Détails de l'IHM

Les sections suivantes présentent plusieurs captures d'écran du logiciel INSENSO utilisé pour le cas d'étude du bracelet de montre. Pour l'exemple, nous ne présentons qu'une version réduite de cette étude (certains résultats donnés diffèrent légèrement de ceux obtenus avec l'étude complète).

Module analyse initiale

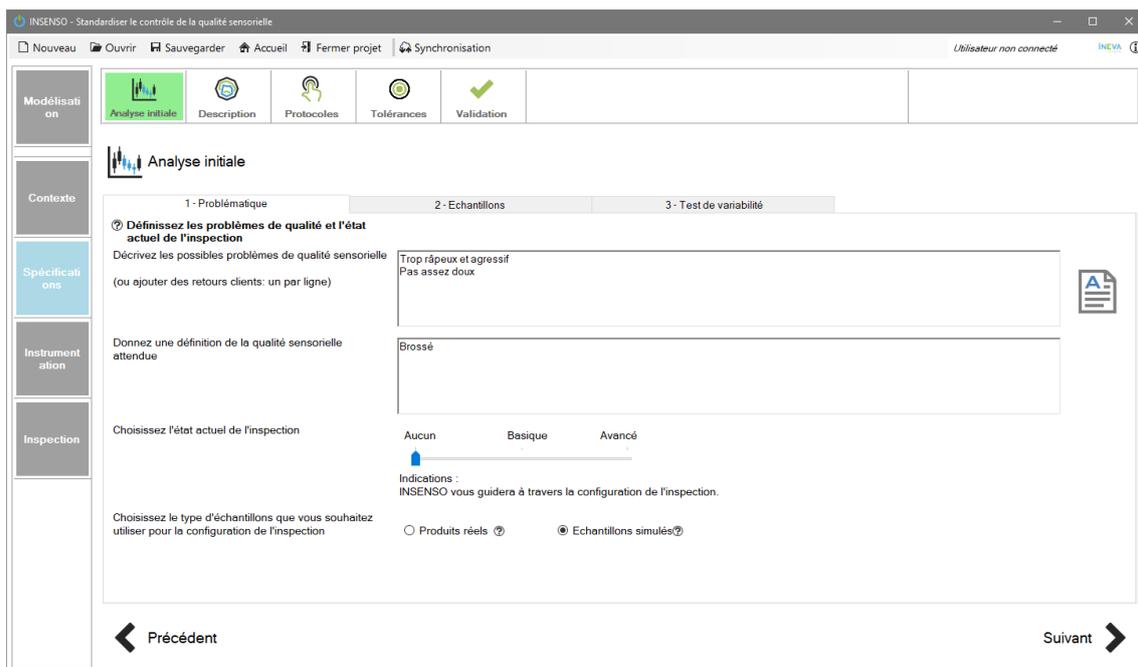


Figure D.5 – Capture d'écran de l'interface : définition de la problématique de contrôle

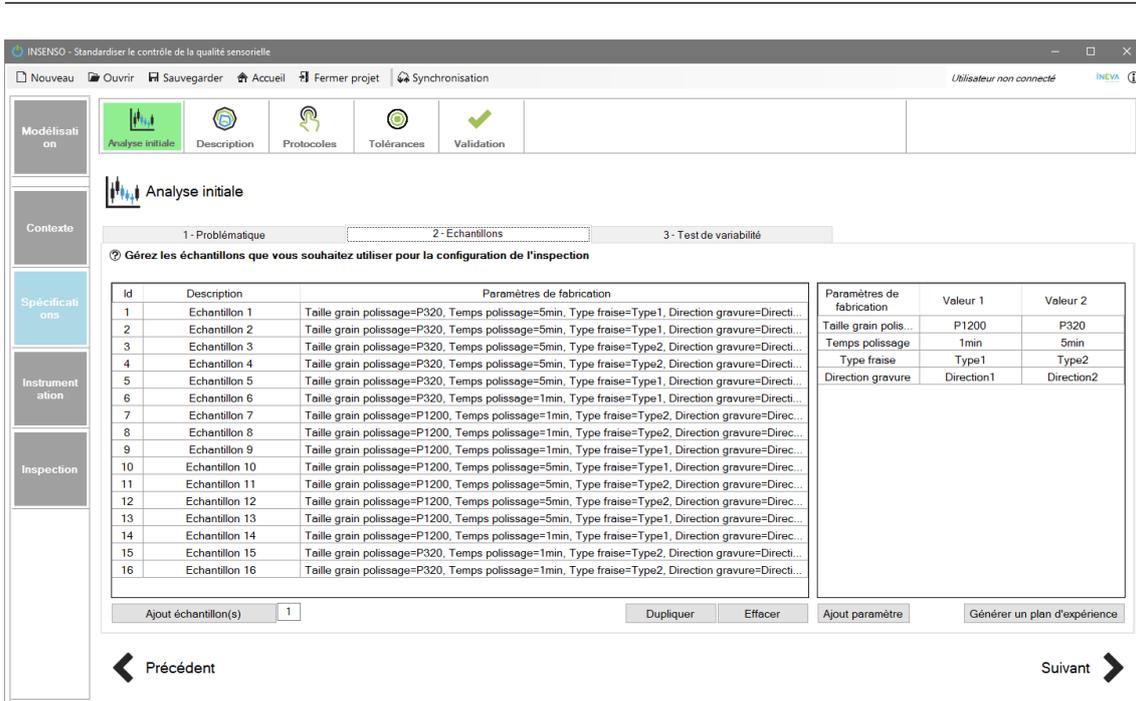


Figure D.6 – Capture d'écran de l'interface : définition ou génération des échantillons

