

# UNIVERSITÉ FRANÇOIS – RABELAIS DE TOURS

ÉCOLE DOCTORALE EMSTU  
LABORATOIRE DE MÉCANIQUE ET RHÉOLOGIE EA 2640

**THÈSE** présentée par :  
**Valentin LORIQUET**

soutenue le : 15 décembre 2017

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université François – Rabelais de Tours**

Discipline/ Spécialité : Génie Mécanique et Productique

## **Apport d'une réflexion anthropocentré pour la conception d'appuis dans les transports publics urbains**

### **Vers une nouvelle représentation du confort pour le passager**

#### **THÈSE dirigée par :**

**Madame RICHARD Caroline**

Professeur, LMR EA 2640, Université François-Rabelais de Tours

#### **RAPPORTEURS :**

**Monsieur EL MANSORI Mohamed** Professeur, MSMP EA 7350, Arts et Métiers ParisTech

**Madame FAUCHEU Jenny** Maître de conférence HDR, SMS, MINES Saint-Étienne

---

#### **JURY :**

**Monsieur CHEN Yan-Ming** Ingénieur tribologue, CETIM Senlis

**Monsieur EL MANSORI Mohamed** Professeur, MSMP EA 7350, Arts et Métiers ParisTech

**Madame FAUCHEU Jenny** Maître de conférences HDR, SMS, MINES Saint-Étienne

**Madame RICHARD Caroline** Professeur, LMR EA 2640, Université François-Rabelais de Tours

**Monsieur TRAN VAN François** Professeur, PCM2E, Université François-Rabelais de Tours

#### **INVITÉ DU JURY**

**Monsieur BASSEREAU Jean-François** Directeur de recherche, RCP Design Global



*« Ainsi, comme l'affirme G. Thill : « la question à laquelle nous accule la crise contemporaine, c'est de savoir comment décloisonner une science de spécialistes de la rationalité instrumentale de manière à prendre en compte, dans l'exercice scientifique lui-même, des problèmes globaux ou des préoccupations de fond liés à des imaginaires sociaux qualifiés d'irrationnels. » La question du confort, située ainsi dans le domaine collectif et public, nous engage, dès lors, à une réflexion sur notre capacité à produire un être ensemble. En ce sens, c'est la modernité elle-même qui, par l'intermédiaire du confort, se trouve ici mise en jeu. »*

Olivier Le Goff

*L'invention du confort : naissance d'une forme sociale, 1994.*



# Remerciements

Mes premiers remerciements s'adressent à ma directrice de thèse, Pr. Caroline Richard, pour sa confiance et sa générosité, ainsi qu'à sa bonne humeur et à sa patience, qui m'ont accompagné tout au long de ce travail, pas tous les jours évidents. Nous n'étions pas toujours très sûrs d'où nous allions mais nous y sommes finalement arrivés !

Naturellement, je tiens également à remercier le Pr. Jean-François Bassereau, mon co-encadrant, pour toutes ses idées et tous ses conseils avisés, qui ont su m'amener à explorer de nouveaux horizons et apprendre mille et une nouvelles choses sur un grand nombre de sujets divers et variés.

Mes remerciements sincères vont à M. Mohamed El Mansori, professeur aux Arts et Métiers ParisTech, et à Mme Jenny Faucheu, maître de conférences aux MINES Saint Étienne, pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse en tant que rapporteurs. Je remercie également M. François Tran Van, professeur à l'Université François Rabelais de Tours, d'avoir accepté de prendre la présidence de mon jury.

Un immense merci à ma fabuleuse collègue Stéphanie Gosset, sans qui ce travail aurait été totalement différent, et aurait été bien plus difficile à accomplir ! Sa bonne humeur, son entrain et ses nombreuses connaissances sur des domaines que j'ai appris à découvrir avec une grande curiosité sont tout autant de qualités que n'importe qui rêverait d'avoir pour un compagnon de recherche ! Cette collaboration transdisciplinaire fut très fructueuse, tant au point de vue professionnel que personnel, et je suis certain que cette amitié et nos échanges dureront encore longtemps après nos thèses. Merci infiniment !

A toute l'équipe du CETIM qui a su m'accueillir et qui m'a permis de réaliser ces quelques expériences à Senlis, Yan-Ming Chen, David Cazé et tous les autres, merci beaucoup pour votre formidable sympathie, votre temps que vous m'avez accordé généreusement et votre intérêt pour ce travail. Merci à l'entreprise Eurostar Engineering Plastics pour le prêt de leurs échantillons. J'en profite également pour remercier Jean-Claude Pavy, parent du tribomètre utilisé dans cette étude, pour sa venue au Certesens et son apport sur les aspects tribologiques. Je remercie toute l'équipe de l'agence RCP Design Global pour m'avoir fait découvrir l'approche sensorielle et pour tout le savoir qu'elle a su m'apporter, particulièrement Régine Charvet-Pello, pour sa vision passionnante du design et des transports, et Annie Dorange, pour sa gentillesse et ses conseils.

Special thanks to Pr. Peter Vink and to (now) Dr. Suzanne Hiemstra-van Mastrigt from Delft University of Technology for their invitation to her PhD thesis in july 2016 and their interest in our work. I would also like to thank everyone I had the chance to meet during the First International Comfort Congress in june 2017, as this event gathered wonderful and fascinating people from various countries and fields of activity. It was an amazing time in Salerno!

Many thanks to the various researchers, designers and transport enthusiasts that accepted to discuss with us and give us insightful comments about our study. I am thinking of Pr. Jian Lu, who welcomed us at the City University of Hong Kong, as well as everyone we met there; Nicolás Palomares, who welcomed us at the Instituto de Biomecánica de Valencia, the team we met at the Universidad Católica de Valencia San Vicente Mártir, and of course Alba Dalmau for having accompanied us during our stay in Valencia. Finally, it was a great pleasure to discover the “Straßenbahnbetriebshof Niederschönhausen” in Berlin with our guide Stefan Reimann, thank you for the historical tour.

Je remercie grandement Jessica Dacleu Ndengue pour son aide précieuse sur toutes les questions « techniques » que j'ai pu lui poser, tu m'as fait gagner pas mal de temps ! Et félicitations pour ton titre de docteur !

Je souhaite remercier toute l'équipe administrative qui s'est bien occupée de moi pendant ces quelques années, M. Robert pour sa réactivité et Mme Benyagoub pour sa gentillesse sans pareille.

Merci à toutes les personnes qui se sont portées volontaires pour participer pendant quelques minutes à l'épreuve de napping.

Évidemment, merci à tous mes proches, famille comme amis, qui n'ont pas toujours compris sur quoi je travaillais mais qui à force de me poser la question m'ont permis d'améliorer mon pitch (je vous avoue que de mon côté ce n'est pas toujours évident non plus !), à Loïc sans qui cette aventure n'aurait pas commencé, et à ma chère Estefania qui m'a supporté et motivé jusqu'au bout, pressée que j'en finisse pour commencer une nouvelle aventure !

## Résumé

La complexité de la mise en place d'un système ferroviaire en milieu urbain, tant au niveau des acteurs impliqués dans sa conception que du défi technologique qu'il représente, tend à éclipser l'utilisateur final du produit : le passager. La revue de littérature montre une relative absence de connaissance sur la notion de confort dans les transports publics urbains, et l'imaginaire collectif y fait plutôt référence à la fréquence de passage des rames, ou encore la possibilité de s'asseoir sur un siège pendant le trajet. La question est alors de se demander s'il est possible d'améliorer l'« expérience passager » grâce à une conception prenant mieux en compte les facteurs humains, en proposant des intérieurs de matériel roulant plus confortables et adaptés aux attentes des futurs usagers. Ce projet de recherche pluridisciplinaire ouvre la voie à deux axes : comprendre comment les passagers interagissent avec le véhicule (thèse entreprise par Stéphanie H. Gosset en sciences humaines et sociales) et comprendre comment les passagers perçoivent le véhicule (cette thèse). L'objectif principal est de créer, ou du moins amorcer, cette base de connaissances manquante afin d'aider le concepteur à intégrer ces facteurs humains dans son cahier des charges, selon une approche sensorielle. L'intérêt se porte ici sur la question de la perception du toucher des supports et maintiens situés à l'intérieur du transport public urbain, premières interfaces entre le passager et le véhicule. Une première exploration a été effectuée afin d'essayer de caractériser instrumentalement l'interaction entre le passager et un appui, réduit à un toucher tangentiel d'une surface (représentant le mouvement d'accroche de la main sur une barre, par exemple). L'étude, liant tribologie et évaluation sensorielle, montre la difficulté à laquelle se heurte l'approche réductionniste : la perception tactile est un processus complexe, qui ne peut se décomposer simplement en sensations élémentaires. Pour affronter cette difficulté, une prise de recul a été nécessaire, passant alors par une approche holistique. Un second travail a ainsi été entrepris autour de la notion de confort, définie comme l'ultime étape de la perception, l'appréciation de l'interaction par le passager. L'enjeu est d'aller au-delà de l'approche réductionniste et physique, où le passager est considéré aujourd'hui comme une variable physique isolée, pour aller vers une approche plus complexe, prenant en compte les facteurs psychosociaux de l'interaction. Des modèles issus de l'ergonomie ont été repris et adaptés en fonction de résultats d'observations de Stéphanie H. Gosset afin de proposer une nouvelle représentation à deux niveaux, local et global, de l'appréciation du confort par les passagers dans ce contexte spécifique du transport public en milieu urbain. Finalement, les

réflexions initiées dans ce travail de recherche souhaitent ouvrir la voie vers une nouvelle approche de la conception, l'approche anthropocentrée, venant compléter la vision actuelle très technocentrée du milieu ferroviaire.

# Abstract

Setting up a rail system in urban areas is complex, regarding both the various players involved in its conception and the technological challenge that it represents. This complexity tends to overshadow the end user: the passenger. The literature review shows a relative absence of knowledge on the notion of comfort in urban public transports. The collective imagination refers to it as the train frequency or as the possibility of sitting during the ride. The question is then to wonder if it is possible to enhance the "passenger experience" through a conception taking better account of human factors, by offering more comfortable rolling stock interiors that meet the expectations of future travelers. This multidisciplinary research project paves the way for two approaches: understanding how passengers interact with the vehicle (thesis undertaken by Stéphanie H. Gosset in human and social sciences) and understanding how passengers perceive the vehicle (this thesis). The main objective is to build, or at least initiate, this missing knowledge base in order to help the designer integrate those human factors into his specifications, according to a sensory approach. Here, the focus is on the perception of the touch of supports in the passenger compartment, which are the primary interfaces between the traveller and the vehicle. An initial exploration was carried out in order to try to characterize instrumentally the interaction between the passenger and a support, reduced to a tangential touch of a surface (representing the friction between the hand and a bar, for example). The study, linking tribology and sensory evaluation, shows the limits of the reductionist approach: tactile perception is a complex process that cannot be simply reduced into elementary sensations. It was then necessary to take a step back in order to face this difficulty, by adopting a holistic approach. Thus, a second work was made on the notion of comfort, defined as the ultimate step of the perception, the passenger's appreciation of the interaction. The issue is to go beyond the reductionist and physical approach, where the passenger is considered today as an isolated physical variable, and to adopt a more complex approach, taking into account the psychosocial factors of the interaction. Ergonomic models were taken up and adapted according to Stéphanie H. Gosset's observations results in order to propose a two-level representation for passengers' appreciation of comfort in the specific context of urban public transport. Finally, the reflections initiated in this research wish to pave the way for a human-centered approach, completing the current vision that is very technocentric in the rail environment.

# Table des matières

Remerciements .....	5
Résumé .....	7
Abstract .....	9
Table des matières .....	10
Liste des tableaux .....	14
Liste des figures .....	15
Liste des annexes.....	20
Introduction générale.....	21
Chapitre 1 : L'approche sensorielle comme outil de différenciation .....	34
Introduction .....	34
1) L'approche sensorielle .....	35
1.1) Une conception centrée sur l'utilisateur.....	36
1.1.1) Définition de l'Ingénierie Anthropocentréee .....	37
1.1.2) Différentes visions pour différents acteurs .....	39
1.1.3) Acteurs impliqués dans la conception d'un transport public urbain : exemple du tramway de Tours.....	41
1.2) Présentation du design sensoriel .....	45
1.2.1) Définition et principes.....	45
1.2.2) Évaluation sensorielle : objectiver le subjectif .....	47
1.2.3) Aspects méthodologiques de l'évaluation sensorielle .....	47
1.3) Mise en place de la problématique de recherche .....	51
1.3.1) Un environnement hyper-constraint .....	51
1.3.2) Recherche de différenciation par le sensoriel .....	56
1.3.2.1) Objectivation des propriétés tactiles en toucher tangentiel des appuis.....	56
1.3.2.2) Identification des propriétés de confort .....	59
2) Le système perceptif humain .....	61
2.1) Les sens humains .....	61
2.1.1) Introduction au sensoriel à travers l'art.....	61
2.1.2) Organisation des systèmes sensoriels chez l'humain.....	64
2.1.2.1) Classification des récepteurs sensoriels .....	64

2.1.2.2) Organisation du système nerveux .....	65
2.1.2.3) Principes d'organisation des systèmes sensoriels .....	69
2.1.2.4) Organisation des voies de conduction.....	73
2.1.2.5) Transduction sensorielle et codage de l'information sensorielle .....	74
2.2) Le mécanisme de la perception .....	75
2.2.1) Perception, représentation et cognition.....	76
2.2.2) Notion d'émotion .....	77
2.2.3) Traitement des émotions : système limbique et amygdale .....	81
2.2.4) Les trois types de mémoire .....	84
2.2.5) Mémoire explicite et mémoire implicite.....	86
2.2.6) Synthèse du processus de perception .....	89
2.3) Le cas de la perception tactile .....	90
2.3.1) Le système haptique.....	91
2.3.2) Le toucher « passif » : la somesthésie .....	94
2.3.2.1) Acuité tactile .....	94
2.3.2.2) Récepteurs sensoriels cutanés .....	96
2.3.2.4) Kinesthésie .....	102
2.3.3) Le toucher « actif » : l'exploration haptique.....	104
2.3.3.1) Système moteur.....	105
2.3.3.2) Exploration haptique .....	108
2.3.3.3) Le toucher fonctionnel .....	111
Conclusion du chapitre 1 .....	113
Chapitre 2 : Exploration pour la mesure de la perception tactile : évaluation du toucher tangentiel d'une surface .....	115
Introduction .....	115
3) Exploration du lien éventuel entre tribologie et sensoriel : développement du « tribomètre sensoriel ».....	117
3.1) Matériel et méthodologie .....	118
3.1.1) Étude préliminaire : protocole instrumental.....	120
3.1.2) Construction de l'espace produits : choix des échantillons .....	123
3.1.3) Choix de la famille de sensations et protocole d'évaluation.....	125
3.1.4) Essais tribologiques .....	126
3.2) Résultats .....	127
3.2.1) Pré-caractérisation sensorielle des échantillons.....	127

3.2.2) Récupération des données physiques sur les tribographies .....	128
3.2.3) Traitement statistique.....	130
3.3) Discussion et conclusions .....	133
4) Poursuite de l'étude.....	135
4.1) Matériel et méthodologie .....	136
4.1.1) Caractérisation instrumentale.....	136
4.1.1.1) Choix des nouveaux échantillons.....	136
4.1.1.2) Essais tribologiques .....	137
4.1.1.3) Profils de rugosité .....	138
4.1.2) Caractérisation sensorielle .....	139
4.1.2.1) Présentation du napping .....	139
4.1.2.2) Réflexion autour du choix des échantillons caractérisés .....	140
4.1.2.3) Choix des panélistes.....	140
4.1.2.4) Déroulement des épreuves .....	141
4.1.3) Traitement des données.....	144
4.1.3.1) Données instrumentales .....	144
4.1.3.2) Données sensorielles .....	144
4.2) Résultats et discussion .....	145
4.2.1) Données instrumentales .....	146
4.2.1.1) Remarques préliminaires.....	149
4.2.1.2) Analyse statistique .....	150
4.2.2) Données sensorielles .....	152
4.2.2.1) Observations liées au déroulement de l'épreuve de napping .....	152
4.2.2.2) Représentation des échantillons .....	153
4.2.2.3) Représentation des ellipses de confiance .....	156
4.2.2.4) Mots retenus.....	158
4.2.2.5) Représentation des mots .....	159
4.2.2.6) Représentation des sujets .....	162
4.2.3) Discussion autour des résultats des mesures instrumentales et sensorielles....	163
4.2.3.1) Relations entre les paramètres instrumentaux et les données sensorielles	163
4.2.3.2) Comparaison avec une autre étude tribologique : le référentiel Sensotact® .....	166
4.2.3.3) Perspective de développement pour le « tribomètre sensoriel ».....	166
4.2.3.4) Réflexion épistémologique sur la mesure de la perception .....	167

Conclusion du chapitre 2.....	170
Chapitre 3 : Vers une nouvelle représentation du confort pour le domaine des transports publics urbains .....	172
Introduction .....	172
5) Mise en place d'un paradigme du confort.....	173
5.1) A la poursuite du confort .....	174
5.1.1) Évolution sémantique du confort : une brève histoire de la France moderne..	174
5.1.2) Vers une définition moderne du confort .....	176
5.2) Représentations de la perception du confort .....	177
5.2.1) Les multiples dimensions du confort .....	178
5.2.2) Modèles de confort .....	182
5.2.2.1) Modèle théorique de confort et d'inconfort d'assise par De Looze <i>et al.</i> (2003) .....	182
5.2.2.2) Modèle de confort simplifié de Vink <i>et al.</i> (2005) .....	184
5.2.2.3) Revue de littérature sur les causes de l'inconfort : modèle de Moes (2005) .....	186
5.2.2.4) Le rôle des attentes : nouveau modèle de Vink et Hallbeck (2012) .....	187
5.2.2.5) Autre regard : les attentes d'un point de vue marketing, selon le modèle de Kano .....	188
5.2.2.6) Conclusion sur la conceptualisation du confort .....	190
6) La notion de confort dans les transports publics urbains.....	191
6.1) Le contexte des transports publics urbains .....	192
6.1.1) Le facteur « densité ».....	193
6.1.2) Le besoin de « s'ancrer » .....	195
6.2) Proposition pour une représentation à deux niveaux de la perception du confort pour le contexte des transports publics urbains .....	197
6.2.1) Confort du corps individuel : modèle d'interaction sensorielle.....	198
6.2.2) Confort du corps social : l'approche « 5 A » .....	201
6.2.3) Conclusion de la proposition .....	205
Conclusion du chapitre 3 .....	205
Conclusion générale et perspectives de recherche .....	208

# Liste des tableaux

Tableau 1: Évolution des parts modales pour le transport intérieur [CGD,16].....	22
Tableau 2 : Différence de vision du confort dans un TGV entre l'ingénieur et l'usager, repris de [MAM,13] .....	40
Tableau 3 : Liste semi-exhaustive des normes mentionnant le passager pour la conception du matériel roulant .....	53
Tableau 4 : Classification des sensibilités selon Sherrington [CAL,16].....	65
Tableau 5 : Types de récepteurs sensoriels .....	68
Tableau 6 : Synthèse des quatre canaux liés à la mécanoréception [BOL,88][JON,06].....	101
Tableau 7 : Définitions et protocoles d'évaluation des descripteurs tactiles retenus .....	125
Tableau 8 : Matrice des coefficients de corrélation de Pearson associée à la seconde ACP .	131
Tableau 9 : Organisation des données du napping .....	145
Tableau 10 : Contribution des variables instrumentales au calcul des nouvelles dimensions	152
Tableau 11 : Valeurs propres de la matrice de corrélation.....	154
Tableau 12 : Fréquence et pourcentage par rapport au total des mots pour chaque famille de perception .....	159
Tableau 13 : Coefficients de corrélation entre les dimensions calculées par l'AFM et les données instrumentales pour les échantillons communs aux deux tests .....	164
Tableau 14 : Coefficients de corrélations entre les paramètres de frottement pour les huit échantillons communs .....	165
Tableau 15 : Données tribologiques et sensorielles du premier groupe de 43 échantillons...	229
Tableau 16 : Données de frottement et de rugosité .....	234
Tableau 17 : Coordonnées des échantillons dans les différentes configurations .....	235
Tableau 18 : Fréquence d'apparition des mots pour chaque échantillon.....	236