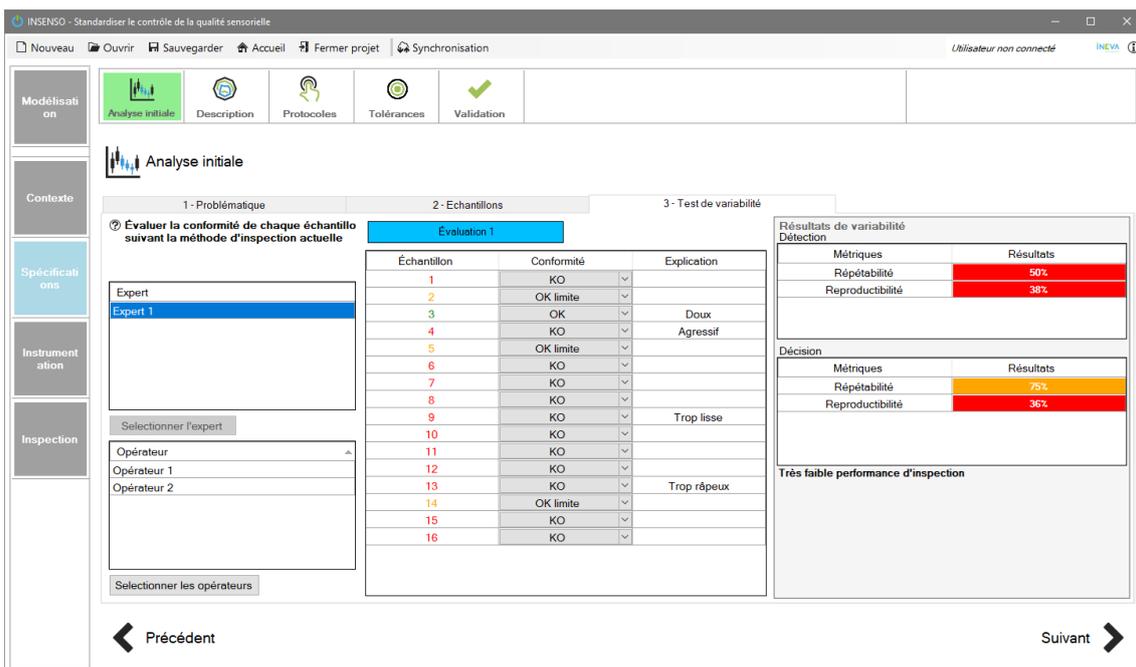


Figure D.7 – Capture d'écran de l'interface : test initial de variabilité

Module Description

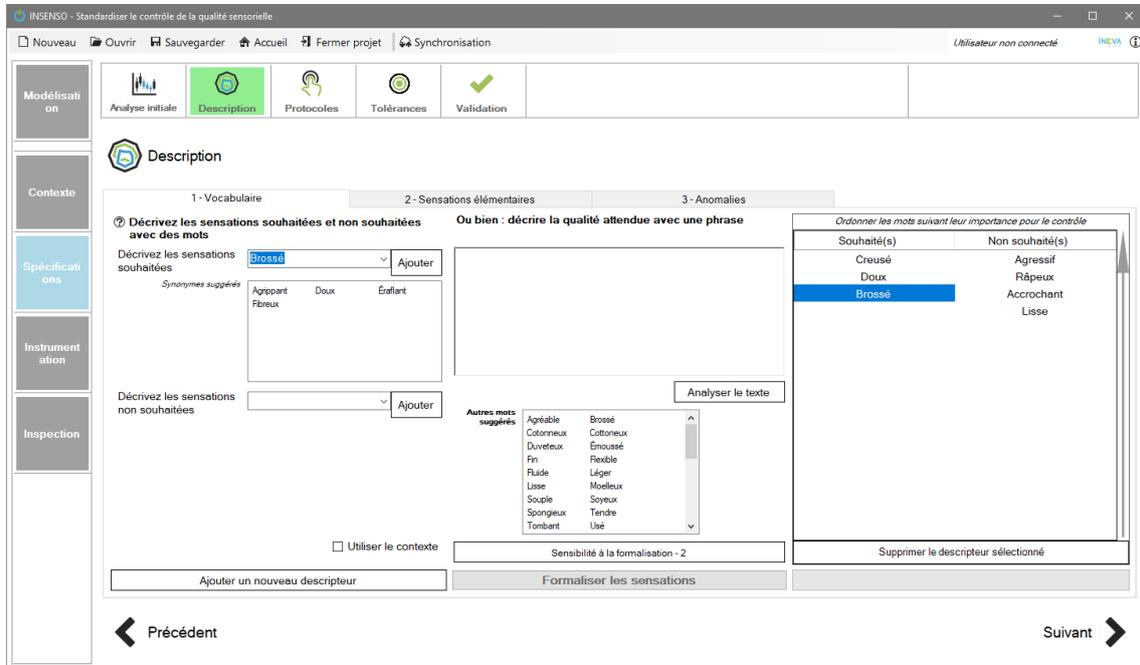


Figure D.8 – Capture d'écran de l'interface : expression du vocabulaire