# Liste des figures

Figure 1: Répartition des transports collectifs de proximité en France métropolitaine en 2014 [CGD,16].....	23
Figure 2 : Répartition des modes de transport collectif urbain en 2014 (en % de voyageurs-kilomètres) [CGD,16].....	24
Figure 3 : Évolution de la structure de la population en France métropolitaine, de 1946 à 2017 (résultats provisoires à fin 2016 pour les années 2015 à 2017), source Insee, estimations de population .....	25
Figure 4 : Extrait d'un cahier des charges fonctionnels SNCF – Caractérisation du passager type .....	27
Figure 5 : L'Homme de Vitruve, dessiné par Leonard de Vinci vers 1490 .....	28
Figure 6 : Différences d'aménagement intérieur entre le métro de Hong Kong et le tramway de Tours.....	29
Figure 7 : Disciplines mises au service de l'Ingénierie Anthropocentrale, repris de [ING,97].	37
Figure 8 : Différentes dimensions de la vision du confort pour le service de transport, repris de [MAM,13] .....	41
Figure 9 : Dimensions de la sensation.....	48
Figure 10 : Vue d'ensemble des différentes épreuves de la métrologie sensorielle en fonction de l'objectif de l'évaluateur [DEP,09] .....	49
Figure 11 : Différents styles d'intérieurs dans les tramways de Berlin (crédits photo : (a), (b) et (c) prises personnellement lors d'une visite du dépôt de Berlin-Niederschönhausen, (d) source vlaky.net) .....	54
Figure 12 : Le contact peau-produit comme système tribologique, repris de [YMC,11] et [VAN,13].....	58
Figure 13 : <i>Allégorie du toucher</i> de Jan Brueghel l'Ancien et Pierre Paul Rubens (1617-18).	62
Figure 14 : <i>Les Cinq Sens</i> , respectivement le toucher, l'ouïe, la vue, l'odorat et le goût de Hans Makart (1872-79) .....	63
Figure 15 : Organisation générale du névraxe [CAL,16] .....	66
Figure 16 : Fonctionnement général des systèmes neuronaux .....	66
Figure 17 : Décharge de récepteurs à adaptation lente (a) ou rapide (b).....	70
Figure 18 : Seuils et potentiels de récepteur .....	71

Figure 19 : Cartographie des parties du corps sensibles au chaud (barres supérieures) et au froid (barres inférieures). Ces barres indiquent les seuils médians pour trois groupes d'âge (blanc: 65 ans et plus; noir: 40-60 ans; gris: 18-28 ans) [DEL,03][STE,98] .....	72
Figure 20 : Aires corticales sensorielles.....	73
Figure 21 : Schéma simplifié des traitements de l'information "Bottom-Up" et "Top-Down".	77
Figure 22 : Roue des émotions de Plutchik.....	79
Figure 23 : Structure globale des différents types d'émotion [ORT,88] .....	80
Figure 24 : Synthèse de la notion d'affect .....	81
Figure 25 : Voie longue et voie courte du traitement des émotions.....	82
Figure 26 : Mécanisme de mémorisation .....	86
Figure 27 : Les différents types de mémoire à long terme .....	88
Figure 28 : Schéma opérationnel simplifié de la perception .....	89
Figure 29 : L'incrédulité de Thomas, Le Caravage (1603) .....	91
Figure 30 : Organisation du système haptique .....	92
Figure 31 : Continuum sensori-moteur du toucher manuel, repris de [JON,06].....	93
Figure 32 : Acuité tactile et compas de Weber (d'après [RIC,94]) .....	95
Figure 33 : Distribution somatotopique des différentes parties du corps sur le cortex somatosensoriel et homonculus somesthésique, repris de [TOR,06] .....	96
Figure 34 : Illustration des différents récepteurs de la peau et de leur localisation en profondeur [CAL,16][DEL,03] .....	97
Figure 35 : Récepteurs cutanés en fonction de leur type d'adaptation, repris de [DEL,03]. Une adaptation rapide signifie un arrêt rapide du potentiel d'action (la série de petites lignes verticales en (a) après stimulation indiquée juste au-dessus). En (b), il faut noter que les champs récepteurs des afférents ARII et ALII sont de grandes tailles et ont des limites floues, contrairement aux afférents ARI et ALI. Source : [VAL,84][ROL,94].....	98
Figure 36: Densité moyenne des différents canaux afférents sur la main, repris de [VAL,84]	99
Figure 37 : Illustration d'un fuseau neuromusculaire (a) et d'un organe neurotendineux (b), repris de [DEL,03].....	103
Figure 38 : Illustration au niveau cortical des étapes de la motricité : (1) Intégration sensorielle, (2) Planification de l'action motrice, (3) Transmission du plan moteur aux centres exécutifs, repris de [SAU] .....	106
Figure 39 : Synthèse des relations des structures nerveuses impliquées dans le mouvement, repris de [SAU] .....	107
Figure 40: Homonculus moteur, repris de [TOR,06] .....	107

Figure 41 : Procédures exploratoires et propriétés évaluées par celles-ci, repris de [JON,06] .....	109
Figure 42 : Forces de contact moyennes mesurées au bout du doigt lors de l'évaluation des propriétés suivantes: frottement de surface, petite aspérité sur une surface lisse, rugosité et température, repris de [JON,06] .....	109
Figure 43 : Boucles rétroactives lors de l'exploration haptique, repris de [TOR,06], d'après [WAL,00] .....	110
Figure 44 : Taxonomie des modes de saisie selon [CUT,90].....	111
Figure 45 : Modes de préhension les plus communs. Sont représentées les prises bi-digitales (1) <i>Tip pinch</i> et (2) <i>Lateral pinch</i> , la prise tri- digitale (3) <i>Palmar pinch</i> et la prise puissante (4) <i>Power grip</i> . Repris de [JON,06]......	112
Figure 46 : (a) Principe de fonctionnement du tribomètre utilisé ; (b) exemple de tribographe obtenu suite à deux essais consécutifs sur un sujet, repris de [YMC,01] .....	119
Figure 47 : Détail de l'état de surface du tissu utilisé comme interface entre le patin et la surface à caractériser, à une échelle de (a) 2000µm et (b) 1000µm (images obtenues par microscope numérique) .....	121
Figure 48 : Essai tribologique sur un avant-bras.....	122
Figure 49 : Graphe comparatif du coefficient de frottement en fonction des peaux caractérisées .....	122
Figure 50: Illustration des différentes catégories d'appui recensées dans un transport public urbain (exemple du tramway de Tours) .....	124
Figure 51 : Placement du patin de glissement sur l'échantillon.....	126
Figure 52 : Répartition des échantillons selon les descripteurs : adhérent, accrochant et lisse .....	127
Figure 53 : Représentation du signal des trois essais sur un même graphe pour un individu (a) et un échantillon (b).....	128
Figure 54 : Différences de forme de signal entre deux échantillons (c) et (d) .....	129
Figure 55 : Graphe comparatif du coefficient de frottement dynamique en fonction des échantillons caractérisés .....	130
Figure 56 : Observation de données aberrantes dans le plan PC1-PC2 dues à la forme bombée des échantillons concernés .....	131
Figure 57: Nouvelle répartition des échantillons dans le plan PC1-PC2 .....	132
Figure 58 : Comparaison des formes de signaux entre les thermoplastiques (à gauche) et les tissus (à droite) .....	133

Figure 59 : Échantillon thermoplastique avec ses trois rugosités .....	137
Figure 60 : Tribomètre amélioré par l'équipe du CETIM .....	138
Figure 61 : Profilomètre Bruker et direction de l'axe X .....	139
Figure 62: Présentation des échantillons pour l'épreuve de Napping.....	142
Figure 63: Panéliste créant sa configuration spatiale .....	143
Figure 64: Panéliste notant ses propres descripteurs tactiles sur la nappe .....	143
Figure 65 : Frictiogrammes des trois essais pour les surfaces EEP515_1, EEP40500_1, MICRO et PSA0.....	147
Figure 66 : Graphe comparatif du coefficient de frottement en fonction des échantillons caractérisés .....	148
Figure 67 : Graphe comparatif du coefficient Rq en fonction des échantillons caractérisés .	149
Figure 68 : Illustration de la dérive rencontrée avec le capteur piézoélectrique : exemple avec les forces de frottement obtenues pour la surface EEP515_1 .....	150
Figure 69 : Répartition des échantillons dans le plan PC1-PC2 de l'ACP .....	151
Figure 70 : Quatre configurations individuelles obtenues lors de l'épreuve de napping. Chaque échantillon a été positionné par chaque sujet sur une nappe circulaire de diamètre 90 cm. Les coordonnées des axes correspondent à des millimètres.....	153
Figure 71 : Représentation des 12 échantillons dans le plan (Dim1,Dim2).....	155
Figure 72 : Représentation des 12 échantillons dans le plan (Dim2,Dim3).....	155
Figure 73 : Représentation des 12 échantillons dans le plan (Dim3,Dim4).....	156
Figure 74 : Ellipses de confiance autour des positions des échantillons dans le plan (Dim1,Dim2) .....	157
Figure 75 : Ellipses de confiance autour des positions des échantillons dans le plan (Dim2,Dim3) .....	157
Figure 76 : Représentation des mots dans le plan (Dim1,Dim2) .....	160
Figure 77 : Représentation des mots dans le plan (Dim2,Dim3) .....	161
Figure 78 : Représentation des 22 sujets .....	163
Figure 79 : Tribomètre Renault SAS utilisé pour la recherche de corrélation entre coefficient de frottement et la perception glissante [CRO,04].....	166
Figure 80 : Définition globale du confort selon [GOF,94]. L'objet n'est pas à prendre au sens de chose matérielle, mais plutôt comme ce qui est opposé au sujet, ce qui peut être perçu, pensé ou voulu, qu'il soit matériel ou spirituel. Il peut s'agir donc d'un événement, d'un agent ou d'un objet, pour faire un lien avec la théorie cognitiviste des émotions vue dans la partie 2.2.2) Notion d'émotion. ....	177

Figure 81 : Confort et inconfort comme deux états discrets .....	179
Figure 82 : Confort et inconfort comme deux extrêmes d'un continuum unidimensionnel ..	179
Figure 83 : Confort et inconfort comme deux dimensions distinctes.....	181
Figure 84 : Modèle hypothétique du confort d'assise de Zhang <i>et al.</i> , repris de [ZHA,96] ..	182
Figure 85 : Modèle théorique de confort et d'inconfort d'assise, repris de [LOO,03] .....	183
Figure 86 : Modèle de confort simplifié, repris de [VIN,05].....	185
Figure 87 : Description des relations causales et fonctionnelles de l'inconfort, repris de [MOE,05] .....	186
Figure 88 : Nouveau modèle de confort de Vink et Hallbeck (2012) .....	187
Figure 89 : Modèle de Kano.....	189
Figure 90: Distances sociales chez l'humain (sphères proxémiques), selon [HAL,71] .....	194
Figure 91 : Différentes affluences et stratégies associées (à gauche : métro classe C de Munich ; à droite : classe « Silver » du métro de Dubaï) (crédit photos : S. H. Gosset).....	196
Figure 92 : Enfant assise sur un élément du mobilier dans un tramway à Berlin (crédit photo : S. H. Gosset).....	196
Figure 93 : Confort du corps individuel : modèle d'interaction sensorielle pour le contexte du voyageur urbain.....	199
Figure 94 : Confort du corps social : l'approche globale « 5 A » .....	202
Figure 95 : (a) Intérieur du nouveau métro de Hong Kong, (b) Détail d'une barre d'appui (photos personnelles).....	213

## Liste des annexes

Annexe A : Échantillons testés lors de la première étude .....	225
Annexe B : Détail des données tribologiques et sensorielles de la première exploration.....	228
Annexe C : Échantillons testés lors de la seconde étude.....	230
Annexe D : Profils de rugosité des échantillons.....	231
Annexe E : Photographies des surfaces au microscope numérique .....	232
Annexe F : Instruction épreuve Napping .....	233
Annexe G : Données brutes essais tribologiques : deuxième exploration .....	234
Annexe H : Données napping : coordonnées des échantillons.....	235
Annexe I : Données napping : fréquence des mots .....	236

# Introduction générale

Au milieu du 20<sup>e</sup> siècle, 30% de la population était urbaine [NAT,01]. Aujourd’hui, les citadins représentent plus de 50% de la population mondiale et continuent de progresser vers une proportion qui devrait passer à 66% d’ici 2050 [NAT,14]. Selon le directeur de la Division de la Population au sein de l’ONU, John Wilmoth, « la gestion des zones urbaines est devenue l’un des défis de développement les plus importants du 21<sup>e</sup> siècle ». Cette urbanisation galopante est intrinsèquement liée aux besoins de mobilité, l’une modelant l’autre et inversement [LUS,03]. Au sein des villes, la mobilité quotidienne demande des infrastructures et des réseaux de transport adaptés aux défis du nouveau millénaire.

## **De nouveaux défis pour la mobilité urbaine**

Le 20<sup>e</sup> siècle a été marqué par l’essor monumental de l’industrie de l’automobile. Après la Seconde Guerre Mondiale, les voitures faisaient figure de modernisme : elles sont rapides, indépendantes, et permettent de se déplacer toujours plus loin. Elles portent les valeurs essentielles de la société de consommation naissante. Pendant les Trente Glorieuses (1945-1973), les réflexions sur la mobilité s’adossent à la reconstruction, à l’aménagement étatique du territoire et au déplacement individuel : pour Georges Pompidou, « la ville doit s’adapter à l’automobile » [DÉS,13]. Malheureusement, le développement du « tout-voiture » a apporté son lot de conséquences pour les zones urbaines : pollution, bruit, embouteillages, destruction environnementale… Ces effets indésirables ont mené les décideurs politiques à adopter une nouvelle mentalité sur l’aménagement urbain et à développer les infrastructures et réseaux de transport collectif. Aujourd’hui, les mots d’ordre sont la compacité, la mixité, la densité, le développement durable, la lutte contre les gaz à effets de serre, la reconquête des espaces publics, ou encore le désengorgement des centres villes, saturés d’automobiles. Cela reste cependant très lent à se mettre en place, comme le déplore Clayton Lane, président de l’ITDP (*Institute for Transportation and Development Policy*), dans une étude sur les offres de transport disponibles dans des grandes agglomérations autour du monde : « les transports de masse devraient croître avec les villes, et pourtant dans la plupart des territoires, les pouvoirs publics comptent encore sur le trafic automobile comme premier mode de transport » [LEM,16]. En calculant la part d’habitants résidant à moins d’un kilomètre d’un moyen de transport public efficient tel qu’un métro, un tramway ou un bus, Paris intra-muros est la seule ville à faire figure

d'exemple avec un taux de 100%. Malheureusement, ce taux descend à 50% une fois le périphérique franchi, tendance qui se retrouve partout dans le monde [ITD,16].

### Contexte actuel des transports de voyageurs en France métropolitaine

En 2014, le transport de voyageurs à l'intérieur de la France métropolitaine<sup>1</sup> s'établit à 907 milliards de voyageurs-kilomètres<sup>2</sup> [CGD,16]. Depuis 1990, il a progressé en moyenne de 0,9% par an, à un rythme près de deux fois supérieur à celui de la population française métropolitaine (+0,5% par an). Rapporté à l'ensemble, ce niveau correspond à 38,9 kilomètres parcourus quotidiennement par chaque Français, tous modes confondus. Comparativement, ce nombre était de 35,6 kilomètres en 1990.

En 2014, le transport individuel (regroupant les voitures particulières et deux-roues motorisés français et étrangers) représente 721 milliards voy-km pour une part modale de 79,5% et le transport collectif 186 milliards voy-km pour une part modale complémentaire de 20,5%. Le Tableau 1 indique l'évolution des parts modales pour le transport intérieur en France métropolitaine depuis l'année 1990.

	1990	1995	2003	2008	2014
<b>Véhicules particuliers</b>	81,3	83,4	82,8	79,8	79,5
<b>Transport collectif</b>	18,7	16,6	17,2	20,2	20,5
<i>Autobus, autocars et tramways*</i>	7,1	6,9	6,3	7,2	7,7
<i>Transports ferrés</i>	10,1	8,2	9,4	11,5	11,3
<i>Transport aérien</i>	1,5	1,6	1,5	1,5	1,6

**En % de voy-km**

\* Bien que les tramways roulent sur des voies ferrées, ils sont inclus dans les transports routiers car contrairement aux métros essentiellement souterrains, ils circulent « en site propre » sur la voirie extérieure. Le Syndicat des Transports d'Île-de-France les intègre ainsi dans son réseau de surface.

**Champ :** France métropolitaine

**Sources :** SOeS, d'après le Bilan annuel de la circulation ; Stif-Omnil ; ensemble des opérateurs ferroviaires ; enquête annuelle sur les transports collectifs urbains (DGITM, Cerema, CGDD, GART, UTP) ; DGAC

Tableau 1: Évolution des parts modales pour le transport intérieur [CGD,16]

Depuis 1990, le transport collectif a progressé de 35% et sa part modale est passée de 18,7% à 20,5%. Le transport ferroviaire est le mode de transport qui croît le plus : +38%. Sur la même période, le transport collectif routier croît de 34% et le transport aérien intérieur de 24%. De

---

<sup>1</sup> Transport et liaisons aériennes entre départements et régions d'Outre-mer et métropole non pris en compte

<sup>2</sup> Le voyageur-kilomètre (voy-km) est une unité de mesure additive combinant deux dimensions : le nombre de voyageurs et la distance parcourue en kilomètres. Elle est équivalente au produit du nombre de voyageurs transportés par la distance moyenne parcourue par voyageur, mais aussi au produit du nombre de voyages par la distance moyenne du voyage. Elle mesure la quantité de service rendu par le transport.

1995 à 2008, le transport ferré croît de façon soutenue de 3,6% par an en moyenne. Depuis 2008, sa progression est moindre (+0,2% par an en moyenne).

Outre leur différenciation par modes, les transports collectifs se distinguent également selon leurs distances moyennes parcourues, se répartissant entre transports de longue distance et transports de proximité. Comme l'intérêt se porte ici sur les zones urbaines, les transports de longue distance ne sont pas abordés. Les transports collectifs de proximité (i.e. déplacement de moins de 80 kilomètres à vol d'oiseau) sont répartis selon la Figure 1. Il est à noter que les transports collectifs urbains (TCU) d'Île-de-France représentent la moitié des voyageurs-kilomètres des transports de proximité (49,8% en 2014) quand ceux des autres régions en représentent 16,6%.

Depuis 1990, les TCU hors Île-de-France sont deux fois plus dynamiques que ceux d'Île-de-France : ils augmentent en effet de 2,7% par an en moyenne, tandis que ceux d'Île-de-France augmentent de 1,3%. Cependant, le transport collectif francilien continue de représenter 75% des TCU en 2014 (80,7% en 1990).