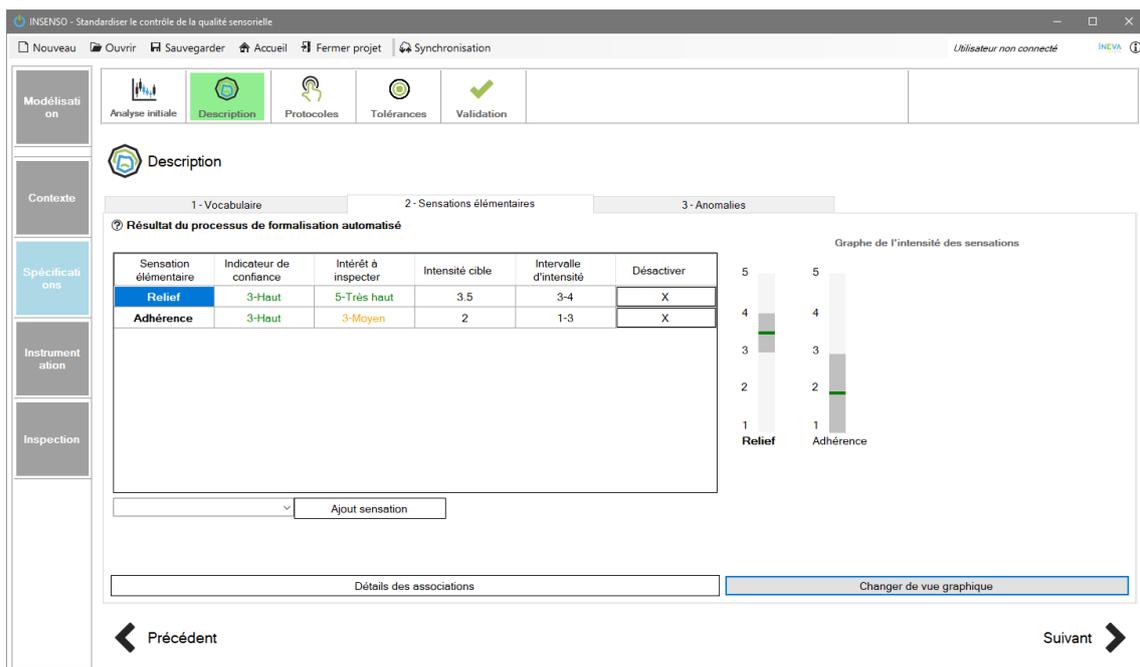


Figure D.9 – Capture d'écran de l'interface : formalisation de la description

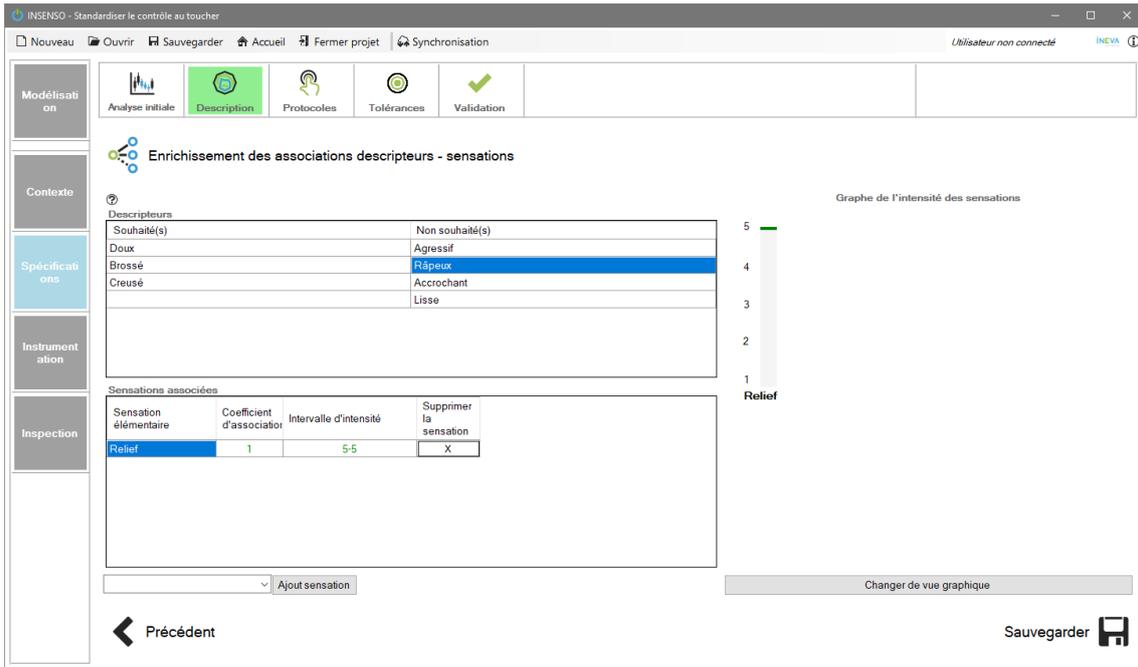


Figure D.10 – Capture d'écran de l'interface : enrichissement des associations descripteurs - sensations

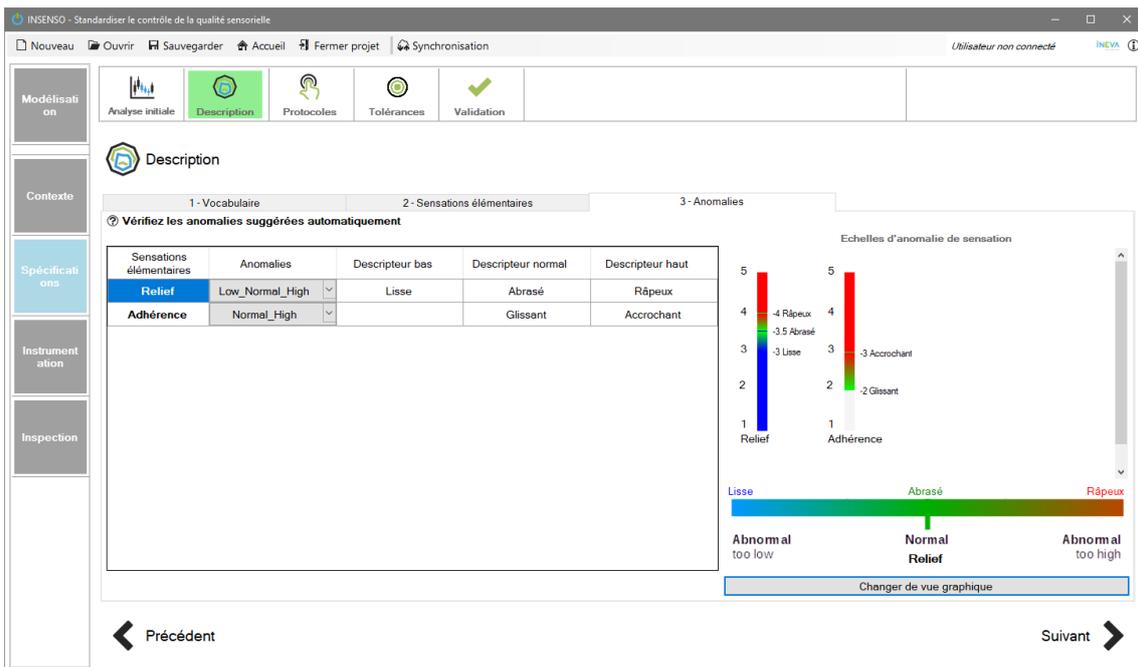


Figure D.11 – Capture d'écran de l'interface : définition des anomalies

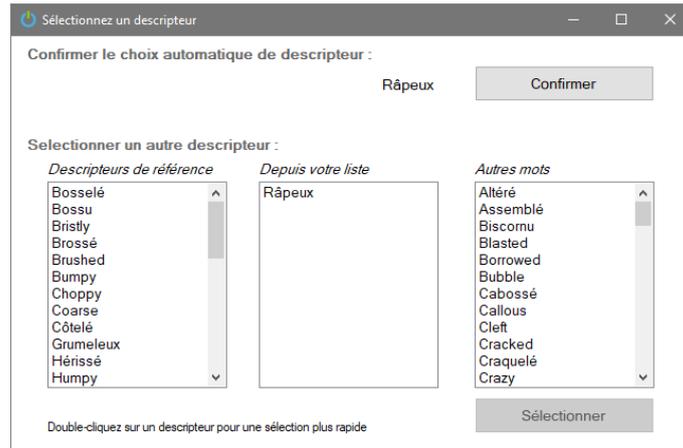


Figure D.12 – Capture d'écran du formulaire d'aide à la sélection des descripteurs associés aux anomalies