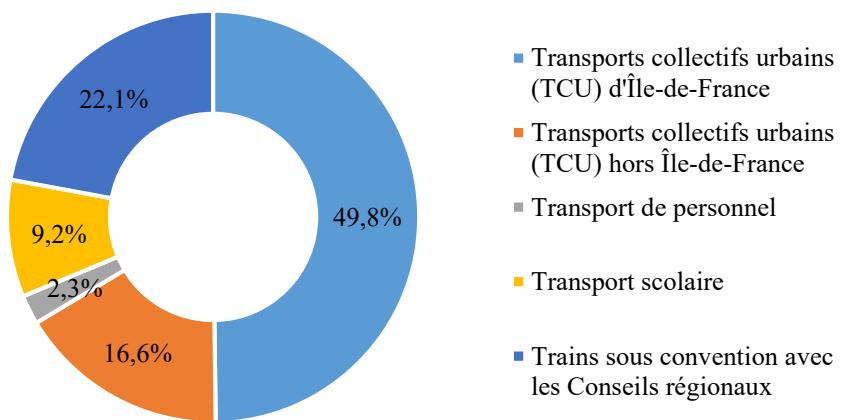


Figure 1: Répartition des transports collectifs de proximité en France métropolitaine en 2014 [CGD,16]  
(Sources : SOeS, d'après Stif-Omnil ; ensemble des opérateurs ferroviaires ; enquête annuelle sur les transports collectifs urbains (DGITM, Cerema, CGDD,GART, UTP) ; DEPP)

En comparant le trafic des TCU d'Île-de-France avec la population francilienne qui représente *a priori* la plus grande part de ses usagers, il ressort que le trafic a davantage augmenté que la population. Ainsi, si la population francilienne a augmenté de 9,6% depuis les années 2000, le trafic en voyageurs-kilomètres a augmenté de bien davantage (+32%) : les franciliens sont beaucoup plus mobiles qu'auparavant. Certes, ils ne sont pas les seuls utilisateurs des transports urbains d'Île-de-France : les utilisateurs occasionnels (dont les touristes) en représentent une part importante (mais non évaluée). En nombre de voyageurs, le trafic a augmenté de 28%. La distance moyenne de parcours s'est donc allongée depuis quatorze ans.

Sur la même période, la population des périmètres de transport urbain (PTU<sup>3</sup>) hors Île-de-France a augmenté de 29%. Cette augmentation est liée à la fois à la croissance de la population dans les PTU et à leur élargissement intégrant régulièrement de nouvelles communes. Depuis 2000, leur trafic en voyageurs-kilomètres a de son côté augmenté de 46%.

Cette très forte croissance du TCU hors Île-de-France correspond surtout à une période pendant laquelle l'offre de transport s'est très fortement accrue : depuis 1990, la construction de nouvelles lignes de tramways dans de nombreuses agglomérations (ou le prolongement de lignes existantes) en est probablement la manifestation la plus caractéristique. En 1995, 7 métropoles régionales disposaient de tramways, soient 10 lignes pour une longueur cumulée de 99 kilomètres. En 2014, 27 villes hors Île-de-France disposent de tramways ou de transports sur voie réservée (TVR<sup>4</sup> comme à Caen ou à Nancy), soient 61 lignes pour une longueur cumulée de 674 kilomètres, soit une multiplication par sept en près de vingt ans. La part du tramway dans les TCU hors Île-de-France est d'ailleurs neuf fois supérieure qu'en Île-de-France (respectivement 22,4% et 2,4%). La Figure 2 illustre la répartition des modes de TCU en 2014.

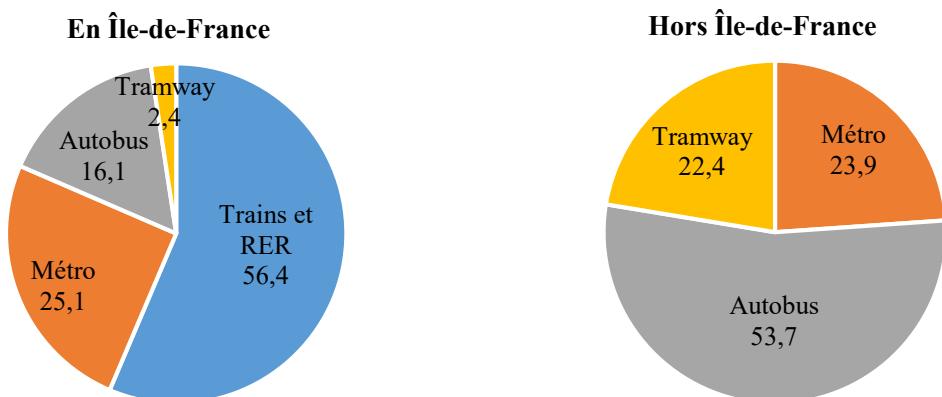


Figure 2 : Répartition des modes de transport collectif urbain en 2014 (en % de voyageurs-kilomètres) [CGD,16]  
(Sources : SOeS, d'après Stif-Omnil ; enquête annuelle sur les transports collectifs urbains (DGITM, Cerema, CGDD, GART, UTP)

### **La croissance du marché ferroviaire en milieu urbain**

Au cours des dernières années, le marché ferroviaire a donc été tiré par la croissance économique et démographique, par la montée de l'urbanisation et par des préoccupations environnementales de plus en plus marquées. Par ailleurs, la saturation des infrastructures de transport existantes entraîne un report de l'aérien et de la route vers le rail, ainsi que de

<sup>3</sup> Une ou plusieurs communes réunies au sein d'une structure intercommunale pour l'organisation d'un service de transport public urbain. La collectivité locale compétente est désignée comme autorité organisatrice de transports urbains (AOTU), ou plus récemment autorité organisatrice de mobilité (AOM). Depuis la loi du 7 août 2015 portant nouvelle organisation territoriale de la République, le périmètre de transports urbains (PTU) devient le ressort territorial de l'AOM.

<sup>4</sup> Le TVR appartient à la catégorie des bus à haut niveau de service (BHNS) guidé par un rail central, dont il peut s'extraire. Il n'est pas un tramway, car il ne roule pas sur rails mais sur pneus.

nouveaux investissements pour le développement d'infrastructures ferroviaires [FAB,11]. La combinaison de ces facteurs est à l'origine de la croissance du marché, une tendance qui devrait se maintenir à long terme. Les mesures prises dans les villes du monde entier pour restreindre la circulation automobile alors que les besoins de mobilité vont croissant profitent aux offres de transport ferroviaire en milieu urbain. Ce « défi du siècle » implique des évolutions dans les moyens de transport collectif, notamment sur des plans comme l'accessibilité, le confort, l'organisation de l'habitacle ou des voitures, ainsi que la prise en compte de la sécurité, qu'elle soit active (infrastructures, signalisations, personnel de sécurité...) ou passive (aménagements intérieurs, dynamique du véhicule..). Il s'accompagne également d'un changement démographique : le vieillissement général de la population entraîne une augmentation de la moyenne d'âge des passagers potentiels de transports en commun (voir Figure 3).

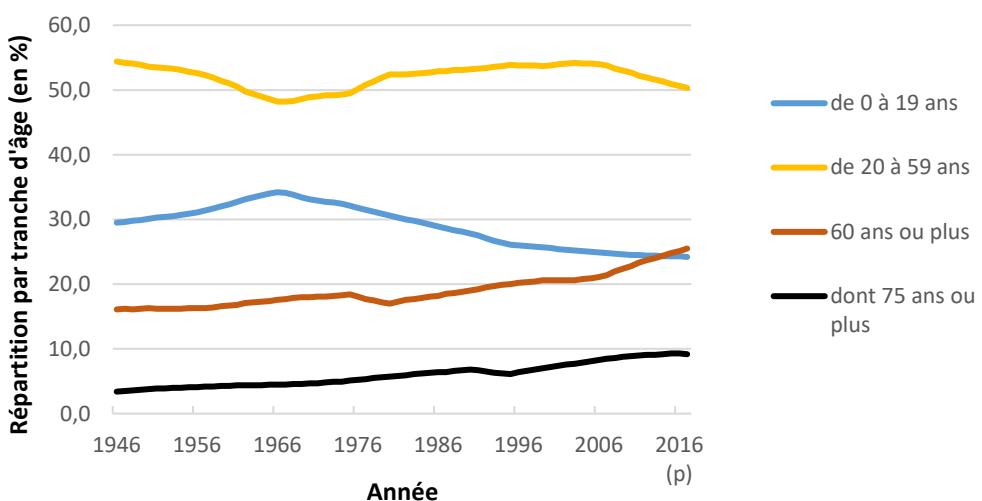


Figure 3 : Évolution de la structure de la population en France métropolitaine, de 1946 à 2017 (résultats provisoires à fin 2016 pour les années 2015 à 2017), source Insee, estimations de population

Pour faire face à la demande croissante de mobilité, les nouveaux aménagements intérieurs de véhicules de transports publics urbains ou péri-urbains intègrent de plus en plus le passager debout. Cependant, la circulation urbaine engendre des situations potentiellement inconfortables voire dangereuses pour ce dernier, notamment à travers les mouvements d'accélération ou de freinage du véhicule, ballottant les voyageurs et pouvant mener à des collisions légères entre eux. La proportion des personnes debout dans le véhicule par rapport aux personnes assises est ainsi en forte augmentation, offrant de fait moins de possibilités de s'asseoir aux passagers. Il y a donc nécessité de disposer des éléments de sécurisation et de confort à l'intérieur des habitacles, afin que les voyageurs debout puissent effectuer leurs déplacements sans encombre. Ces éléments, appelés communément appuis, supports ou

maintiens, forment l'interface principale entre le passager et le matériel roulant, mais aujourd'hui leur conception relève plutôt de choix par défaut ou de l'expertise des concepteurs.

### **En quête de différenciation**

Aujourd'hui, les constructeurs ferroviaires sont au coude à coude en matière de technologie et de maîtrise technique. Ils sont capables de délivrer des performances similaires pour des coûts semblables. La différenciation doit donc s'opérer à un autre niveau, plus fin. L'attention est maintenant portée sur des détails comme les matériaux utilisés pour le revêtement des sièges, des sols ou des barres de maintien, les couleurs ou encore l'ambiance lumineuse [EUR,12]. Cependant, les constructeurs ferroviaires maîtrisent encore peu les perceptions des passagers. Cela est notamment dû au fait que le contexte ferroviaire s'accompagne de contraintes techniques très restrictives afin de correspondre aux normes de sécurité, que ce soit pour un transport de longue distance ou de proximité. Régine Charvet-Pello, directrice de l'agence de design RCP Design Global, notait en 2012 : « quand on conçoit pour le rail, on se rend vite compte qu'avec les normes en vigueur on est souvent obligé d'utiliser les mêmes types de matériaux, ce qui limite évidemment nos possibilités. Et en conséquence, le confort des passagers passe au second plan » [EUR,12]. Pour aider les concepteurs à arbitrer leurs décisions en matière d'aménagement intérieur, la solution semble l'approche sensorielle, donnant un cadre pour l'intégration des aspects perçus par les passagers dans la conception. Dès lors, il convient de replacer l'humain au cœur du design, en vue de proposer un transport plus confortable et « mieux perçu ».

### **Vers une approche centrée sur l'humain et ses perceptions**

Cette réflexion semble encore balbutiante chez les industriels concevant des produits pour l'espace public, mais l'intérêt pour une conception anthropocentrale – centrée sur l'humain – croît de plus en plus depuis ces dernières années [ING,97]. Cette approche est davantage développée pour les objets à usage personnel, notamment via une démarche d'ergonomie du produit, où l'utilisateur est identifiable. Dans l'espace public, et donc dans les infrastructures ferroviaires, le concepteur doit proposer un objet « pour le plus grand nombre », devant satisfaire 95% des usagers. Il faut « être consensuel sans tomber dans un truc complètement inintéressant », rapporte Stéphane Pottier, directeur du design de l'agence MBD en 2014 [SLA,14]. Pour l'heure, lorsqu'il s'agit d'intégrer des données liées au passager dans le cahier des charges fonctionnels du matériel roulant, celles-ci correspondent principalement à des données anthropométriques modélisant un « passager type ». La Figure 4 montre un extrait d'un cahier des charges fonctionnel de la SNCF, ici pour la fourniture de sièges passagers 1<sup>ère</sup> classe des rames TGV Atlantique et TGV Réseau, daté de 2002. La caractérisation du passager

type se décline généralement en deux paramètres. Le premier, ses dimensions anthropométriques, définit une marge de manœuvre en matière de tailles et distances à respecter, allant de la femme petite (5<sup>ème</sup> percentile) à l'homme grand (95<sup>ème</sup> percentile). Ces données peuvent se retrouver dans des modèles anthropométriques comme la norme X35-002 ou les bases de données ERGODATA [AFN,86][ERG,A]. Le second paramètre concerne les efforts générés par un passager sur le matériel roulant, notamment sa masse moyenne et les efforts et couples maximaux exercés sur les différents segments du corps du passager pour assurer sa sécurité en cas de chocs ou d'accélérations sévères. La documentation, par exemple la fiche UIC 566, préconise une masse de 100 kilogrammes maximum pour un passager, 80 kg en moyenne avec ses bagages et 75 kg en moyenne sans bagage [UIC,90]. Dans cet esprit, lorsqu'il s'agit de confort, il est souvent traduit en termes de dimensions de sièges ou de portes, restant dans une perspective très mécanique.

### **3.2.2 Caractérisation du passager type**

#### **3.2.2.1 Dimensions du passager**

Les dimensions du passager sont caractérisées par les modèles anthropométriques de la population masculine et féminine repris dans le fascicule de documentation X 35-002 qui définit la femme petite (5<sup>ème</sup> percentile) et l'homme grand (95<sup>ème</sup> percentile homme) ainsi que les synthèses documentaires ERGODATA concernant la population française.

#### **3.2.2.2 Efforts générés par un passager**

La masse d'un passager doit être prise égale à 100 kg (fiche UIC 566 §2.1.1.1.1).

Les efforts et couples maximaux pouvant être exercés par un voyageur sont précisés dans les annexes 3 à 6 de la fiche UIC 566.

Figure 4 : Extrait d'un cahier des charges fonctionnels SNCF – Caractérisation du passager type

Cela pose un premier problème, à l'apparence évident : les passagers ne sont pas des moyennes statistiques, aux proportions idéales, tel l'Homme de Vitruve (Figure 5). Ils portent des vêtements, plus ou moins larges suivant les saisons, des bagages, plus ou moins importants suivant leur destination, ils peuvent voyager seuls ou en groupe, ce qui résulte en des configurations spatiales différentes, etc. Vis-à-vis des appuis, tous n'ont pas la même taille de main, la même possibilité de s'accrocher à d'éventuelles poignées placées en hauteur, etc. De plus, le matériel roulant doit pouvoir proposer suffisamment de sécurité pour déplacer un maximum de personnes à la fois, ce qui se fait souvent au détriment du confort... L'exemple le plus marquant pour les parisiens reste le « calvaire » de la ligne 13 [LEM,08]. La problématique du transport urbain est donc très complexe, pour les constructeurs comme pour les opérateurs.

Les plus atteints par une conception non-maîtrisée sont les passagers, eux dont les attentes semblent pourtant si peu prises en compte.

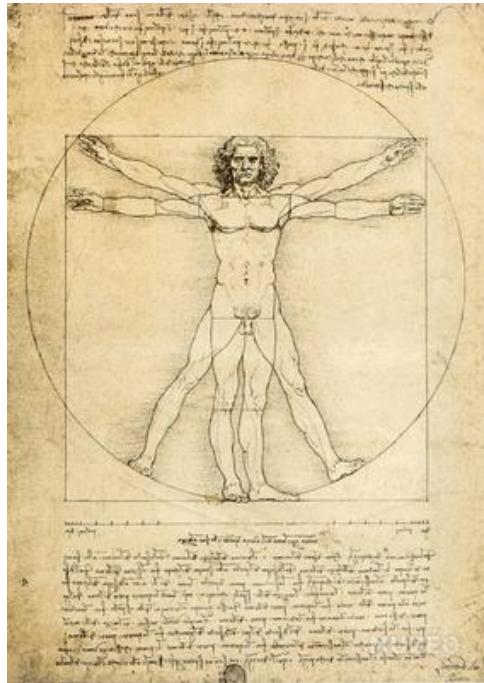


Figure 5 : L'Homme de Vitruve, dessiné par Leonard de Vinci vers 1490

### **Arbitrage de contraintes contradictoires : résoudre la quadrature du cercle**

L'historienne de l'art Delphine Désveaux mentionne parfaitement cette difficulté pour l'exemple du tramway: « Au confluent de nombreuses disciplines, la réalisation d'une ligne de tramway et l'aménagement de l'espace public qui en découle exigent une méthodologie originale et des équipes de conception transversales. Ainsi, au-delà de son rôle de couture géographique, le tramway est un grand entremetteur : il marie, dans le désordre, urbanisme et ingénierie, architecture et design, paysage et art ainsi qu'une multitude d'intervenants – investisseurs, gestionnaires, exploitants, utilisateurs, élus, riverains, constructeurs, propriétaires – qui défendent leurs propres intérêts. Dans cette cacophonie, l'idée consiste alors à s'entendre pour rendre possible une mission qui relève de la quadrature du cercle. Car l'on devine mal ce qu'il faut de temps, de patience, pour lever les contradictions, les complexités inouïes que suppose la création d'une ligne de tramway » [DÉS,13].

Le paradoxe fondamental à résoudre pour les concepteurs ferroviaires est la « jauge » entre confort et capacité. Un système de transport urbain est initialement mis en place pour répondre à une demande de mobilité en milieu urbain, comme indiqué précédemment. De tels milieux sont extrêmement contraints en termes d'espace et parfois très denses au niveau de la population. L'objectif est donc de pouvoir transporter le plus de personnes possibles, en moins de temps possible, tout cela dans un espace réduit. Étant la contrainte principale du système,

elle est naturellement traduite comme la plus importante. De plus, les passagers eux-mêmes accordent la plus haute importance au fait d'arriver à destination à temps [GOF,94]. Pourtant, il n'y a pas que la physique qui vient jouer sur cette contrainte : il est malavisé de vouloir entasser plus de quatre personnes au mètre carré, seuil arbitraire utilisé aujourd'hui, mais déjà critique en termes de confort. Le confort semble alors déjà incompatible avec le critère de capacité : une voiture avec un grand nombre de sièges proposera plus d'espace aux passagers, mais elle ne pourra transporter qu'un petit nombre de personnes ; à l'inverse, une plateforme sans sièges permettra de transporter un maximum de personnes, mais les passagers disposeront de très peu d'espace personnel dans le cas d'une forte fréquentation. Cette dualité peut se décliner sous d'autres concepts : espace public *vs* intimité, sécurité *vs* liberté de mouvement, prendre son métro à l'heure *vs* être en retard mais espérer avoir plus de place... etc.

Ainsi, il faut savoir trouver des compromis, pour optimiser la jauge capacité/confort. Les stratégies sont différentes suivant le lieu géographique, et principalement suivant la densité de population. A Hong-Kong, par exemple, le métro présente uniquement des banquettes latérales afin d'optimiser la capacité (voir Figure 6), tandis que le tramway de Tours présente plus de variétés d'assises pour optimiser le confort.



Figure 6 : Différences d'aménagement intérieur entre le métro de Hong Kong et le tramway de Tours

Au vu de tous ces éléments, l'approche sensorielle veut se placer en tant que solution pour l'arbitrage de ces multiples contradictions. Le système de transport étant très vaste et très complexe, la recherche entreprise ici concerne en particulier les appuis et maintiens à l'intérieur des habitacles, interfaces principales entre le passager et le transport. Cela englobe tous les éléments intérieurs permettant d'accueillir le passager et de garantir sa posture lors du voyage, celle-ci allant de la position assise aux positions debout et intermédiaires (ex : sièges, poignées, barres de maintien, etc.).