Module protocoles

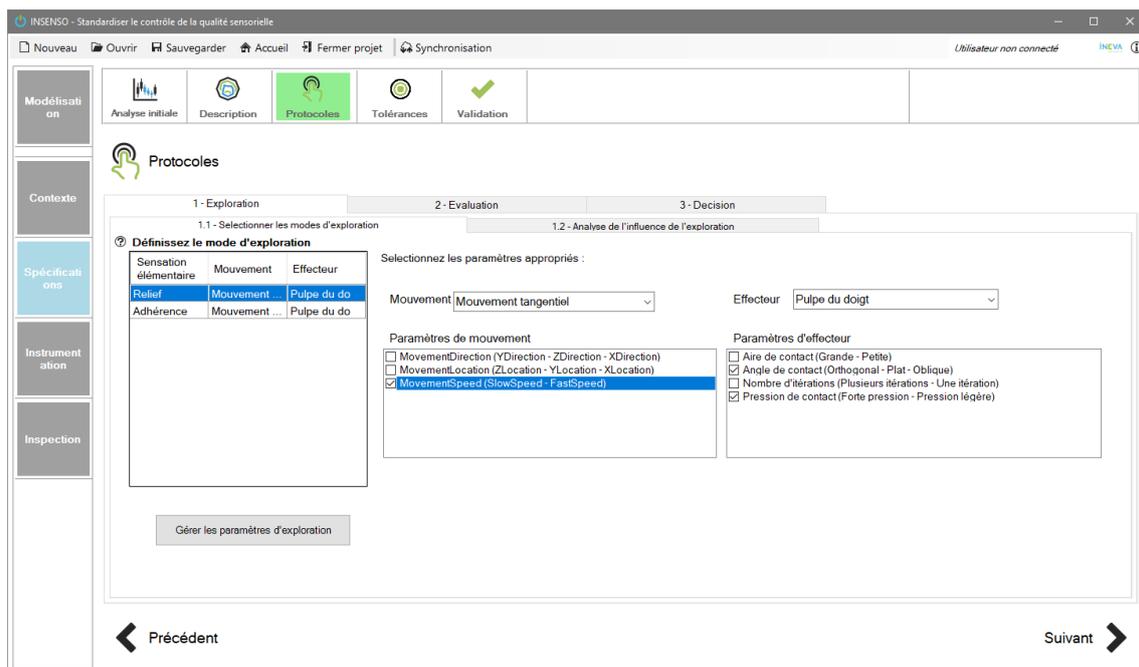


Figure D.13 – Capture d'écran de l'interface : sélection des modes d'exploration

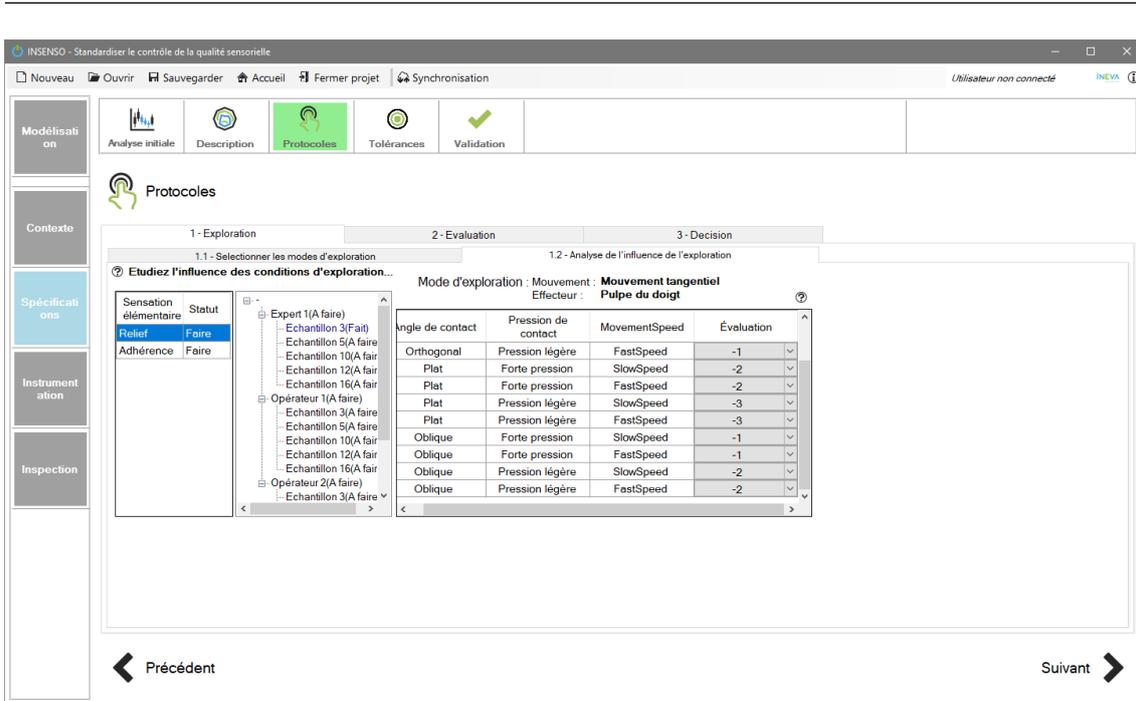


Figure D.14 – Capture d'écran de l'interface : analyse de l'influence de l'exploration sur la perception

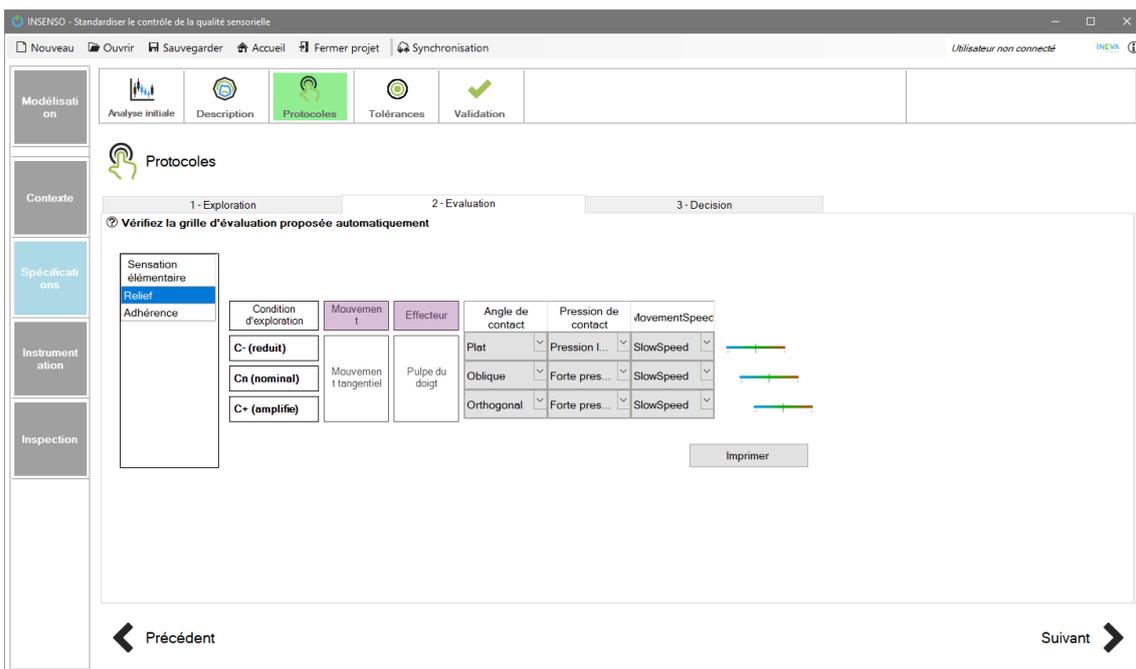


Figure D.15 – Capture d'écran de l'interface : définition des grilles d'évaluation