## **Contexte de recherche**

Cette recherche exploratoire est née du partenariat entre le constructeur ferroviaire Alstom, un des leaders mondiaux sur le marché du transport public ferroviaire, et de la société RCP Design Global. Elle est le fruit d'une réflexion collaborative entre des départements d'ingénierie et de design, à la croisée des sciences naturelles et des sciences humaines et sociales. La création du Centre d'Étude et de Recherche sur les Technologies du Sensoriel (CERTESENS) en mars 2013, sous l'impulsion de RCP Design Global, a permis d'accueillir deux thèses de doctorat s'inscrivant dans le programme de recherche Alstom intitulé : « Approche globale des aspects de Différentiation perceptible des produits » (AgDN). Ce projet pose la question générale : « Comment innover et se différencier sur le marché des transports publics urbains, sans s'opposer ni aux attentes des entreprises clientes, ni aux attentes des passagers qu'elles transportent » ? Cette recherche à deux têtes propose donc de réfléchir sur les aspects perçus par les passagers pour guider la conception du matériel roulant destiné au transport public urbain (i.e. type tramway ou métro). Elle présente deux approches qui se veulent complémentaires. La première s'intéresse à l'interaction entre les passagers et le véhicule, à travers une approche spatiale et comportementale. Elle est menée par Stéphanie H. Gosset, rattachée au laboratoire Centre Interdisciplinaire Cités, Territoires, Environnement et Sociétés (CITERES) – UMR CNRS 7324, équipe Ingénierie du projet d'aménagement, paysage et environnement (IPAPE). L'intitulé de cette thèse parallèle est « Le placement des individus comme organisation spatiale des habitacles de transports publics urbains – Une modélisation littéraire au service de l'innovation en design ». La deuxième s'intéresse à la perception du matériel roulant par les passagers, à travers une approche sensorielle de l'interaction entre les individus et les matériaux constituant les appuis au sein de l'habitacle. C'est cette recherche dont il est question dans ce manuscrit. Les deux thèses sont à mettre en relation afin d'avoir tous les éléments de réflexion émis par ce projet « hybride », à mi-chemin entre sciences naturelles et sciences humaines. Leur objectif commun est de développer et valider des outils méthodologiques permettant d'étudier les aspects perceptibles différenciant des matériels ferroviaires Alstom, anciens et actuels, afin de spécifier des améliorations en adéquation avec les attentes des clients et en cohérence avec les points de vue économiques et techniques.

## **Objectif général de la recherche**

L'objectif de ce projet est non pas tant de donner une solution toute faite pour le design, mais plutôt de mener une réflexion transdisciplinaire sur la question de la représentation de l'utilisateur du transport public urbain dans la conception du matériel roulant. L'étude se focalise sur les systèmes d'appuis et de maintiens dans l'habitacle et sur leurs aspects perçus

par les passagers. La différenciation des constructeurs par les sens via la création d'ambiance impose une détection des attentes de l'usager puis sa traduction en caractéristiques objectives en vue d'une intégration aux cahiers des charges. Maîtriser ces aspects perceptibles permettrait *in fine* un arbitrage sur la question du choix des matériaux pour les différents supports présents dans l'habitacle, pouvant se décliner sous différentes formes à identifier. Ce projet est une première étape exploratoire menant à fonder une base de connaissances autour de la notion de confort dans le matériel roulant.

### **Plan de la thèse**

Maintenant que le contexte global a été abordé dans cette introduction générale, le premier chapitre présentera plus en détail ce qu'est l'approche sensorielle à proprement parler. L'ingénierie anthropocentrée y sera abordée plus en longueur, à travers les disciplines qu'elle mobilise ainsi que les enjeux auxquels elle permet de répondre. En effet, la multiplicité des acteurs dans le développement d'un service de transport urbain participe à une certaine « dilution » de la représentation de l'utilisateur final du produit, le passager. Le design sensoriel, né de cette nouvelle approche, propose des méthodes permettant de traduire les aspects perceptifs et les attentes de l'usager en mesures objectives en vue de leur intégration aux cahiers des charges. La métrologie sensorielle est un élément-clé de cette démarche. Son historique ainsi que ses méthodes y seront dévoilés sommairement. Une fois les bases de l'approche sensorielle posées, les différentes problématiques abordées dans cette thèse seront proposées plus en détail. La première concerne le développement d'une méthode instrumentale pour la mesure des propriétés tactiles d'une surface, notamment pour le cas du toucher tangentiel, faisant appel à la fois à la tribologie et à la métrologie sensorielle. La deuxième fera écho à la question du confort d'utilisation des différents appuis lors d'un voyage, l'objectif étant de comprendre les différents facteurs entrant en jeu dans la perception du confort et d'éventuellement déterminer des propriétés de confort pour les matériaux. La deuxième partie de ce premier chapitre exposera dans un premier temps tout le mécanisme derrière les sens et les sensations, puis le fonctionnement du processus perceptif, pour enfin terminer avec la perception tactile. Comprendre comment l'humain ressent les choses et perçoit son environnement permettra évidemment de mieux appréhender le résultat de l'interaction entre le passager et l'objet « support » dans l'habitacle.

Le deuxième chapitre souhaitera répondre à la première question de recherche. L'objectif sera de développer une méthode instrumentale en lien avec des méthodes d'évaluation sensorielle afin de proposer une mesure objective des propriétés organoleptiques de surfaces. Le cadre d'étude se restreint au toucher tangentiel, et plus particulièrement à la

sensation de glissement (ou à l'inverse d'accroche) lors du toucher d'un matériau. Cette première étude se divise en trois parties. La première, brièvement décrite, commence par une étude préliminaire ayant comme but de confirmer la validité du tribomètre utilisé (soit de vérifier sa capacité à être répétable et reproductible). La deuxième est effectuée sur un groupe d'échantillons suffisamment diversifié pour explorer les corrélations éventuelles entre les résultats des essais tribologiques et les résultats d'un classement effectué selon trois descripteurs tactiles. Elle a pour objectif de valider l'approche tribologique pour la mesure de propriétés tactiles d'une surface. La troisième et dernière étude souhaite approfondir les résultats obtenus lors de la deuxième étude, en réduisant les différences entre les échantillons. Suite à ces explorations successives, il sera vu que l'approche instrumentale ne permet d'obtenir qu'une petite quantité d'informations sur les réponses sensorielles. Il faudra alors prendre plus de recul et sortir de la mesure purement physique pour aborder la question de la perception du toucher, et par extension la perception du confort d'utilisation.

La perception est ainsi un phénomène très complexe, mettant en jeu une multitude de facteurs qui ne peuvent pour la plupart pas être directement mesurés. Lorsqu'il s'agit d'évaluer les propriétés de confort d'un produit, il faut rentrer dans une démarche holistique et considérer les variables liées au contexte d'interaction. Afin de mieux comprendre ce phénomène, la première partie du troisième chapitre reviendra sur la notion même de confort. Il sera vu que le confort est profondément subjectif, dépendant du sujet, de son environnement, de sa culture, de la société dans laquelle il évolue, et plus encore. Malgré cette apparente complexité, il est néanmoins possible de poser un cadre théorique de référence et de mettre en place l'idée fondamentale du système sujet-objet dans un contexte d'interaction. Il sera également vu que le confort est aujourd'hui abordé sous de multiples angles et étudié par de nombreuses disciplines scientifiques. La deuxième partie traitera du paradigme du confort, à travers l'idée de ses représentations, développées en ergonomie pour déterminer les causes de confort ou d'inconfort lors de l'utilisation d'un produit. Ces dernières ont considérablement évolué ces dernières années, aboutissant à des modèles utilisables en conception. Cela dit, comme la perception du confort est spécifique au contexte, il s'avérera que les modèles actuels ne permettent pas de répondre à la problématique des transports publics urbains, étant orientés plutôt vers le confort d'assise en milieu isolé. Ainsi, de nouvelles représentations vont être proposées pour le cas particulier du transport public urbain.

Les premiers chapitres auront finalement présenté l'essentiel des éléments permettant la construction d'une nouvelle représentation du confort pour le transport public urbain, orienté sur l'interaction entre le passager et l'appui. La dernière partie de ce dernier chapitre se scindera

en deux parties complémentaires. La première présentera en quelque sorte le « niveau local » de l’interaction. Lorsque le passager va interagir avec l’objet « appui », possédant ses propres qualités, toute une série d’éléments vont rentrer en jeu lors de la perception et de l’appréciation de cette interaction. L’hypothèse est faite que la connaissance de ces éléments, de ces facteurs d’influence, permettra d’identifier clairement les aspects sensoriels à considérer lors de la conception de l’objet, et donc d’aider à orienter l’étude vers ce qui est important et ce qui l’est potentiellement moins. Cela permettra également d’avoir une vision d’ensemble et de déterminer ce sur quoi le concepteur peut agir, car bien évidemment il est impossible de contrôler tout l’environnement, surtout lorsque le paramètre humain est aussi important. Cette vision sera ensuite complétée par un niveau plus « global », modélisant l’influence potentielle des différentes étapes gravitant autour de l’utilisation d’un appui. Cette deuxième partie s’inspire de l’analyse micropsychologique et souhaite mettre à plat les différentes actions menées par le passager pouvant influencer sa relation avec le transport. Elle permettra à son tour d’identifier les aspects plutôt liés à l’environnement et se base en partie sur les observations menées par Stéphanie H. Gosset.

Finalement, cette réflexion pluridisciplinaire apportera les premiers éléments pour une conception mieux maîtrisée d’un point de vue de la perception du passager, et créera le fondement d’une base de connaissances sur la notion de confort dans un transport public urbain.

# Chapitre 1 : L'approche sensorielle comme outil de différenciation

## Introduction

Les transports publics urbains sont le reflet de la société et de la ville dans laquelle ils sont implantés. Autrefois une alternative pour les plus aisés à la marche ou au cheval, les véhicules publics ont mis plusieurs siècles à se mettre en place, connaissant une popularité en dents de scie avant de prendre leur essor avec la société post-industrielle [ROB,74]. En effet, la prise de conscience écologique et la nécessité d'un désengorgement des voies urbaines ont été le terreau de la croissance du marché du transport public ces dernières décennies. Ces nouveaux enjeux politiques et économiques ont amené leur lot de nouvelles problématiques pour les constructeurs ferroviaires. Implanter un système de transport dans une ville n'est pas une mince affaire, il s'agit d'un programme politique mûrement réfléchi qui prend plusieurs années d'étude puis de construction. Si le choix est porté sur un transport collectif en site propre<sup>5</sup>, il faut étudier la faisabilité de l'infrastructure, se demander s'il est possible de faire passer la voie à travers tel ou tel quartier et si le nouveau réseau attirera suffisamment d'utilisateurs pour espérer une certaine rentabilité. L'objectif pour le constructeur ferroviaire est ainsi de proposer au futur exploitant une solution satisfaisant à la fois ses intérêts mais également celui des futurs utilisateurs. Il fait face alors à des problématiques qui se situent sur différents plans. Les plus importantes se situent sur les plans techniques et technologiques, à savoir comment mettre en place le nouveau système dans une structure déjà existante ou non, ou comment concevoir le matériel roulant pour le rendre le plus efficient possible, afin de réduire au maximum la maintenance tout en garantissant une certaine sécurité. Mais il y a également les problématiques sur le plan humain : le transport doit être accessible, doit s'accompagner d'informations suffisantes pour guider les passagers et il doit assurer un certain niveau de confort. Aujourd'hui, la technologie et la technique sont bien maîtrisées par les différents acteurs du domaine ferroviaire, mais le facteur humain ne l'est que très peu. La représentation de l'humain dans la conception de produit, dans le sens de sa place dans les différentes étapes de la conception et de sa définition propre dans le cahier des charges, n'est pas si évidente aujourd'hui. Le matériel

---

<sup>5</sup> Transport en commun qui emprunte une voie ou un espace qui lui est réservé (e.g. le tramway ou le métro)

roulant n'est bien souvent que le dernier maillon envisagé, quand l'infrastructure a déjà été pensée, or il est l'interface principale entre le passager et le service proposé, à travers son design intérieur.

Alstom, figurant parmi les leaders mondiaux du transport ferroviaire, souhaite miser sur une conception hybride, proposée par l'agence RCP Design Global, alliant une démarche anthropocentrale, centrée sur l'humain et ses perceptions, à celle déjà empruntée, technocentrale, centrée sur les fonctionnalités du matériel roulant lui-même. Cette nouvelle démarche s'appuie sur l'approche sensorielle, où l'effort de conception se porte sur ce qui est principalement perçu par le futur utilisateur. Cette « hybridation » va permettre de fournir les clés d'un « ADN sensoriel » propre au constructeur, menant à une différenciation du matériel roulant. Ce premier chapitre évoquera cette problématique d'intégration de données liées aux perceptions, à l'origine de cette recherche. La première partie de ce chapitre présentera d'abord globalement l'Ingénierie Anthropocentrale et la nécessité d'adopter ce nouveau regard centré sur l'humain pour la conception. Dans cette démarche s'inscrit le design sensoriel, adoptant des outils et des méthodes permettant d'analyser le phénomène d'interaction entre le produit et son utilisateur en s'intéressant aux aspects perceptibles du produit. Cela amènera à poser la problématique de recherche qui guidera ce manuscrit, ainsi que les différentes questions de recherche qui seront abordées. La deuxième partie portera sur le système perceptif humain. Elle permettra de bien comprendre comment l'humain perçoit son environnement et quels sont les outils psychophysiologiques à sa disposition. Un dernier point sera finalement fait sur la perception tactile, sens clé mobilisé lorsque le passager est en appui lors de son déplacement dans un transport public urbain.

## 1) L'approche sensorielle

Dans le monde du transport public, Alstom se trouve aujourd'hui parmi les leaders mondiaux en matière de conception et de construction de matériels roulants. Cette entreprise poursuit son activité d'innovation et de développement en s'intéressant tout particulièrement à l'évolution des rapports entre le matériel de transport et les multiples usages et pratiques développés par les utilisateurs et les représentations qu'ils se font de ces matériels.

Les éléments actuels de conception des matériels roulants sont aujourd'hui peu maîtrisés d'un point de vue de la perception du passager. Le système de transport, très complexe et faisant appel à de nombreux domaines des sciences de l'ingénieur (génie électrique, génie civil, science des matériaux, etc.) se trouve « hyper-constraint » d'un point de vue technique, si bien qu'il en

éclipse l'utilisateur final : l'usager. Les normes en vigueur concernant les usagers donnent surtout des directives pour assurer leur sécurité, mais rien ne porte sur leur confort en lui-même. Or, dans un marché où tous les acteurs sont sur un pied d'égalité du point de vue de la technologie, c'est sur cet élément qu'ils vont devoir se différencier. L'enjeu est donc de disposer de moyens pour concevoir des matériels roulants toujours plus confortables, proposant une meilleure « expérience passager » (de la même manière que pour les compagnies aériennes [BAU,15]), et permettre de décliner une signature identifiable (perçue et reconnue) sans s'opposer à la réponse attendue des entreprises clientes, au service des passagers qu'elles transportent.

Dans cette première partie, l'Ingénierie Anthropocentrale, démarche portant sur une conception centrée sur les perceptions des usagers, sera introduite. Cette approche permet de prendre en compte les facteurs humains pour la conception, incluant l'étude de conditions propices associées à la sensation de confort. Elle fait appel à de nombreux domaines scientifiques qui viennent compléter les connaissances de l'ingénieur « technique » en vue de l'aider à mieux appréhender les facteurs humains. De cette nouvelle démarche est né le « design sensoriel », discipline du design portant sur la maîtrise des aspects perçus des produits. Il s'accompagne des outils méthodologiques de l'évaluation sensorielle et plus largement de l'ingénierie sensorielle orientée conception. Une vue d'ensemble de cette démarche et de ses outils sera présentée. Enfin, cette première partie s'achèvera par la mise en place de la problématique de recherche et des questions auxquelles cette thèse tâchera de répondre.

### 1.1) Une conception centrée sur l'utilisateur

La question du confort appliquée au domaine des transports va soulever plusieurs enjeux pour les constructeurs ferroviaires. Comme le notait Le Goff : « le confort, dans ses applications techniques, doit répondre, pour le constructeur, à une triple exigence : technique, d'une part, c'est-à-dire liée aux caractéristiques mêmes du véhicule, commerciale d'autre part, c'est-à-dire liée à la fois à la concurrence et à la clientèle, situationnelle enfin dans son application directe, c'est-à-dire son utilisation par le passager » ([GOF,94], p. 167). Ces différents enjeux ne vont pas avoir les mêmes poids ni engager les mêmes préoccupations pour le constructeur. Au final, il reste dépendant d'un impératif de vente, ce qui l'oblige à répondre avant tout aux exigences de l'exploitant, son client, en lui proposant le meilleur rapport qualité/prix dans un temps restreint. Dans cette perspective, il apparaît que le passager, l'usager final du produit « matériel roulant », se situe plutôt en bout de chaîne. Ce que souhaite apporter la démarche « anthropocentrale » (centrée sur l'humain et par extension sur l'utilisateur final du produit) est

principalement de remettre l'usager au cœur du processus de conception, en vue de lui proposer un produit répondant mieux à ses attentes.

### 1.1.1) Définition de l'Ingénierie Anthropocentrale

Comment rendre compte des facteurs humains dans un cahier des charges ? Pour les concepteurs, il s'agit d'une question relativement récente, qui est apparue avec le développement de l'ergonomie à partir des années soixante. Auparavant destinée à améliorer les machines industrielles pour le bien de ceux qui les manipulent à longueur de journée [WIS,85], l'ergonomie a donné naissance à une démarche de conception centrée sur l'humain qui se développe de plus en plus depuis les années quatre-vingt-dix : l'Ingénierie Anthropocentrale [ING,97]. Cette nouvelle approche propose un cadre d'étude visant à améliorer le confort d'usage des produits, via l'analyse des perceptions et du comportement humain dans le contexte de la vie quotidienne ou professionnelle.

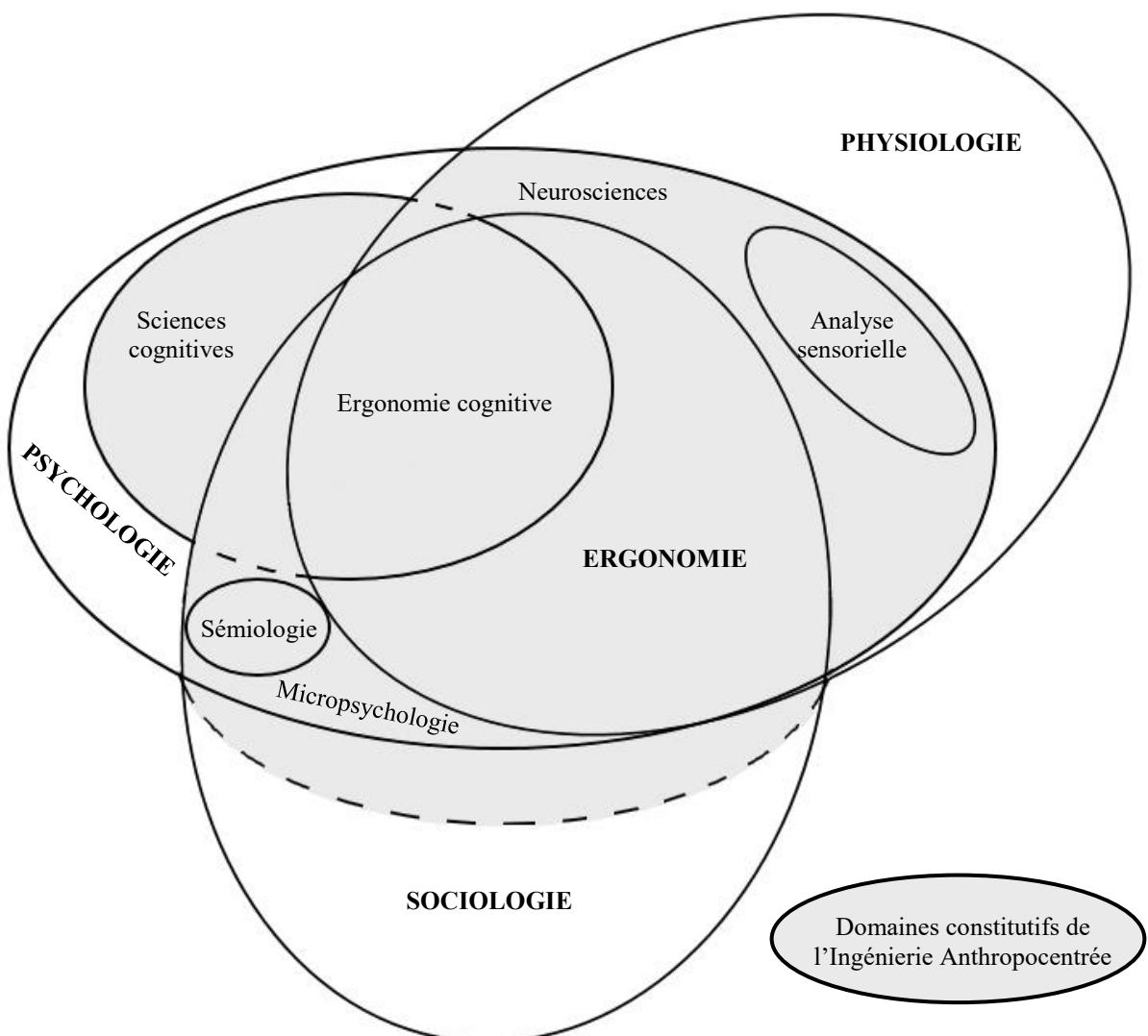


Figure 7 : Disciplines mises au service de l'Ingénierie Anthropocentrale, repris de [ING,97]

La perception du confort, comme il sera vu plus en détail dans le troisième chapitre, dépend d'éléments subjectifs et complexes liés à la culture, au contexte d'usage, ou encore aux caractéristiques psychophysiologiques de l'utilisateur de l'objet ou du service, impliquant de ce fait la mise en œuvre d'approches pluridisciplinaires. L'Ingénierie Anthropocentré va donc intégrer les connaissances de domaines scientifiques différents qui viendront compléter celles de l'ergonomie. Elle inclue diverses disciplines à la croisée entre psychologie, sociologie et physiologie, comme illustrées en Figure 7 : les sciences cognitives, les neurosciences, l'analyse sensorielle, la micropsychologie et la sémiologie.

Ces différents domaines sont relativement récents car nés dans la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle. Ils ont pour objectif commun de chercher à comprendre comment l'humain perçoit son environnement, et comment il est possible de mesurer ses perceptions. Brièvement, les sciences cognitives s'attachent à décrire, expliquer et représenter les mécanismes de la pensée, ou plus généralement du traitement de l'information par tout système complexe (qu'il soit humain, animal ou artificiel). Elles reposent sur l'étude et la modélisation de phénomènes comme la perception, la mémoire, l'attention, les émotions ou encore le raisonnement. Dans le cas des humains, la simulation de ces activités cognitives débouche sur des aspects très appliqués, notamment en ergonomie cognitive avec l'étude des interfaces homme/machine, par exemple. Une des sous-disciplines des sciences cognitives, les neurosciences, va plutôt concerner l'étude du système nerveux en général. L'analyse sensorielle en est une application directe. La norme ISO 5492:2008 en donne la définition suivante : « science relative à l'examen des propriétés organoleptiques d'un produit par l'organe des sens » [ISO,08]. Elle sera présentée plus en détail par la suite. Ensuite, la micropsychologie intervient pour comprendre précisément comment l'utilisateur va interagir avec le produit dans la vie quotidienne. Elle se définit sommairement comme l'étude scientifique des contacts de l'individu avec les technologies ordinaires de son environnement. Son principe sera détaillé dans le troisième chapitre, dans la partie 6.2.2) Confort du corps social : l'approche « 5 A ». Enfin, la sémiologie est, selon la définition donnée par Ferdinand de Saussure, « une science qui étudie la vie des signes au sein de la vie sociale » ([SAU,95], p.33). Il s'agit donc d'une science sociale qui étudie les signes de manière générale, en quoi ils consistent et comment ils sont structurés. Elle se distingue de la sémiotique qui étudie le processus de signification, c'est-à-dire la production, la codification et la communication de signes. Elle est née des travaux de Charles Sanders Pierce (1839-1914) et indique que chaque signe est une triade : un representamen (signe matériel) dénote un objet (objet de pensée) grâce à un interprétant (représentation mentale de la relation entre le

représentamen et l'objet) [EVE,11]. En d'autres termes, elle distingue le signe, sa signification et l'effet de contexte associé. Ces disciplines fournissent les outils nécessaires aux designers pour maîtriser la signification des symboles et informations rattachés aux produits. L'exemple le plus marquant est l'étude de la symbolique des couleurs, dont la maîtrise est essentielle dans le domaine du marketing. De façon très simplifiée, la sémiologie indique par exemple que la couleur rouge peut signifier la colère et la violence pour un certain groupe social, tandis que la sémiotique indique que la couleur rouge associée à un camion de pompier prend une autre signification que celle universelle donnée par la sémiologie.

Toutes ces disciplines vont permettre à l'ingénieur « classique », ayant une vision très technique, d'aborder la question de la perception des futurs usagers du produit en élargissant son champ de connaissances vers une vision plus centrée sur l'humain et ses pratiques. En ce qui concerne la question de l'amélioration du confort, il est en effet rapporté qu'il existe une différence de vision entre la personne qui le « produit » (appelée l'ingénieur) et celle qui le perçoit (appelée l'usager) [MAM,13]. Comme l'explique Delépaut, « l'usager consomme et subit le confort », il lui porte un « regard global », tandis que « l'ingénieur s'attache à produire le confort et à améliorer physiquement certaines de ses composantes », lui portant donc un « regard davantage analytique » ([DEL,07], p. 31). Cette différence de point de vue peut mener à des ratés s'il n'y a pas un effort de mise en situation suffisamment tôt dans le projet de conception. Cela résulte en ce qui est appelé un « bug perceptif » [BA1,09]. Cette fracture entre la qualité intrinsèque du produit (ses qualités techniques) et la qualité perçue par son utilisateur peut mener à une situation de blocage qui rendra vain tous les efforts réalisés en conception. Ces « bugs » peuvent adopter différentes formes, recensés par Simon *et al.* [SIM,07]. Ils peuvent correspondre à un mauvais dimensionnement du produit ou encore à une gadgétisation trop importante rendant son utilisation trop compliquée.

### 1.1.2) Différentes visions pour différents acteurs

Cette dissonance dans la représentation du confort s'est retrouvée dans une enquête réalisée par Mzali [MZA,02]. Durant sa thèse en acoustique, l'auteure a cherché à connaître le jugement porté par les passagers des TGV sur le confort acoustique. Sa recherche à bord de ces véhicules avait notamment pour objectif de situer la place du confort acoustique parmi les autres éléments du confort en train. Pour répondre à cette problématique, l'auteure a dans un premier temps interrogé les voyageurs via un questionnement ouvert, lui permettant alors de constituer des catégories de confort en train *a posteriori*, les réponses étant analysées avec l'aide de psycholinguistes. D'un autre côté, avec l'aide d'experts acousticiens de la SNCF, elle a établi

un questionnaire cette fois-ci fermé, comportant une série de composantes du confort du train, en vue de connaître l'évaluation du confort acoustique des voyageurs et de situer cette composante en regard des autres catégories proposées (dynamique, thermique, etc.). Il s'est avéré que la liste des éléments de confort en TGV proposée par les acousticiens, guidés par leurs connaissances et la possibilité de mesures physiques, ne correspondait pas avec celle dégagée de l'analyse des premières questions générales de son enquête ouverte. Le Tableau 2 montre la différence de représentation du confort dans le TGV entre les experts d'une part et les voyageurs d'autre part. Il faut par exemple remarquer dans ces listes que le confort olfactif proposé dans la liste des acousticiens a été très peu cité par les voyageurs. À l'inverse, il est possible de noter l'apparition de catégories mentionnées par les passagers mais n'apparaissant pas chez les ingénieurs, comme par exemple la place pour mettre les bagages ou les fonctionnalités du mobilier. Cela montre également que les voyageurs ne sont pas forcément interrogés sur des catégories qui leur sont importantes, et même si c'était le cas, ces éléments peuvent ne pas avoir le même sens pour eux que pour l'expert. Dubois, psycholinguiste, distingue à travers ces deux listes l'absence de superposition de deux espaces de connaissances : l'un est issu des savoirs des sciences de phénomènes physiques (côté ingénieur) et l'autre est structuré selon les catégories cognitives des voyageurs [DUB,02].

Catégorisation du confort par les « ingénieurs »	Catégorisation du confort par les « usagers »
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Confort olfactif (odeur)</li> <li>• Confort acoustique (bruit)</li> <li>• Confort lumineux (lumière)</li> <li>• Confort thermique (température)</li> <li>• Confort dynamique (secousses, vibrations)</li> <li>• Aménagement (couleur de la moquette, des sièges...)</li> <li>• Confort tympanique (mal aux oreilles dans les tunnels)</li> <li>• Confort physique (sièges, espace pour les jambes...)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Décoration intérieure</li> <li>• Fonctionnalité du mobilier (tablette, support à verre, patère, repose-pied)</li> <li>• Place pour mettre les bagages</li> <li>• Propreté</li> <li>• Qualité du fauteuil</li> <li>• Stabilité du train</li> <li>• Température ambiante</li> <li>• Vue panoramique</li> <li>• Calme</li> <li>• Espace pour allonger les jambes</li> <li>• Décoration intérieur</li> </ul>

Tableau 2 : Différence de vision du confort dans un TGV entre l'ingénieur et l'usager, repris de [MAM,13]

Il faut maintenant ajouter un troisième et dernier acteur, l'exploitant du réseau. Il s'agit du client du constructeur ferroviaire : l'enjeu du confort est pour lui principalement économique. Comme l'énonçait Le Goff, l'amélioration du confort représente pour lui trois objectifs : l'amélioration de l'image de marque de sa société (matériel neuf et confortable), l'amélioration du « confort d'exploitation » (maintenance et entretien du véhicule) et l'amélioration du confort d'utilisation du véhicule (satisfaction des passagers et du conducteur s'il y en a un) [GOF,94]. Ainsi, sa vision doit présenter un compromis entre celles des

ingénieurs et des usagers. Il doit traduire les attentes et besoins des uns dans le langage des autres, dans le but à la fois d'acquérir un matériel efficace et rentable de la part des constructeurs, et à la fois de satisfaire ses propres clients qui sont les voyageurs. La Figure 8 schématise ces différentes dimensions de la vision du confort. L'exploitant a clairement un rôle d'intermédiaire entre le « langage ingénieur » et le « langage voyageur ». L'interaction de premier niveau entre l'exploitant et les voyageurs s'effectue à travers des enquêtes et des études de tendances pour identifier leurs attentes et leurs besoins. Ensuite, des études économiques et de marché permettent de prioriser ces besoins (vision de l'exploitant) qui sont ensuite traduits en cahier des charges. Enfin, l'interaction de deuxième niveau entre l'exploitant et l'ingénieur se fait au moyen de ces cahiers des charges [MZA,02].

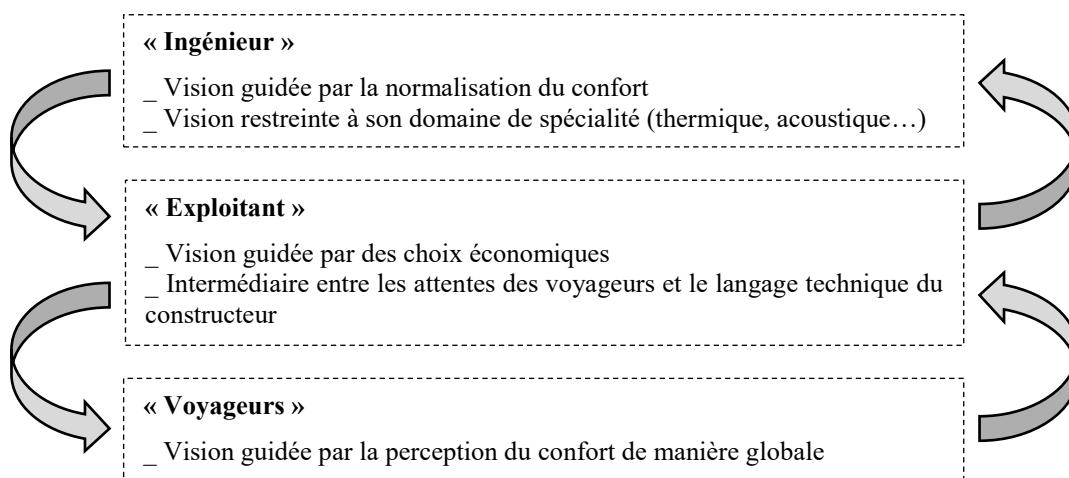


Figure 8 : Différentes dimensions de la vision du confort pour le service de transport, repris de [MAM,13]

Il est alors aisé de constater qu'il existe une réelle complexité dans le développement d'un projet de service de transport. Cela vaut la peine de développer plus en détail les différentes étapes de conception d'un matériel roulant dans le cas d'un transport public urbain afin d'en énumérer les différents intervenants et leurs rôles, puis de voir à quel niveau va pouvoir s'insérer cette approche anthropocentrale.

### 1.1.3) Acteurs impliqués dans la conception d'un transport public urbain : exemple du tramway de Tours

Concrètement, comment est conçu un matériel roulant en milieu urbain ? Un entretien mené le 14 novembre 2016 avec Annie Dorange, directrice projets au sein de l'agence de design RCP, ainsi qu'une revue historique ont permis de lister les différents intervenants lors du développement du tramway de Tours, mis en service le 31 août 2013. La mise en place même d'un service de transport urbain peut adopter plusieurs formes et se faire de plusieurs façons, suivant que l'infrastructure existe déjà ou qu'il s'agisse de créer une toute nouvelle ligne. Par

la suite, il s'agira d'expliciter le développement d'un transport public urbain dans les grandes lignes, à travers l'exemple du développement du tramway de Tours.

Avant de commencer, il faut savoir qu'un projet de transport public est un marché public à maîtrise d'œuvre. Il fait intervenir trois grands acteurs, définis légalement dans la loi n°85-704 du 12 juillet 1985 [LEG,a]. Le maître d'ouvrage (MOA), premièrement, est le responsable principal et est le destinataire de l'ouvrage, qui remplit par nature une fonction d'intérêt général. Il définit le programme, qui contient les objectifs de l'opération, les besoins à satisfaire et les contraintes de différents ordres relatives à la construction de l'ouvrage. L'assistant au maître d'ouvrage (AMO), deuxièmement, aide et conseille le MOA dans la définition, la réalisation ou l'exploitation du projet, ou encore pour la passation du contrat. Il n'a pas de pouvoir décisionnel, ne détenant qu'un rôle consultatif. Le maître d'œuvre (MOE), finalement, doit accomplir les missions que lui a confiées le MOA ou l'AMO et apporter une réponse architecturale, technique et/ou économique au programme. Pour éviter la confusion entre MOA et MOE, leur différence peut se résumer par la formule : « la mise en œuvre (le processus) fournit l'ouvrage (l'objet final) ».

Dans un premier temps, l'article L.5216-5 du Code général des collectivités territoriales impose aux communautés d'agglomération l'exercice de certaines compétences, dont celui du transport urbain (aménagement de l'espace communautaire) [LEG,b]. À cet effet, elles doivent organiser la mobilité au sein de leur territoire, c'est-à-dire organiser les services réguliers de transports publics urbains de personnes (voir titre III du livre II du Code des transports [LEG,c]). Elles sont donc de fait des autorités organisatrices de la mobilité (AOM). Lorsque le périmètre de transport urbain (PTU) est plus large que le simple territoire communal, elles doivent alors déléguer cette compétence de transport urbain à une nouvelle entité, appelée syndicat intercommunal à vocation unique (SIVU). C'est le cas pour la ville de Tours : le PTU est plus large que la seule communauté d'agglomération de Tours, il traverse les villes de Tours et Joué-lès-Tours, du nord au sud. Il a donc fallu maintenir un syndicat intercommunal de transport en commun (SITC) afin d'exploiter de manière efficace le nouveau service de transport, syndicat qui se trouvait être au moment du développement le Syndicat Intercommunal des Transports en Commun de l'Agglomération Tourangelle (SITCAT), AOM ainsi déléguée. Ces organisations vont donc être les MOA du projet de transport urbain : ils vont le définir et le financer. Ils correspondent globalement à « l'exploitant » présenté plus haut. En réalité, l'exploitant peut être une société à qui est déléguée l'exploitation du réseau par l'AOM. À Tours, le réseau de transport public porte comme nom commercial « Fil bleu » et est géré par

Tours Métropole Val de Loire (anciennement Tour(s) plus, anciennement SITCAT), qui a délégué l'exploitation du réseau de transport en commun à Keolis Tours.

Des études de faisabilité sont dans un premier temps effectuées en amont à la demande des élus, afin d'identifier les problématiques liées à l'insertion du transport dans le réseau de la ville ou encore d'obtenir une déclaration d'utilité publique leur permettant de réaliser les opérations d'aménagements adéquates. Ces différentes études et enquêtes sont réalisées par plusieurs bureaux d'étude mandatés par les maîtres d'ouvrage. Elles correspondent d'une façon simplifiée à l'interaction « de premier niveau » indiquée précédemment, l'échange entre l'exploitant et les futurs usagers. Suivant les résultats de ces études, un choix politique sera effectué pour le type de transport à mettre en place. À Tours, l'idée d'un transport en commun en site propre (TCSP) a été émise au début des années 1990 par le maire de l'époque, Jean Royer, pour soulager le réseau de bus déjà présent. Il lance alors les études d'un TCSP, qui vont aboutir à l'installation d'une première ligne de bus à haut niveau de service (BHNS) au début des années 2000, en prévention de l'installation d'un éventuel tramway. Ce dernier sera désiré et anticipé dans les différentes décisions politiques prises par son successeur, le maire Jean Germain. Le SITCAT va décider la mise en place du tramway en 2007, suite à un plan de déplacements urbains (PDU) adopté par la communauté d'agglomération en 2003. Le conseil du SITCAT approuve le projet le 4 février 2010 et la mise en enquête a lieu du 15 juin 2010 au 30 juillet 2010. Le projet a ensuite été déclaré d'utilité publique par arrêté préfectoral du 21 décembre 2010.

Une fois le projet choisi, le maître d'ouvrage peut choisir de faire appel à un assistant à maîtrise d'ouvrage pour l'aider dans la coordination du projet, de son pilotage, de la rédaction des cahiers des charges, du suivi des études et des procédures administratives, des acquisitions foncières, du planning du chantier, de la communication opérationnelle du chantier et du respect du budget. À Tours, le SITCAT a désigné CitéTram comme assistant à maîtrise d'ouvrage en 2008. CitéTram est groupement composé de la Société d'Équipement de la Touraine (SET) et de l'entreprise Transamo (filiale de l'opérateur Transdev). Il travaille en partenariat avec de très nombreuses entreprises de divers métiers et de divers domaines, les MOE.

Les MOE comprennent tous les bureaux d'étude chargés de réaliser les cahiers des charges en collaboration avec l'AMO avant d'effectuer les appels d'offres. Ils vont correspondre à des architectes, des urbanistes des paysagistes, des ingénieurs « transport », des experts design, etc. Pour le tramway de Tours, la désignation de la maîtrise d'œuvre a été faite en juin 2009. Le principal MOE du projet est un groupement d'entreprises mené par Systra, comprenant également Safege et ECCTA pour l'infrastructure, Xelis pour les équipements et

les systèmes, ainsi que les cabinets d'architecture et d'aménagements urbains Richez Associés et Ivars & Ballet. D'autres MOE sont chargés de volets plus spécifiques : RCP Design Global pour la définition de l'identité de la ligne et du design du matériel roulant, Ingérop et States pour le pont sur le Cher, le groupement L'Heudé et L'Heudé-iosis Centre-Ouest pour le centre de maintenance, et Boille et Associés, Vouquette, L'Atelier du paysage et AstecQuant pour l'aménagement de la place de la Tranchée [VRT,10].

Enfin, une fois les cahiers des charges rédigés et les appels d'offres envoyés, différentes entreprises vont y répondre afin de « construire » les ouvrages demandés. C'est ici que va notamment se trouver le constructeur ferroviaire. Celui-ci, après avoir répondu à l'appel d'offres, va faire appel à son tour à des sous-traitants (les équipementiers) et dialoguer avec l'AMO tout le long de la conception. Pour le cas du tramway de Tours, le constructeur ferroviaire qui a été choisi est Alstom. Son rôle a été dans les grandes lignes de produire la caisse du matériel roulant, puis d'assembler par la suite toutes les parties produites par les différents sous-traitants, tout en veillant à la cohérence de tous les équipements. La ligne tourangelle utilise également plusieurs ouvrages d'art sur son tracé, mêlant service public et art, grâce à la collaboration de l'artiste Daniel Buren. De plus, une attention toute particulière est donnée à l'ambiance de la ligne, dessinée avec l'aide de Patrick Rimoux, designer lumière, Louis Dandrel, designer sonore, et Roger Tallon, considéré comme le père du design industriel français. Au niveau des dates d'exécution, le début des travaux de tramway a commencé en mars 2012, pour une mise en service fin août 2013 [DÉS,13].