Module tolérances

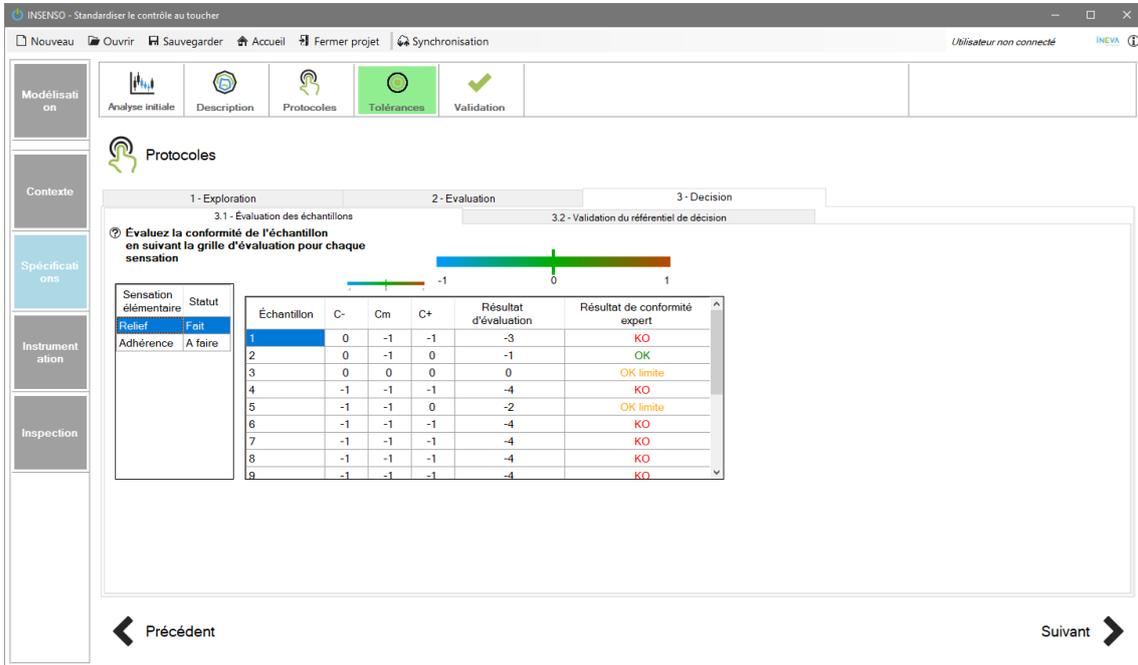


Figure D.16 – Capture d'écran de l'interface : évaluation des échantillons

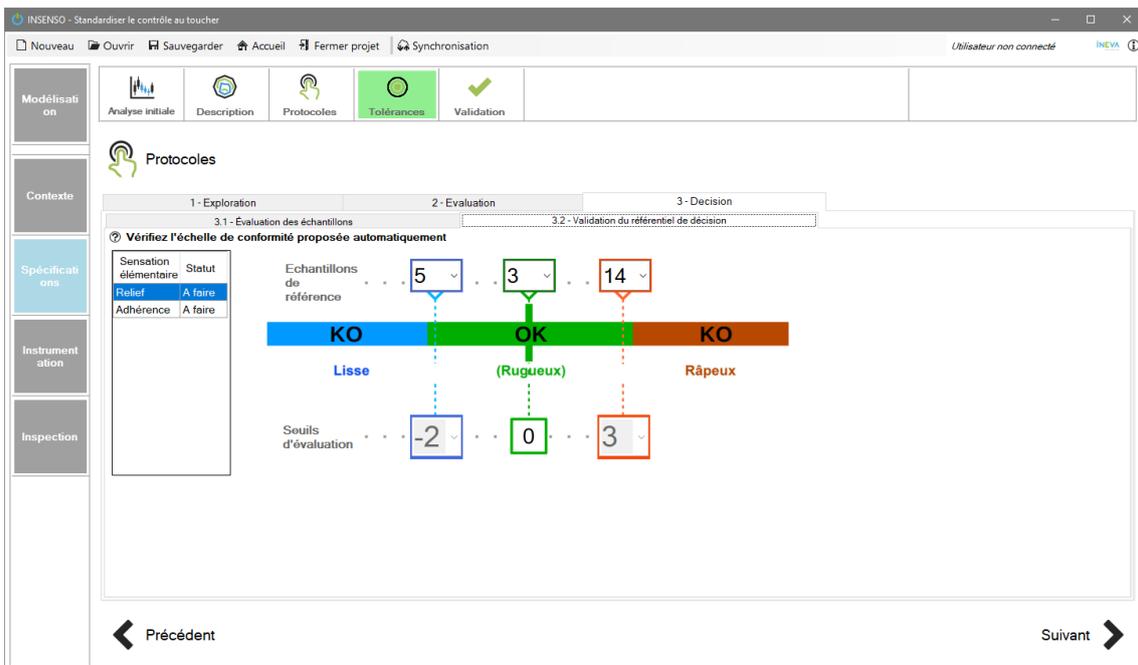


Figure D.17 – Capture d'écran de l'interface : définition tolérances et référentiel de contrôle

Module validation

Validation

Évaluez la conformité de chaque échantillon suivant la méthode définie

Échantillon	C-	Cn	C+	Évaluation
1	-1	-1	0	-2
2	-1	-1	0	-2
3	0	0	0	0
4	-1	-1	-1	-4
5	-1	0	0	-1
6	-1	-1	-1	-4
7	-1	-1	-1	-4
8	-1	-1	-1	-4
9	-1	-1	-1	-4
10	-1	-1	-1	-4
11	-1	-1	-1	-4
12	-1	-1	-1	-4
13	1	1	1	4
14	1	1	1	4
15	1	1	1	4
16	1	1	1	4

Évaluation par sensation Conformité globale

Résultats de variabilité

Métriques	Après	(Avant)
Répétabilité	94%	56%
Reproductibilité	94%	56%

Décision

Métriques	Après	(Avant)
Répétabilité	81%	69%
Reproductibilité	75%	38%

Bonne performance d'inspection

Précédent Sauvegarder

Figure D.18 – Capture d'écran de l'interface : test final de variabilité, par sensation

E

Liste d'instruments pour la mesure des sensation haptiques

Annexe E. Liste d'instruments pour la mesure des sensation haptiques

Dénominati	Type de mesure	Paramètre physique mesuré	Zone de contact	Technolo	Grip	Relief	Hardness	Reactivity	Residue	Warmth	Pain	Weight	Shape
Rugosimètre	Rugosité d'une surface / profil	2D : hauteur pics de relief (et creux) suivant une ligne	Avec contact. Pointe : zone de contact très réduite	Mécanique									
Scleromètre	Dureté de revêtement de surface (hardness test pencil)	Déformation de la surface	Avec contact. Exemple : Sphère 0,75mm	Mécanique									
Duromètre	Dureté de surface (soft elastomers et soft rubber)	Enfoncement	Avec contact. Exemple : Pointe (0,79mm)	Mécanique									
Doigt biofidèle (exemple BioTac) ⁷²	Mesure des stimuli tactiles (force, vibration, température) et interprétation grâce au standard SynTouch	Force, Fluid pressure, Microvibration, Température, Flux thermique	Bout de doigt, peau artificielle avec empreintes digitales	Vibromètre, capteur thermique piezo, ...									
Capteur d'effort 3 axes (exemple Opto-force) ⁷³	Mesure de l'effort de pression appliqué par la partie du capteur souple en contact avec une surface	Force	Hémisphérique souple	Optique et phère en silicone									
Capteur confocal chromatique (exemple AltiSurf) ⁷⁴	Mesure d'état de surface (rugosité principalement)	3D micrométrique, interférométrie	Sans contact	Optique									
Mesure dimensionnelle optique (exemple Smartscope) ⁷⁵	Mesure tridimensionnelle par focalisation de caméra (pour axe Z)	3D géométrique	Sans contact	Optique, caméra									
Profilomètre laser (exemple Gocator) ⁷⁶	Profilomètre laser (mesure géométrique de profil)	Etat de surface	Sans contact	Laser									