Cette présentation volontairement explicite du projet du tramway de Tours montre la multitude des acteurs impliqués pour un développement s'étalant sur plusieurs années. Pourtant, les voyageurs ne sont pas directement impliqués dans celui-ci, si ce n'est par l'intermédiaire des maîtres d'ouvrage, et plus particulièrement par les designers en charge du design du matériel roulant. C'est ici où il fallait en venir : le designer tient le rôle d'avocat pour les utilisateurs. C'est lui qui a la charge de comprendre leurs attentes et de les traduire dans le cahier des charges. Concernant le tramway de Tours, l'équipe de designers a adopté une « manière de concevoir totalement orientée sur le confort de l'utilisateur », grâce à une démarche centrée sur les perceptions des voyageurs s'insérant dans la logique de l'ingénierie anthropocentré ([DÉS,13], p. 152). Cette approche « sensorielle » a un nom : le « design sensoriel ».

## 1.2) Présentation du design sensoriel

La naissance du design sensoriel est fortement liée à la volonté de maîtrise d'une offre produits diversifiée. Ce terme est un néologisme qui apparaît en France pour la première fois en 1997 dans un article d'Usine Nouvelle [REM,97]. Il s'insère en tant que nouvelle voie du design industriel, en faisant évoluer un « design qui donne à voir » vers un « design qui donne à percevoir » [BA1,09]. En effet, alors que le design était à ses premières heures dédié plutôt à une certaine esthétique du produit et porté majoritairement sur du « visuel », l'augmentation de la complexité des produits et des exigences des clients amène à prendre en compte de plus en plus les autres modalités sensorielles dans la conception. Renault, une des entreprises pionnières de cette réflexion, propose en 1994 une nouvelle définition du rôle du designer qui va annoncer le design sensoriel : « [...] dans l'habitacle, les contraintes rivalisent en complexité : habitabilité *versus* aérodynamique, ergonomie, confort, sécurité, commandes, moyens de contrôle, polysensorialité, etc. [...] de formation artistique et technique, le designer a dans une entreprise comme Renault, la responsabilité de tout ce que perçoit le client » [MON,94]. Ce nouveau rôle attribué au designer va marquer une rupture du monopole de la modalité sensorielle visuelle, présente tout au long du processus de conception du produit, ouvrant sur une « polysensorialité » maîtrisable par le design (multi)sensoriel.

### 1.2.1) Définition et principes

Régine Charvet-Pello en donne une définition claire : « Le design sensoriel, c'est mettre au service de la conception « produit » des outils permettant d'améliorer la perception de bien-être et de confort. C'est objectiver ce qui est subjectif » ([DÉS,13], p. 152). Le but de la démarche est donc de placer le subjectif comme objet d'étude pour la conception de produits.

En effet, comme il a été vu précédemment et comme il sera vu plus en détail dans les prochains chapitres, le confort (et la notion de perception en général) est essentiellement subjectif, propre à l'individu qui le ressent. Or, ce qui est subjectif ne peut pas être directement intégré dans un cahier des charges : par exemple, comment qualifier le toucher d'une surface de façon à pouvoir reproduire exactement les mêmes propriétés tactiles recherchées pour toute une série de produits ? Cela demande un effort « d'objectivation » qui va être au cœur du design sensoriel. Pour être un peu plus précis sur la question de la distinction entre « objectif » et « subjectif », est considéré comme objectif toute réalité indépendante de tout jugement et comme subjectif tout ce qui relève d'un jugement. Ainsi, une salle peut présenter objectivement une température de 20°C, mais elle pourrait être perçue subjectivement comme froide ou chaude.

Le design sensoriel va s'aider des outils méthodologiques de l'évaluation sensorielle et plus largement de l'ingénierie sensorielle orientée conception. Ces outils permettent de caractériser les propriétés organoleptiques à maîtriser d'un objet, dans un cadre de référence déterminé. Ils peuvent aller des spécifications de ses performances qualitatives (renseignées et situées) en vue de leur intégration dans un cahier des charges fonctionnel « augmenté » (cf. norme NF EN 16271 [AFN,13]) jusqu'aux qualités de conformité du produit, indispensables au cadrage, par mesurage des variations d'une production industrielle (sérieuse) d'un objet/référence [BA1,09]. Le design sensoriel participe donc à de nombreuses étapes lors de la conception d'un objet. Dans les phases amont d'étude, plusieurs outils méthodologiques permettent d'amorcer un processus de précréation/conception. En effet, le décodage de certaines logiques d'évolution et de certaines pratiques sert de cadre de référence à la future perception de l'objet et de la conception. La notion de « référent » est fondamentale dans une approche sensorielle : comme le note Bassereau, « percevoir, c'est comparer » [BAS,95]. Ensuite, dans ses phases de développement, le design sensoriel joue le rôle d'avocat de l'utilisateur en validant, sur ses aspects perceptifs, les choix de conception fonctionnels tels que perçus, les matières et états de surfaces, leurs mises en forme, et les univers avec lesquels ils dialoguent. Enfin, dans sa partie production, l'objet de la conception validé est fabriqué. Le design sensoriel, à l'aide d'outils méthodologiques de la métrologie sensorielle, propose de participer à l'évaluation de la qualité de conformité lors de la production [BA1,09].

Le principe fondamental du design sensoriel peut se résumer par « la première loi du design sensoriel » : « ce qui est perçu en premier doit être conçu en premier » ([BA1,09], p. 3). Effectivement, il s'avère que ce qui est conçu en dernier dans un projet ne dispose plus des mêmes moyens, qu'ils soient économiques, humains ou temporels, et peut même être considéré comme futile. Or, les nouvelles connaissances scientifiques à la base de l'ingénierie anthropocentrique montrent que ce qui est perçu en premier d'un objet construit sa représentation, le jugement qui va en découler. Il est alors essentiel de maîtriser ce processus de construction qu'est le processus perceptif, sous peine de faire face à des « bugs perceptifs » qui rendraient vain tout effort d'innovation ou de fonctionnalités finalement peu perceptibles pour l'utilisateur.

Les démarches du design sensoriel reposent sur la représentativité du processus de perception (sujet/objet/contexte de perception) pour produire des connaissances qui serviront directement dans la conception produit. L'objectif de cette présentation n'est pas de rentrer en détail dans tous les aspects de cette démarche (organisationnels, stratégiques ou encore

économiques), mais plutôt de s'intéresser à l'outil dont elle se sert : l'évaluation sensorielle, et plus particulièrement de la « mesure » des sensations.

### 1.2.2) Évaluation sensorielle : objectiver le subjectif

La norme NF V09-501 définit que l'évaluation sensorielle vise à caractériser les propriétés organoleptiques d'un produit, c'est-à-dire les caractéristiques faisant intervenir les organes des sens de l'être humain : le goût, l'odorat, la vue, le toucher et l'ouïe. Il s'agit d'une science relativement récente qui dérive des travaux de psychophysique, une branche de la psychologie expérimentale qui cherche à déterminer les relations quantitatives qui existent entre un stimulus physique et la perception que le sujet en a. Basée sur la sémantique et la physique, et notamment sur la signification des mots, elle utilise des méthodes qui permettent de décrire et de quantifier de manière systématique l'ensemble des perceptions humaines. En effet, la perception s'exprime à travers le langage, elle ne peut pas être mesurée directement. La clé de l'analyse réside donc dans l'étape de verbalisation des sensations qui permet de traduire la perception des qualités du produit [ING,97].

L'évaluation sensorielle s'est réellement développée avec l'industrie agro-alimentaire dans les années 1960, au début de la société de consommation. Auparavant, il était seulement possible pour les industriels de vérifier la qualité du produit sur le plan physico-chimique, nutritionnel et microbiologique. Ils ont alors cherché à qualifier les performances d'un produit par rapport à un référent dont ils connaissaient les caractéristiques, l'objectif étant de standardiser la qualité « perçue » et d'obtenir une qualité égale tout au long de la production. L'évaluation sensorielle représente aujourd'hui un outil fondamental pour les industriels et ne s'applique plus seulement aux produits alimentaires, mais aussi cosmétiques, pharmaceutiques et à leurs emballages, et gagne depuis une vingtaine d'années tous les secteurs industriels, comme l'automobile ou le ferroviaire.

### 1.2.3) Aspects méthodologiques de l'évaluation sensorielle

Il faut dans un premier temps veiller à distinguer « sensation » et « perception ». Les mécanismes sensoriels et perceptifs seront détaillés dans la deuxième partie de ce chapitre. Pour l'instant, de façon très schématique, la sensation peut se résumer à l'interaction entre un stimulus et un récepteur sensoriel. Elle est codée dans le système nerveux selon deux dimensions, une qualitative (la qualité) et une quantitative (intensité). Ensuite, cette sensation est interprétée en fonction de la mémoire du sujet qui la ressent, de ses expériences, de sa culture, etc. Cette interprétation subjective correspond à la perception et elle donne lieu à un

jugement dit hédonique : « j'aime » ou « je n'aime pas ». La Figure 9 schématise ces différentes dimensions.

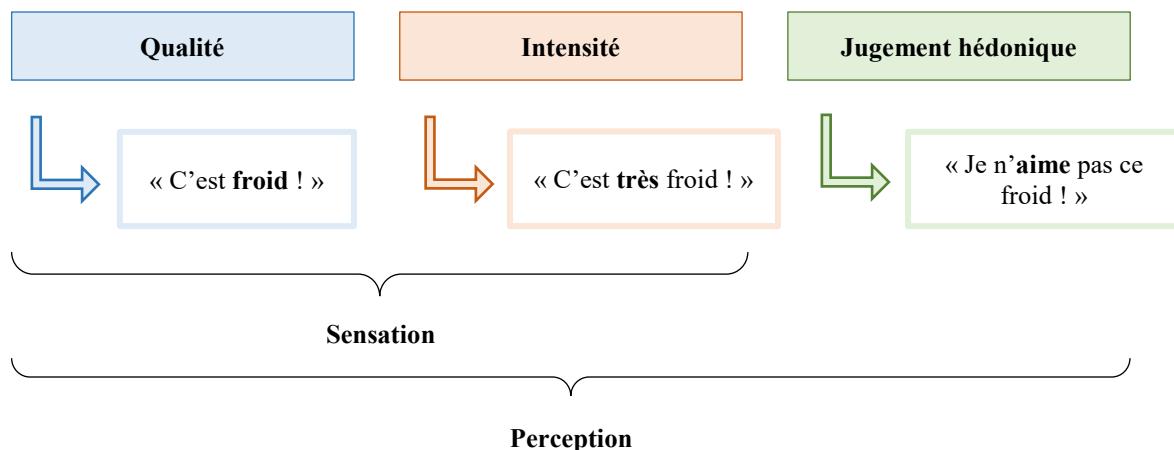


Figure 9 : Dimensions de la sensation

Il existe donc trois domaines à étudier. L'évaluation sensorielle d'un produit permet soit la mesure de ses caractéristiques sensorielles, soit l'évaluation des aspects hédoniques. Les deux approches sont souvent complémentaires, mais doivent être soigneusement distinguées car les groupes de sujets interrogés vont être différents [DEP,09]. Il faudra donc distinguer les essais analytiques (« analyse sensorielle »), portant sur les sensations, et les essais hédoniques (« évaluation hédonique » ou « étude consommateur »).

Il a été vu que la perception sensorielle du sujet ne peut s'exprimer qu'à travers le langage. Les mots vont être les vecteurs des sensations, ils vont être les intermédiaires entre l'observateur et le sujet. Il est donc nécessaire, avant toute évaluation, de définir des « descripteurs » qui puissent faire converger deux réalités : celle de l'utilisateur (qualité perçue) et celle du concepteur (qualité mesurée). Il est primordial de s'assurer que les deux parties parlent de la même chose. Cette étape de sémantique, permettant la génération de descripteurs sensoriels, s'appelle l'étude terminologique [ING,97].

Ensuite, suivant que l'évaluateur s'intéresse au produit lui-même ou à son potentiel d'acceptation ou de rejet, il va s'orienter vers un type particulier d'évaluation (voir Figure 10).

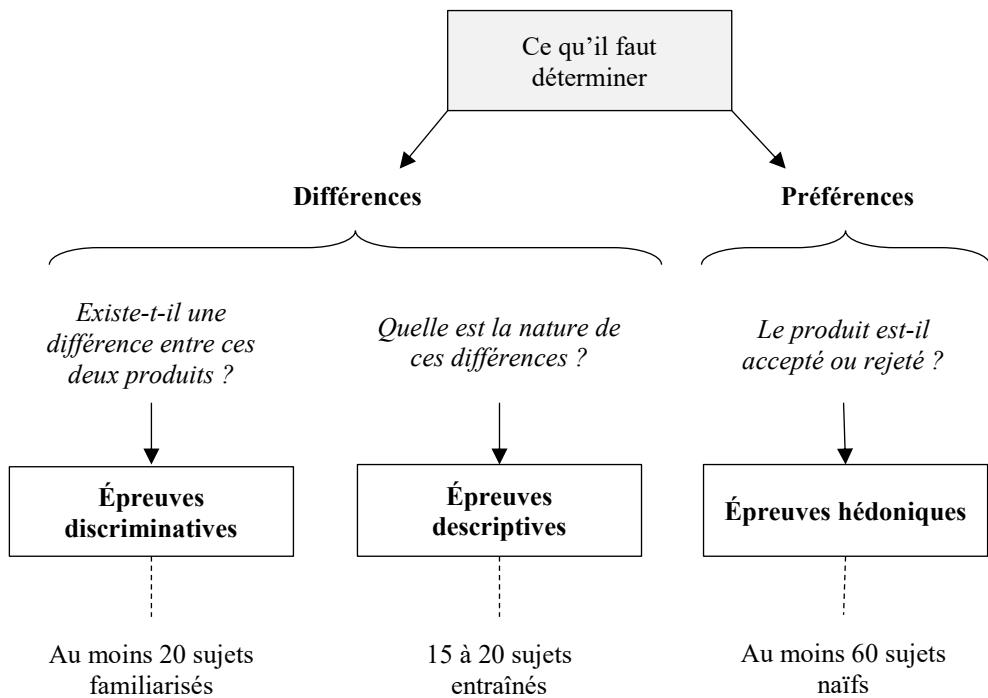


Figure 10 : Vue d'ensemble des différentes épreuves de la métrologie sensorielle en fonction de l'objectif de l'évaluateur [DEP,09]

Les épreuves discriminatives visent à détecter la présence ou l'absence des différences sensorielles entre deux produits. Elles font appel à un panel d'au moins 20 sujets familiarisés (seuil minimum de représentation des variables interindividuelles), c'est-à-dire ayant une bonne connaissance des techniques d'exploration perceptive pour les descripteurs retenus [BA1,09]. Parmi ces épreuves se trouvent par exemple l'essai triangulaire (trois produits anonymes sont présentés au panel, deux sont indiqués comme identiques, chaque testeur doit identifier le produit différent des deux autres), l'essai par paire (deux produits anonymes sont présentés au panel, chaque testeur doit déterminer s'il existe une différence sensorielle entre les deux), ou encore le test duo-trio (un premier produit de référence est présenté au panel pour test, puis est retiré et remplacé par deux produits anonymes dont un est le produit de référence, chaque testeur doit identifier le produit de référence) [ISO,17].

Les épreuves descriptives consistent à mesurer l'intensité de la sensation perçue pour chacun des descripteurs choisis, puis d'établir à l'aide de l'ensemble des descripteurs quantifiés le « profil sensoriel » du produit. Elles font appel à un panel « expert », où chaque panéliste a été entraîné pour fournir une description répétable, reproductible et juste des sensations qu'il perçoit. De fait, l'ensemble des panélistes sensoriels devient en quelque sorte un « instrument de mesure humain » au service du panel leader. Il va être « étalonné » suite à un processus d'apprentissage de l'appareil perceptif humain jalonné d'étapes : se familiariser avec l'espace

produits considéré, augmenter son expérience perceptive, reconstruire ses références, ou encore s'initier aux techniques et types d'épreuves en évaluation sensorielle [BA1,09]. Une fois le panel sensoriel construit, il faut construire l'espace produit, pierre angulaire de toute démarche d'évaluation sensorielle. La construction de ce dernier est fondamentale : il permet de situer le(s) produit(s) testé(s) dans un ensemble d'objets « référents », choisis sur un concept de similarité et d'appartenance, dans l'objectif d'être représentatif de toutes les sensations pouvant naître de l'utilisation de ce type de produit(s). Plus de détails seront présentés dans le deuxième chapitre.

Ces deux catégories d'épreuves fournissent une information dite objective, où les paramètres subjectifs sont maîtrisés. La construction d'un « espace standard » et d'un « observateur standard » (construit à l'aide de l'ensemble des personnes qui composent le panel sensoriel) est nécessaire pour réduire au minimum la subjectivité des réponses. Cette technique passe par la maîtrise de dimensions autres que celles de l'objet de mesure (les propriétés organoleptiques du produit). L'espace standard répond à la volonté d'un environnement contrôlé : il est constitué d'une cabine d'évaluation sensorielle, offrant le moins de distractions possibles, sans odeur particulière, bien éclairée avec des lumières spécifiques, ainsi qu'une température, une hygrométrie et un éclairage contrôlés (description standardisée dans les normes AFNOR et ISO [AFN,12][ISO,07]).

Enfin, les épreuves hédoniques (ou études consommateurs en approche marketing) visent à mesurer le degré de plaisir procuré par un produit en déterminant les proportions de consommateurs préférant un produit à un autre. À la différence des deux types d'épreuves précédents, l'approche hédonique interroge la subjectivité. De fait, afin d'avoir la réponse la plus représentative possible, il faut faire cette fois appel à un grand nombre de sujets dits « naïfs », c'est-à-dire ne répondant à aucun critère particulier [ISO,08]. Les tests hédoniques peuvent prendre diverses formes, comme des questionnaires d'usages et d'attitudes, des tests qualitatifs (tests de concepts, de produits, explorations et évocations sensorielles, etc.) ou encore des tests quantitatifs (baromètres d'appréciation, segmentation des consommateurs, etc.) [AFN,12].

Les différents résultats obtenus auprès de panels qualifiés sont considérés fiables et reproductibles. En effet, pour qu'un panéliste voie sa réponse retenue, il doit avoir été qualifié sur sa fidélité (reproductibilité et répétabilité des réponses), sa sensibilité, sa justesse et son exactitude. Ils sont exploitables à l'aide de méthodes classiques d'analyse de données et sont intégrables au sein du processus de conception. Les applications de l'analyse sensorielle sont multiples : maîtrise de la qualité de conformité perçue, connaissance des préférences

consommateurs/utilisateurs, amélioration de la communication entre les fournisseurs et les clients, réalisation d'une analyse de la concurrence, et plus encore [LEF,03].

### 1.3) Mise en place de la problématique de recherche

L'innovation technologique s'associe aujourd'hui à de nouveaux modes de vie, à une évolution de la demande des clients, en quête « d'expérience », de « bien-être » et de « confort ». La personnalisation des produits et des services, l'optimisation des usages ou de l'ergonomie, conduisent les entreprises à travailler sur de nouvelles pistes d'innovation, garantissant une meilleure différenciation de leurs produits. Cette différenciation passe notamment par le travail des qualités sensorielles des produits.

La recherche entreprise dans cette thèse s'inscrit dans la continuité du travail entrepris par le design du tramway de Tours. Elle s'intéresse plus particulièrement à la perception du matériel roulant par les passagers, à travers l'interaction entre les voyageurs et les appuis proposés au sein de l'habitacle, participant grandement à l'identité du véhicule. En effet, les supports, allant de la simple barre de maintien verticale au siège, constituent l'interface principale entre l'usager et le produit dans le contexte du transport public urbain, mobilisant pleinement le sens du toucher.

À l'heure actuelle, si les techniques de fabrication des produits ont considérablement évolué, les techniques d'appréciation notamment tactiles des surfaces utilisées par les industriels restent inchangées : ces derniers utilisent toujours la main de l'homme pour évaluer les propriétés tactiles des matériaux. L'objectif de ce projet est alors non pas tant de donner une solution toute faite pour le design, mais plutôt de mener une réflexion exploratoire et multidisciplinaire sur la mesure des propriétés organoleptiques et de confort des matériaux utilisés comme appuis dans les transports publics urbains (plutôt type tramway ou métro).

#### 1.3.1) Un environnement hyper-contraint

Il a été vu que l'environnement des transports en commun est soumis à une grande quantité de contraintes et d'exigences. Le Tableau 3 recense par exemple la plupart des normes auxquelles un tramway doit satisfaire aujourd'hui, lesquelles mentionnant ou impliquant les passagers. À travers cette liste semi-exhaustive, il faut remarquer que seules les normes NF EN 14750 (qualité de l'air) et NF F31-116 (détermination du point H du siège, pour *hip-point*, la position théorique relative des hanches de la personne en position assise) mentionnent explicitement le « bien-être » des passagers et le « confort postural » des sièges (en vert clair dans le tableau). Pour le reste, il s'agit de normes définissant des exigences de performance et

de sécurité vis-à-vis des voyageurs. Comme le note Wisner, cette multitude de normes est nécessaire car l'ingénieur ne peut pas être spécialiste de toutes les disciplines auxquelles il a recours [WIS,85]. Cependant, les transports en commun restent un territoire relativement pauvre en matière de recommandations techniques pour le confort des passagers, constat émis il y a déjà une trentaine d'années par Le Goff ([GOF,94], p. 158).

L'absence de directives pour l'aménagement intérieur s'accompagne également d'une relative absence d'études sur l'influence du mobilier intérieur sur le confort passager dans le contexte du transport public urbain, que ce soit en matière de disposition des différents modes d'appui ou des matériaux utilisés. Même si le design des intérieurs commence à être remis en question depuis le début des années 2000, la raison de ce « vide conceptuel » du confort pour les transports en commun reste historique et économique. En retournant en arrière, à l'heure des premiers « transports de masse », au début du XX<sup>ème</sup> siècle, l'objectif de tels véhicules était simplement de transporter un maximum de personnes d'un endroit A à un endroit B. Même si le confort intérieur des premiers véhicules paraît spartiate aujourd'hui, ils étaient très utilisés car nécessaires à la population (il n'y avait tout simplement pas mieux). D'un point de vue économique, ces transports étaient utilisés principalement par ceux qui n'avaient pas les moyens de se déplacer en véhicule personnel. Les premiers intérieurs, à l'image de leurs usagers, ne profitaient donc pas des meilleurs moyens pour leur conception, au contraire de transports destinés à une clientèle plus riche qui présentaient des intérieurs plus spacieux et plus luxueux. En effet, la différence entre les *haves* et *have-nots* (« riches et puissants » et « pauvres et destitués ») n'a jamais été aussi tangible que dans le design des véhicules de transport, par exemple dans les différentes classes proposées à bord d'un avion. Tandis que les riches jouissaient d'intérieurs somptueux, les pauvres devaient survivre à leurs voyages dans des intérieurs conçus pour un maximum de capacité et un minimum d'équipement [VOT,07].

Catégorie	Référence	Titre
Feu	NF F16-101	Matériel roulant ferroviaire - Comportement au feu - Choix des matériaux.
	NF F16-102	Matériel roulant ferroviaire - Comportement au feu - Choix des matériaux, application aux équipements électriques.
	NF F16-103	Matériel roulant ferroviaire - Protection et lutte contre l'incendie - Dispositions constructives
	NF EN 45545 (classée F16-001)	Applications ferroviaires - Protection contre les incendies dans les véhicules ferroviaires
Champ électromagnétique	UIC 564-2	Matériel roulant ferroviaire - Essai de tenue au feu des sièges
	1999/519/CE	Recommandation du Conseil du 12 juillet 1999 relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques
Anthropométrie	NF EN ISO 6385 (classée X35-001)	Principes ergonomiques de la conception des systèmes de travail
	X35-002	Modèles anthropométriques de la population masculine et féminine
	NF EN ISO 7250 (classée X35-003)	Définitions des mesures de base du corps humain pour la conception technologique
Vibrations	NF F31-116	Matériel roulant ferroviaire - Détermination du point H d'un siège
	ISO 2631	Vibrations et chocs mécaniques - Évaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps
Bruit	ISO 1996	Acoustique - Description, évaluation et mesure du bruit de l'environnement
Qualité de l'air	NF EN 14750	Applications ferroviaires - Conditionnement de l'air pour matériel roulant urbain et banlieue
Éclairage	NF EN 13272	Applications ferroviaires - Éclairage électrique pour matériel roulant des systèmes de transport public
Comportement mécanique des sièges	NF F31-119	Matériel roulant ferroviaire - Comportement des sièges aux sollicitations statiques, de fatigue, de vibrations et de chocs
Contraintes matériaux et peintures	NF F19-201	Matériel roulant ferroviaire - Produits de peinture, marques et inscriptions - Prescriptions générales et méthodes d'essais
	NF F31-129	Matériel roulant ferroviaire - Vitres de sécurité trempées
	NF F31-314	Matériel roulant ferroviaire - Vitrages isolants
Nettoyage	NF F31-446	Matériel roulant ferroviaire - Panneaux composites à face(s) décorée(s) ou protégée(s)
	NF F31-111	Matériel roulant ferroviaire - Nettoyage intérieur du matériel à voyageurs - Dispositions constructives
	NF F31-112	Matériel roulant ferroviaire - Protection vis-à-vis des graffiti - Procédures d'essais et méthodes d'évaluation du comportement des matériaux et des produits d'élimination
Anti-vandalisme	NF F31-118	Matériel roulant ferroviaire - Revêtement anti-vandalisme - Caractéristiques et essais
	NF EN 14752	Applications ferroviaires - Systèmes d'accès latéraux pour matériel roulant
Accessibilité	P91-202	Handicapés physiques - Approche et accès aux moyens de transports collectifs
	UIC 565-3 VE	Indications relatives à l'aménagement des voitures aptes également au transport des handicapés dans leur fauteuil roulant

Tableau 3 : Liste semi-exhaustive des normes mentionnant le passager pour la conception du matériel roulant

Le caractère spécifique de chaque type d'intérieur de transport a souvent été lent à se développer. Les designers, exploitants et constructeurs de nouveaux types de véhicules de transport se sont presque toujours appuyés sur des véhicules déjà existants ou des intérieurs architecturaux. Le développement esthétique de certains intérieurs a suivi les styles d'architecture intérieure, de mobilier ou d'autres mouvements artistiques. Ceci peut se voir à travers le style intérieur de différentes versions de tramways berlinois, présentés en Figure 11.



Figure 11 : Différents styles d'intérieurs dans les tramways de Berlin (crédits photo : (a), (b) et (c) prises personnellement lors d'une visite du dépôt de Berlin-Niederschönhausen, (d) source [vlaky.net](http://vlaky.net))

Les trois premiers intérieurs ont été pris en photo lors d'une visite au dépôt de Berlin-Niederschönhausen. Le premier intérieur correspond au « Triebwagen 2082 » de type « Neu Berolina », produit en 1901 et mis en service entre 1901 et le début des années 1930. Il présente un habitacle de faible capacité (environ 20 places assises par voiture), composé d'un plancher, de deux banquettes face-à-face et de poignées de maintien en bois, puis de barres d'appui en laiton. Il représente la succession des tramways tractés par des chevaux et le début de l'électrification du réseau de chemin de fer du Grand Berlin, commencé en 1896. Il est principalement utilisé à l'époque par la classe moyenne et la bourgeoisie, d'où un intérieur à l'esthétique raffinée et plutôt luxueux. Le second intérieur correspond au « Triebwagen 7000 » de type « TED 52 », produit en 1952 et mis en service de 1953 à 1967. Au début des années 1950, les compagnies de tramway berlinoises essayaient de satisfaire la demande croissante de mobilité due à une guerre contre le stationnement des voitures en ville. Les intérieurs sont plus larges et plus modernes, avec de nombreux sièges individuels en cuir (26 places assises par voiture) et des barres de maintien en acier inoxydable. Le troisième intérieur correspond au « Triebwagen 219482-1 » de type « KT4D », produit en 1985, mis en service en 1986 et encore régulièrement utilisé jusqu'en 1998. La capacité est toujours plus grande, avec 34 sièges individuels en matière plastique, beaucoup plus fins, permettant un espace vide en dessous. Les places debout font leur apparition, avec la promesse de 122 places. Les barres restent en acier inoxydable, mais cette fois peintes. Le dernier intérieur correspond à l'un des tramways actuellement en service aujourd'hui, de type « GT6N » et mis en service à partir de 1994. Il s'agit des premiers tramways à plancher entièrement bas du monde. Leur capacité est d'environ 150 passagers. Ce type d'intérieur est le plus commun aujourd'hui, avec des revêtements de sièges en tissu, des barres de maintien toujours peintes, cette fois-ci de couleur jaune vif. Il est à noter la disparition des espaces sous les sièges. À travers cet exemple de l'évolution des intérieurs pour les tramways berlinois, il faut remarquer que le développement esthétique des intérieurs a également évolué selon les besoins de mobilité croissants et les nouveautés technologiques.

Aujourd'hui, comme il a été montré précédemment, la tendance est à trouver une signature propre au transport public urbain, en tant qu'entité distincte des autres types de transports. Les concepteurs doivent innover tout en respectant les performances imposées en matière de technique et de sécurité pour les véhicules. La différenciation va passer par la prise en compte des perceptions du passager, à travers la création d'une ambiance sensorielle maîtrisée.

### 1.3.2) Recherche de différenciation par le sensoriel

Le projet initié par le constructeur ferroviaire Alstom, intitulé « Approche globale des aspects de différenciation perceptible des produits » (AgDN), est à l'origine de la recherche proposée dans cette thèse. La question générale posée par le constructeur est : « Comment innover et se différencier sur le marché des transports publics urbains, sans s'opposer ni aux attentes des entreprises clientes, ni aux attentes des passagers qu'elles transportent ? » Deux approches peuvent être entreprises pour y répondre : l'une vise à comprendre comment les passagers interagissent avec le véhicule, leurs comportements spatiaux et sociaux lors du déplacement, l'autre s'intéresse à la manière dont les passagers perçoivent le véhicule, leurs interactions avec le mobilier intérieur (les modes d'appuis). La première approche, s'inscrivant dans une démarche ancrée dans les sciences humaines et sociales, a été abordée par Stéphanie H. Gosset dans sa thèse intitulée « Approche spatiale et comportementale de la relation entre les individus et l'intérieur des transports publics urbains » (titre provisoire, soutenue pour 2018). La recherche présentée dans ce manuscrit s'inscrit dans la deuxième approche, orientée matériaux et analyse sensorielle pour les appuis et maintiens dans les transports en commun. Elle va se décliner en deux axes. Dans un premier temps, une étude portera sur l'objectivation des propriétés organoleptiques des matériaux destinés à entrer en contact avec les voyageurs lors d'un déplacement dans un véhicule ferroviaire urbain, type tramway ou métro. Puis, dans un second temps, la notion du confort dans un transport public urbain sera interrogée, car elle reste encore aujourd'hui mal définie dans ce contexte spécifique. Ces deux axes vont alors permettre de construire une base de connaissances sur les propriétés de confort d'un véhicule de transport public urbain, ainsi que de donner des pistes de réflexions aux concepteurs pour qu'ils puissent mieux comprendre cette notion si fondamentale aujourd'hui.

#### 1.3.2.1) Objectivation des propriétés tactiles en toucher tangentiel des appuis

Que perçoit le passager ? Bien évidemment, la question est tellement vaste qu'une seule étude ne peut pas prétendre y répondre. Il faut donc réduire le champ de recherche. Une question déjà plus précise serait : quelle partie du matériel de transport entre en interaction avec le passager lors du déplacement du véhicule ? La réponse semble être : tous les différents systèmes d'appuis qu'il va utiliser pour se maintenir lors du voyage, sol inclus. Ils constituent en effet l'interface physique principale entre le voyageur et le service de transport. D'un point de vue sensoriel, cette interaction s'opère principalement via la modalité sensorielle tactile. Finalement, il est alors acceptable de dire que la maîtrise des aspects perçus du mobilier intérieur passe par la maîtrise des propriétés tactiles des matériaux composant les supports.

Aujourd’hui, les techniques d’appréciation tactiles des surfaces sont principalement utilisées dans le secteur automobile. Quelques constructeurs possèdent des panels sensoriels, sinon ils font appel à des prestataires pour évaluer les propriétés tactiles de leurs matériaux. Seulement, cette évaluation n’est toujours faite qu’à travers un panel sensoriel [GIB,00]. Lorsqu’il s’agit de valider la qualité de conformité d’un produit sériel, cela peut poser quelques problèmes. En effet, faire appel à un groupe de sujets entraînés peut poser des contraintes économiques et de temps, si la cadence de production est trop importante pour valider les aspects perçus de chaque produit fini. Pour pallier cette limite, la solution est de faire appel à une méthode de validation instrumentale, adaptant les spécifications sensorielles obtenues de prime abord par une évaluation sensorielle.

La métrologie sensorielle s’accompagne souvent d’instruments de mesure pour renforcer les résultats et obtenir des données qui ne sont pas toujours verbalisables par les panélistes. C’est le cas par exemple pour la modalité visuelle et l’utilisation de l’oculométrie (système d’*eye-tracking*) qui vient compléter les questionnaires marketing par des données sur les mouvements oculaires, les points d’accroche sur une image, etc. Cependant, il s’avère que des données mesurées par le système, comme le parcours visuel du sujet, ne peuvent pas être interprétées sans post verbalisation. Des résultats peuvent alors mener à plus d’interrogations que de réponses si l’approche instrumentale est séparée d’une approche sensorielle. Il faut donc parfois mener une approche croisée, réussir à lier et faire interagir entre elles ces deux approches, sans chercher à les opposer, afin d’obtenir un maximum d’informations. De nombreuses autres expériences ont été réalisées dans le but de corrélérer des mesures instrumentales et sensorielles, certaines ayant abouties, d’autres étant mitigées. Pour le cas de la modalité tactile, il s’agit plutôt du deuxième résultat, surtout pour ce qui concerne la mesure des sensations en toucher tangentiel. En effet, la caractérisation conventionnelle des états de surface ne suffit pas à expliquer la perception. L’exemple de la profilométrie est donné par Crochemore : « les sensations de relief, de râpeux ou de glissant ne sont pas expliquées uniquement par la présence d’un profil plus ou moins accidenté. Les notions de dureté de la matière, de hauteurs de pics, d’écartement entre les motifs, interviennent et influent sur ces perceptions » ([CRO,02], p. 6).

Une discipline du génie mécanique et de la science des matériaux appelée « tribologie » semble toutefois prometteuse. La tribologie est définie comme les sciences et technologies qui étudient les interactions entre deux surfaces en contact. Elle comprend trois domaines : le frottement, l’usure et la lubrification. Dans l’industrie mécanique, les essais tribologiques sont indispensables dans de nombreuses étapes de la production, depuis la mise en forme des

matériaux jusqu'au fonctionnement des composants mécaniques, pour maîtriser le frottement, garantir la durée de vie en optimisant le choix des matériaux et de traitements de surfaces, l'état de surface et la lubrification. Le comportement tribologique n'est pas une propriété intrinsèque des matériaux, mais une réponse d'un système tribologique, qui comprend quatre éléments : les deux pièces en contact (présentant un type de matériau, de forme géométrique, de rugosité...), le troisième corps (lubrifiant, débris d'usure, dépôt, polluant...) et l'environnement (température, humidité...) [YMC,11]. Ici, l'hypothèse est faite qu'il est possible de retranscrire l'interaction peau-produit sous la forme d'un système tribologique dont le contact est de type surfacique (plan/plan) [VAN,13], comme le montre la Figure 12.

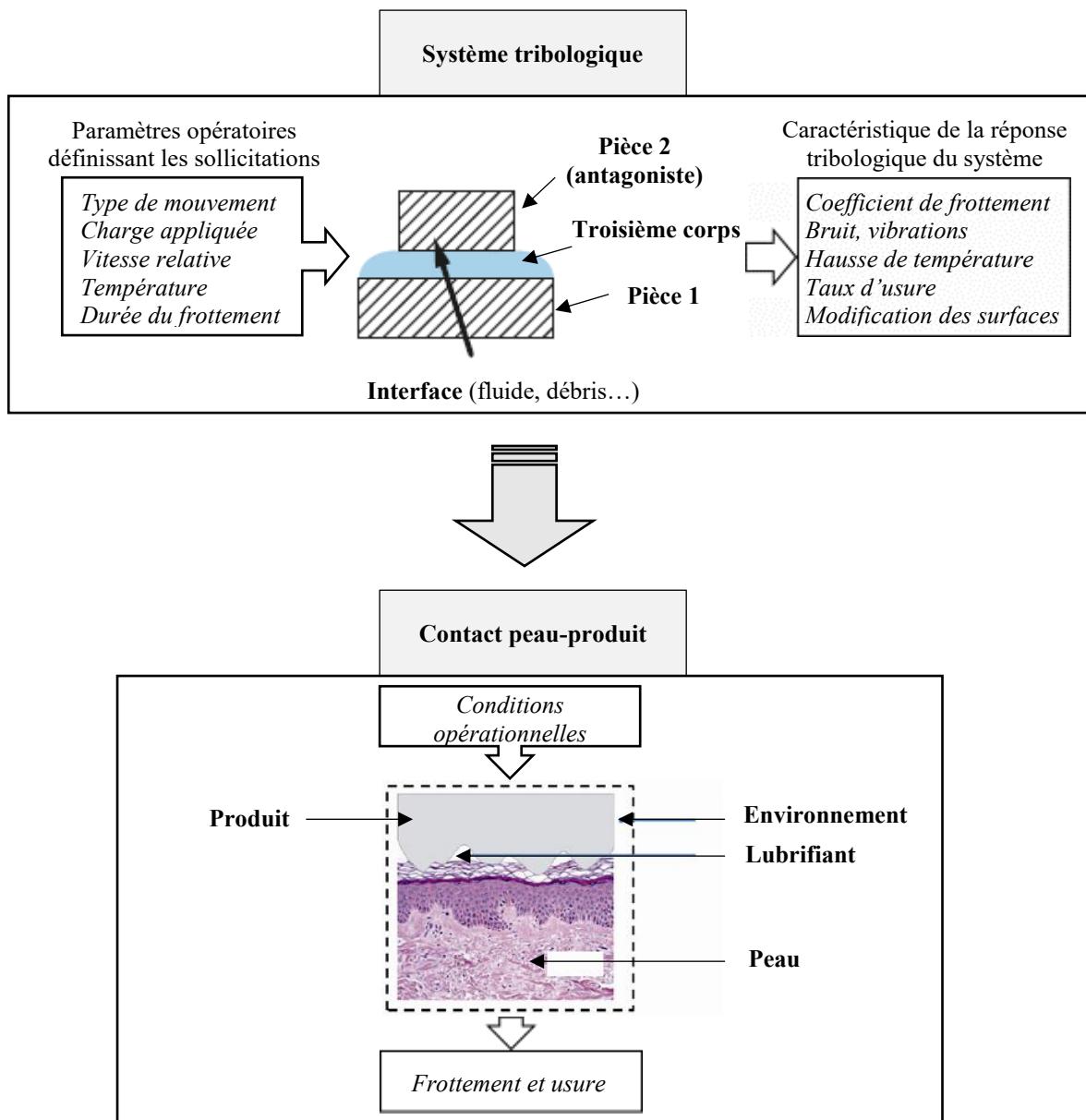


Figure 12 : Le contact peau-produit comme système tribologique, repris de [YMC,11] et [VAN,13]

Le premier axe d'étude aura donc pour objectif d'étudier la faisabilité d'une nouvelle méthode instrumentale permettant de mesurer les propriétés tactiles liées au toucher tangentiel, en mettant en relation les données instrumentales avec les données issues d'une caractérisation sensorielle. L'étude a été effectuée avec la collaboration du Centre technique des industries mécaniques (CETIM) et son équipe de tribologie. Elle fait l'objet du Chapitre 2 : Exploration pour la mesure de la perception tactile : évaluation du toucher tangentiel d'une surface.