72. Voir <https://www.syntouchinc.com/en/sensor-technology/>

73. Voir <https://onrobot.com/products/omd-force-sensor/>

74. Voir http://www.altimet.fr/?page_id=236&lang=en

75. Voir <https://www.ogpnet.com/north-america/systems/video-multisensor/smartscope-flash/index>

76. Voir <https://lmi3d.com/products/gocator>

Banc course effort	Mesure effort / déplacement	Effort de contact	Varie suivant actionneur : exemple boule résine	Mécanique														
Capteur optique avec dôme d'éclairage (exemple projet Me-sura) ⁷⁷	Image de surface suivant différents éclairages	Pentes de surface	Autres paramètres d'image	Sans contact	Optique, caméra													
Raideuromètre	Raideur d'une surface	Force appliquée et déplacement	Varie suivant actionneur : exemple boule résine	Mécanique														
Micro indenteur	Dureté d'une surface	Valeur enfoncement	Avec contact (zone de contact très réduite)	Mécanique														
Microscope optique à balayage	Texture, détection aspect peau d'orange, grainage	Contraste, différence de couleur, ... ?	Sans contact	Optique														
Goniomètre	Effet miroir	Réflexion optique	Sans contact	Optique														
Luminancemètre	Luminance surface : brillant, mat	Brillance	Sans contact	Optique														
Doigt thermique (exemple HapTemp) ⁷⁸	Transfert de chaleur	Conductivité thermique	Sans contact	Laser														
Conductimètre thermique (exemple Fluxmètre)	Transfert de chaleur	Conductivité thermique	Matériaux entre deux plaques de cuivre	Thermique, Mécanique														
Plan incliné et photodétecteurs	Angle de frottement	Angle de frottement, adhérence	Surface considérée avec plaque du plan incliné.	Mécanique														
Capteur topographique par front d'onde	Géométrie 3D	Forme, défaut de forme	Sans contact	Ondes acoustiques														
Défectomètre optique	Etat de surface	Pente local du front d'onde	Sans contact	Défectométrie														

77. Voir <http://www.montblancindustries.com/accompagnement-des-entreprises/projet-mesura/>

78. Voir <https://www.zins-ziegler-instruments.com/en/portfolio-view/haptemp-tester-sensotact-scale/>

Annexe E. Liste d'instruments pour la mesure des sensation haptiques

Tribomètre	Cône de frottement	Effort de déplacement tangentiel	Avec contact, dépend de l'actionneur	Mécanique											
Vibromètre (exemple RION VM 63A) ⁷⁹	Vibration	Accélération, vitesse, Déplacement	Avec contact	Mécanique, accéléromètre piezo											
Banc Stick-Slip (exemple H3P) ⁸⁰	Glissant-bloquant	Effort de friction entre deux surfaces, effet stick-slip	Avec contact	Mécanique											
Accéléromètre miniature (exemple TEDS 3293A) ⁸¹	Dynamique d'un mouvement	Accélération, Vibrations	Avec contact	Piezo											
Nappe pression (exemple Tekscan) ⁸²	Pression de contact et aire	Effort de compression de chaque "pixel" de la nappe	Entre actionneur et surface	Resistif											
Capteur de pression (exemple Flexiforce de Tekscan) ⁸³	Effort de contact	Force	Entre actionneur et surface	Resistif											
Caméra chromatique confocale (exemple Chrocodile CLS) ⁸⁴	Mesure 3D, forme, hauteur, rugosité	distance, épaisseur	Sans contact	Image confocale											
Thermomètre numérique	Mesure de température	Température ambiante	Avec ou sans contact	Electromécanique											

Tableau E.1 – Relations entre catégories de sensation et les appareils et capteurs potentiellement adaptés pour leur instrumentation.

79. Voir <http://www.noise-and-vibration.co.uk/pid2/rion-vm-63a-vibration-meter>

80. Voir <https://www.zins-ziegler-instruments.com/en/portfolio-view/h3p-stick-slip-test-bench/>

81. Voir http://www.a-tech.ca/Product/Series/1127/3293A_Mini_Triaxial_Accelerometer/?tab=1

82. Voir <https://www.tekscan.com/products-solutions/systems/grip-system>

83. Voir <https://www.tekscan.com/product-group/embedded-sensing/force-sensors>

84. Voir <https://www.precitec.de/en/products/optical-measuring-technology/line-and-multipoint-sensors/chrocodile-cls/>

F

Supports de présentation

Poster de la journée des doctorants 2017 de l'école doctorale SISEO



A Generic Methodology to Standardize Haptic Quality Control

Bruno Albert

INEVA : Christophe Knecht, Julien Charrier SYMME : Maurice Pillet, Jean-Luc Maire ICUBE : Cecilia Zanni-Merk, François De Beuvron

feliCity proposes a new way to :

- model and structure knowledge for the description and the control of haptic sensations
- construct adapted inspection standards
- through a generic methodology.



References :
 1. Compton, M. et al., 2012. The SSN ontology of the W3C semantic sensor network incubator group. *Journal of Web Semantics*.
 2. Lederman, S.J. & Klatzky, R.L., 2009. Haptic perception: A tutorial. *Attention, perception & psychophysics*.
 3. Martin, S., et al., 2011. OpenOrd: an open-source toolbox for large graph layout. *International Society for Optics and Photonics*.
 4. Baudet, N., et al., 2013. The visual inspection of product surfaces. *Food Quality and Preference. Food Quality and Preference*

5. Zanni-Merk, C., 2015. KREM: A Generic Knowledge-Based Framework for Problem Solving in Engineering Proposal and Case Studies. In *KEGD*.
 6. Albert, B., et al., 2016. Generic and structured description of tactile sensory perceptions. In *KEER*.
 7. Albert, B., et al., 2016. A Smart System for Haptic Quality Control - Introducing an Ontological Representation of Sensory Perception Knowledge. In *KEGD*.
 8. Albert, B., et al., 2017. A haptic quality control method based on the human somatosensory system. In *CIVEMSA*.

Maîtrise de la qualité haptique des produits

Formalisation du contrôle haptique et proposition d'une méthodologie de mise en œuvre

Résumé

Les travaux réalisés au cours de cette thèse ont mené à la proposition d'une solution méthodologique et logicielle accompagnant les industriels vers une meilleure maîtrise du contrôle sensoriel haptique de leurs produits. Ce type de contrôle, qui fait appel au sens du toucher de manière dynamique, pose en effet de nombreux problèmes dans l'industrie. Un cas d'étude, réalisé sur des bracelets d'une montre de luxe, illustre la difficulté à juger de manière objective et répétable la qualité haptique des produits. Notre analyse de la littérature confirme également que la mise en place de ce contrôle requiert une grande expertise à acquérir et à capitaliser. En particulier, la manière de décrire une sensation haptique et la manière de contrôler le produit ont généralement un impact significatif sur le résultat du contrôle. Dans le but de réduire ces difficultés, trois contributions principales sont apportées. Une méthode est tout d'abord proposée pour formaliser les sensations haptiques élémentaires à l'origine de la perception sensorielle. Il s'agit d'un processus de modélisation sémantique qui mène à l'identification d'un nombre réduit de sensations haptiques élémentaires et à leur mise en relation avec les mots utilisés dans ce domaine. Une représentation ontologique est ensuite construite, sur la base de modèles existants, pour structurer de manière robuste l'ensemble des connaissances nécessaires au contrôle haptique (descripteurs, sensations, anomalies, stimuli, récepteurs sensoriels, effecteurs, modes d'exploration, etc.). Cette modélisation rend possible un accès contextualisé à ces connaissances et leur enrichissement au fil du temps. Enfin, nous proposons une méthodologie aidant à la mise en œuvre systématique d'un contrôle haptique des produits. Elle s'appuie sur les connaissances modélisées pour générer un standard de contrôle adapté à la problématique spécifique rencontrée. Ce standard inclut les spécifications formalisées des anomalies haptiques à contrôler, des protocoles ainsi qu'un référentiel de contrôle à utiliser. L'outil logiciel INSENSO, développé au sein de la société INEVA, intègre cette méthodologie de mise en œuvre du contrôle ainsi que le système de gestion des connaissances associées. L'application de cette méthodologie sur le cas des bracelets de montre a mené au développement dans l'entreprise manufacturière d'un standard de contrôle haptique. L'utilisation de ce standard a permis de réduire de manière significative la variabilité des résultats de contrôle. Les solutions développées sur le contrôle haptique ouvrent de nombreuses perspectives dans le domaine plus général du contrôle sensoriel, notamment en ce qui concerne son instrumentation.

Mots-clés : Contrôle haptique, Qualité perçue, Perception sensorielle, Modélisation sémantique, Ontologie, Système intelligent

Mastering the haptic quality of products

Formalizing haptic quality control and proposing an implementation methodology

Abstract

The work carried out during this thesis led to the proposal of a methodological and software solution that helps manufacturers to better master the haptic sensory inspection of their products. This type of quality control, which uses the sense of touch in a dynamic way, poses many problems in the industry. A case study, carried out on luxury watch bracelets, illustrates the difficulty of objectively and repeatedly judging the haptic quality of products. Our review of the literature also confirms that the implementation of sensory inspection requires a great deal of expertise to acquire and capitalize. In particular, the way a haptic sensation is described and the way the product is inspected generally have a significant impact on the result of the control. In order to reduce these difficulties, three main contributions are made. First, a method is proposed to formalize the elementary haptic sensations at the origin of sensory perception. A semantic modeling process leads to the identification of a reduced number of elementary haptic sensations and their relationship to the words used in this field. An ontological representation is then constructed, on the basis of existing models, to structure in a robust way all the knowledge necessary for haptic inspection (descriptors, sensations, anomalies, stimuli, sensory receptors, effectors, exploration modes, etc.). This modeling makes it possible to provide a contextualized access to this knowledge and to enrich it over time. Finally, we propose a methodology to help the systematic implementation of the haptic inspection of products. It relies on the knowledge base to generate an inspection standard adapted to the specific problem encountered. This standard includes the formalized specifications of the haptic anomalies to be inspected and the inspection protocols to be used. The INSENSO software tool, developed within the company INEVA, integrates this inspection implementation methodology and the associated knowledge management system. The application of this methodology to the case of watch bracelets has led to the development of a haptic inspection standard. The use of this standard has significantly reduced the variability of inspection results. The solutions developed for the haptic inspection of products open many perspectives in the more general field of sensory inspection, especially regarding its instrumentation.

Keywords : Haptic inspection, Perceived quality, Sensory perception, Semantic modeling, Ontology, Intelligent system