### 1.3.2.2) Identification des propriétés de confort

S'il est possible de mesurer dans un certain cadre de référence les sensations, il devient bien plus complexe de les associer à un certain confort d'utilisation du produit. Ici, il n'est plus question de mesurer, mais plutôt de réfléchir à ce que signifie vraiment la notion de confort. Effectivement, le confort est souhaité par tout le monde, mais que représente-t-il ? Lorsqu'il s'agit de prendre en compte les « attentes » des passagers, il est naturel de penser que ce sont des attentes de confort, ils attendent (et sûrement souhaitent) que le véhicule présente une certaine confortabilité qui corresponde au minimum à ce dont ils ont besoin pour la durée du trajet. Cela mérite d'être approfondi.

Le confort est un concept relativement récent et qui occupe de plus en plus de place dans la société moderne [GOF,94][SEZ,94]. Il est synonyme de « bien-être », de « commodité », ou encore d'« aisance ». Comment cela se traduit-il au niveau d'un transport public urbain ? Historiquement, l'ergonomie est la discipline scientifique qui étudie le confort [WIS,85]. Elle se spécialise dans « l'étude scientifique de la relation entre l'homme et ses moyens, méthodes et milieux de travail » et l'application de ces connaissances à la conception de systèmes « qui puissent être utilisés avec le maximum de confort, de sécurité et d'efficacité »<sup>6</sup>. L'ergonome s'intéresse alors aux causes des dysfonctionnements d'un système, pouvant donner lieu à des problèmes de santé ou de sécurité pour leur(s) utilisateur(s). En pratique, au niveau conception, il va donner des recommandations en termes de dimensionnement des systèmes basées sur des analyses étiologiques. Ces recommandations sont à la base de nombreuses normes (revoir partie 1.3.1) Un environnement hyper-contraint) et constituent aujourd'hui quasiment les seules dimensions objectives prises en compte pour le confort. Cela pose quelques problèmes : le confort ne peut pas se résumer à une simple question de posture ou de dimensionnement, il s'agit d'une perception globale impliquant un ensemble complexe de facteurs. C'est d'autant plus vrai dans un transport en commun, où le passager est confronté à un espace pouvant être

---

<sup>6</sup> Définitions de l'ergonomie retenues par la Société d'Ergonomie de Langue Française (SELF) en 1969 et 1970. (cf. ergonomie-self.org)

assez repoussant, pour des raisons indépendantes du transport en lui-même (par ex. une foule importante de voyageurs).

L'histoire du transport en commun, évoqué plus tôt, montre que le confort commence tout juste à s'inviter dans les intérieurs de ces véhicules. Il reste encore beaucoup d'aspects du confort qui ne sont pas maîtrisés, voire même parfois totalement occultés pour des raisons économiques (cf. le choix entre capacité et confort). Ce quasi « désert conceptuel » se retrouve dans la (trop) rare littérature portant sur le confort passager ou sur des recommandations pour le design intérieur des matériels roulants. Le deuxième enjeu de cette étude va alors être de chercher à conceptualiser cette notion de confort pour le contexte spécifique du transport public urbain, dans l'objectif de rassembler les connaissances actuelles mais également d'apporter de nouveaux éléments, à la lumière d'observations menées en situation écologique. L'objectif est alors de donner un cadre d'étude pour répondre à la problématique d'identification des propriétés de confort des matériaux, mais aussi plus largement pour le service de transport dans sa globalité. En effet, la perception du confort est un processus global : l'hypothèse est faite que chaque étape franchie par le passager va pouvoir influencer son expérience de voyage, donc qu'il est nécessaire de maîtriser toute la « chaîne confortable » (terme employé par Le Goff, [GOF,94], p. 194).

Plusieurs modèles de confort ont été successivement élaborés par des ergonomes depuis ces vingt dernières années, dans ce même but, mais pour un autre contexte : le confort en position assise. L'idée lancée par ce second axe de recherche est de prendre du recul sur la métrologie et d'adopter une approche « holistique », globale, afin de représenter le mécanisme de perception du confort dans ce nouveau contexte. Le Chapitre 3 : Vers une nouvelle représentation du confort pour le domaine des transports publics urbains, explore le concept de confort plus en profondeur et propose une nouvelle représentation selon deux niveaux : un niveau local, centré sur l'interaction entre le passager et l'objet appui, puis un niveau global, mettant en perspective les pratiques des passagers lors du voyage.

Avant de rentrer dans le vif du sujet, il convient tout d'abord de bien comprendre comment fonctionne le mécanisme de perception, comment se distinguent sensation et perception, et comment se construit le jugement de la perception, son appréciation, pouvant mener au sentiment de confort tant attendu. La partie suivante va présenter de manière approfondie le système perceptif humain.

## 2) Le système perceptif humain

Quels sont les moyens avec lesquels l'humain peut interagir avec son monde ? Comment acquiert-il les informations lui permettant de prendre des décisions au quotidien ? Afin de maîtriser les aspects perçus des objets, leurs propriétés organoleptiques, il convient en premier lieu de s'interroger sur le couple percevant/perçu.

Cette première partie va tout d'abord introduire les mécanismes psychologiques et physiologiques de la perception. Il est à noter qu'il s'agit d'un domaine toujours discuté, avec des théories multiples et variées [DEL,03]. Le but de l'exercice ne sera pas de trancher entre les différentes théories ni d'en faire la liste, mais plutôt d'évoquer les rouages principaux de la grande machine sensible qu'est l'humain. Les différents types de sensibilités seront développés, avec un point plus approfondi sur le toucher.

### 2.1) Les sens humains

L'humain dispose d'un certain nombre d'outils qui lui permettent de capter certaines informations disséminées un peu partout dans son environnement. Ces outils sont appelés les récepteurs sensoriels. Ils sont très nombreux, quasi omniprésents dans le corps, et permettent un certain nombre de fonctions réceptrices, appelées « sens ». Le grand dictionnaire de la psychologie en donne la définition suivante : « **SENS** (*nom masculin*) : Chacune des fonctions psychophysiologiques par lesquelles un organisme humain ou animal reçoit des informations sur certains éléments du milieu extérieur de nature physique (vue, audition, sensibilité à la pesanteur, toucher) ou chimique (goût, odorat). » [SEN,99]

Aristote affirmait dans son traité *De l'âme* : « Il ne peut y avoir de sens outre les sens communs » [ARI,93] (i.e. la vue, le toucher, l'ouïe, l'odorat et le goût). Ces cinq sens sont les plus connus, car ils sont au final les plus représentés (ou inversement). Quelques exemples tirés de l'art et de la littérature montrent, à travers des symboliques singulières, la fascination qu'exercent les cinq sens, ainsi que leur importance dans le rapport des humains au monde.

#### 2.1.1) Introduction au sensoriel à travers l'art

Dans la peinture, les peintres Jan Brueghel l'Ancien (1568-1625) et Pierre Paul Rubens (1577-1640) ont par exemple collaboré pour produire les « *Allégories des cinq sens* », une série de cinq tableaux mettant en scène les différents sens à travers des personnifications féminines. La Figure 13 illustre un de ces tableaux, « *Allégorie du toucher* », où ce dernier est représenté par des figures guerrières, violentes, faisant écho au combat et à la douleur, puis un autre aspect,

plus doux, à travers une femme embrassant un putto (chérubin). Plus de deux siècles plus tard, le peintre autrichien Hans Makart (1840-1884), surnommé le « peintre des sens » [LAD,11], les a également représentés dans une série de tableaux nommée « *Les Cinq Sens* » (Figure 14). Dans celle-ci, chaque sens est accompagné de son symbole le plus marquant. Pour le toucher, le peintre a représenté ici aussi une femme portant un enfant ; pour l'ouïe, une femme tenant une flûte de pan dans sa main gauche et tendant l'oreille droite ; pour la vue, une femme se regardant dans un miroir ; pour l'odorat, une femme sentant des fleurs ; enfin, pour le goût, une femme cueillant les fruits d'un arbre. Il existe de nombreux symboles pour illustrer les cinq sens, qui sont autant de fenêtres par lesquelles l'humain construit sa vie. Le toucher permet l'accès à l'amour (symbole de la caresse) comme à la haine, la douleur (symbole de la guerre) ; l'ouïe permet l'accès à la musique (symbole de la flûte de pan) ; la vue permet l'accès à la représentation, à l'art (symbole du miroir) ; l'odorat permet l'accès à la nature (symbole des fleurs) ; le goût permet l'accès aux plaisirs de la nourriture (symbole des fruits). Les plaisirs, justement, sont vraisemblablement illustrés à travers les figures érotiques des femmes dénudées. Les sens donnent accès aux plaisirs de la chair, du corps physique, humain.



Figure 13 : *Allégorie du toucher* de Jan Brueghel l'Ancien et Pierre Paul Rubens (1617-18)



Figure 14 : *Les Cinq Sens*, respectivement le toucher, l'ouïe, la vue, l'odorat et le goût de Hans Makart (1872-79)

Dans la littérature, les sens aristotéliciens sont également très présents. Pour rester au XIX<sup>e</sup> siècle, il est possible de citer les fameux poèmes *Sensation* d'Arthur Rimbaud (1854-1891), écrit en 1870, ou *Demain dès l'aube* de Victor Hugo (1802-1885), écrit en 1847, où ces deux poètes s'émeuvent et parlent à travers leurs sens, l'un rêvant d'un amour adolescent, l'autre rendant hommage à sa fille décédée, partageant sa tristesse. Plus récemment, l'écrivain et poète français Francis Ponge (1899-1988) tentait de décrire précisément les « choses » dans son recueil de poèmes en prose *Le parti pris des choses* (1942). Dans le texte *L'huître*, il fait appel aux sens afin de caractériser au mieux ce produit de la mer :

### **L'huître**

L'huître, de la grosseur d'un galet moyen, est d'une apparence plus rugueuse, d'une couleur moins unie, brillamment blanchâtre. C'est un monde opiniâtrement clos. Pourtant on peut l'ouvrir : il faut alors la tenir au creux d'un torchon, se servir d'un couteau ébréché et peu franc, s'y reprendre à plusieurs fois. Les doigts curieux s'y coupent, s'y cassent les ongles : c'est un travail grossier. Les coups qu'on lui porte marquent son enveloppe de ronds blancs, d'une sorte de halos.

A l'intérieur l'on trouve tout un monde, à boire et à manger : sous un firmament (à proprement parler) de nacre, les cieux d'en dessus s'affaissent sur les cieux d'en dessous, pour ne plus former qu'une mare, un sachet visqueux et verdâtre, qui flue et reflue à l'odeur et à la vue, frangé d'une dentelle noirâtre sur les bords.

Parfois très rare une formule perle à leur gosier de nacre, d'où l'on trouve aussitôt à s'orner.

La vue permet de décrire la coquille de l'huître, le toucher se retrouve dans son ouverture, l'ouïe à travers les coups portés et les ratés, puis le goût et l'odorat une fois l'enveloppe ouverte. Il est alors aisément de constater qu'utiliser les sens permet une représentation relativement précise de l'objet, couvrant ses propriétés intrinsèques (ex. son apparence) et extrinsèques (ex. son utilisation). Il s'agit déjà ici d'un début d'évaluation sensorielle !

Pour aller plus loin, il s'avère qu'Aristote n'avait pas tout à fait raison : les informations sensorielles ne se trouvent pas toutes à l'extérieur du corps. Certaines informations indispensables à son bon fonctionnement proviennent de l'intérieur. Les cinq sens vus précédemment font partie d'une catégorie appelée l'extéroception, mais il existe quelques autres familles de sensibilités. Pour en discuter, il faut s'intéresser d'abord au fonctionnement du système sensoriel lui-même.

### 2.1.2) Organisation des systèmes sensoriels chez l'humain

Fondamentalement, l'environnement externe ou interne de l'organisme contient des informations sous forme d'énergie physique. Celles-ci vont venir stimuler des petites structures dans l'organisme, appelées récepteurs sensoriels. Elles vont alors agir comme des transducteurs, transformant ces énergies en potentiels d'action nerveux (ou influx nerveux). Ces impulsions bio-électriques ainsi générées vont alors parcourir le système nerveux, phénomène appelé *sensation*, puis par un mécanisme physiopsychologique complexe, engendrer une reconstruction abstraite de la réalité ainsi sentie, appelée la *perception* [CAL,16].

Les récepteurs sensoriels sont disséminés sous forme de cellules spécialisées à travers l'organisme, ou directement sur des régions neuronales. Ils sont adaptés pour répondre à une forme particulière d'énergie grâce à un seuil d'activation du potentiel d'action beaucoup plus faible que pour les autres formes d'énergie. Ils peuvent être sensibles à quatre types de sollicitation : mécanique (ex. dans l'oreille avec les cellules ciliées sensibles aux vibrations sonores), thermique (ex. dans la peau avec les bulbes de Krause sensibles aux variations de température), électromagnétique (ex. dans l'œil avec la rétine sensible aux ondes électromagnétiques du spectre visible) ou chimique (ex. dans le nez avec les neurones situés dans l'épithélium olfactif sensibles à certaines espèces moléculaires) [DEL,03].

#### 2.1.2.1) Classification des récepteurs sensoriels

Il existe plusieurs manières de classer les récepteurs sensoriels, mais la plus classique est celle du médecin et scientifique britannique Charles Scott Sherrington (1857-1952), qui

distingue les extérocepteurs (donnant des informations sur l'environnement externe) et les intérocepteurs (environnement interne) pour la perception (voir Tableau 4).

	Récepteurs visuels
à distance (télérécepteurs)	Récepteurs auditifs
Extérocepteurs (sensibilité superficielle)	Récepteurs olfactifs
au contact	Récepteurs gustatifs
	Récepteurs cutanés
Intérocepteurs	Viscérocepteurs (sensibilité viscérale)
	Propriocepteurs (sensibilité profonde)

Tableau 4 : Classification des sensibilités selon Sherrington [CAL,16]

Cette classification est cependant incomplète et partielle : en effet, par exemple, il est depuis reconnu que la composante consciente de la proprioception, la représentation que l'humain se fait de son propre corps, provient d'une synthèse d'informations recueillies à la fois par les propriocepteurs, mais également des récepteurs cutanés. Il peut donc y avoir participation de plusieurs types de récepteurs sensoriels pour la perception d'une sensation, ce qui rend leur classification et leur étude plutôt complexe.

#### 2.1.2.2) Organisation du système nerveux

Pour aller plus loin sur la notion de sensibilité, il faut s'intéresser à l'organisation du système nerveux. Sans rentrer dans les détails, celui-ci se divise en deux parties : le système nerveux central (SNC) et le système nerveux périphérique (SNP).

Chez l'humain, le SNC est la portion du système nerveux située dans la boîte crânienne (cerveau et tronc cérébral) et le canal vertébral (moelle épinière), formant ce qui est appelé le névraxe, ou système nerveux cérébro-spinal (voir Figure 15). Sa fonction est dans un premier temps de recevoir et d'analyser les signaux corporels et environnementaux (transmis principalement via le SNP), puis de déclencher dans un second temps des impulsions motrices, assurant ainsi en retour le bon fonctionnement de l'organisme et son adaptation à l'environnement [RIV,17].

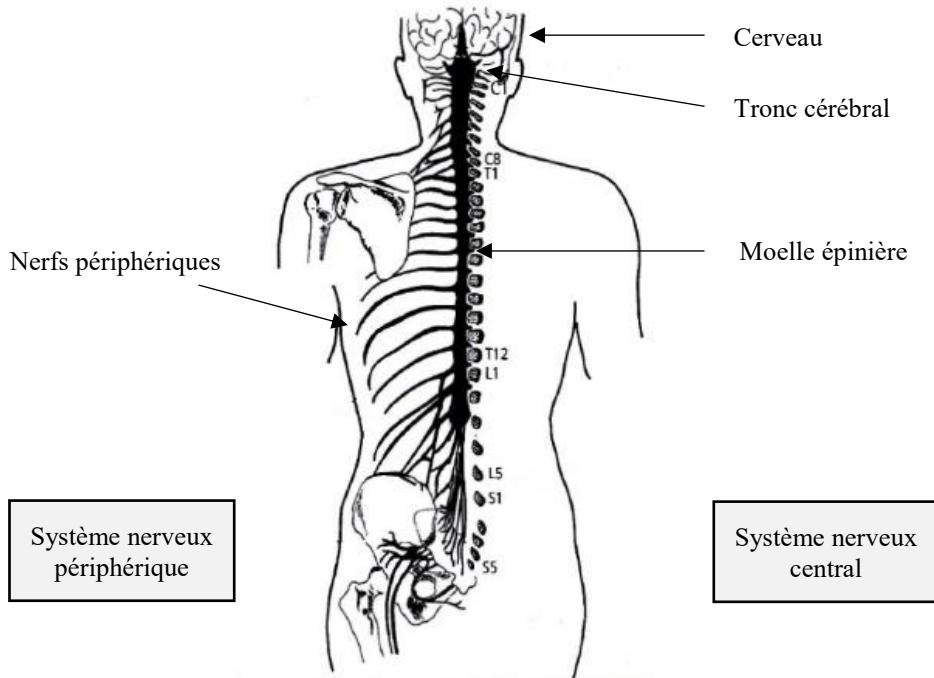


Figure 15 : Organisation générale du névraxe [CAL,16]

Le SNP est quant à lui la portion du système nerveux se trouvant à l'extérieur du névraxe, soit dans le reste du corps. Il relie le SNC au reste de l'organisme. Il se compose de nerfs et de groupes de neurones (ganglions), et peut lui-même se diviser en deux parties, constituées chacune d'afférences (fibres nerveuses « sensorielles » provenant de récepteurs sensoriels et se projetant vers le névraxe), véhiculant des informations sensitives, et d'efférences (fibres nerveuses « motrices » provenant du névraxe et se projetant vers la périphérie), véhiculant des informations motrices. Il existe alors un système sensoriel et un système moteur, dont le fonctionnement général est repris Figure 16.

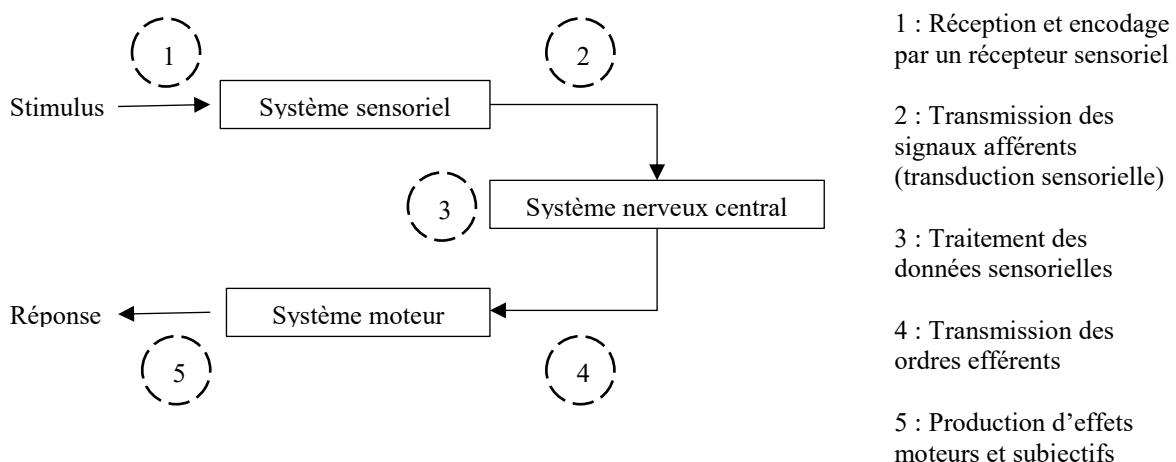


Figure 16 : Fonctionnement général des systèmes neuronaux

La première des deux composantes principales du SNP est le système nerveux somatique, responsable du contrôle volontaire (plutôt conscient) des mouvements du corps. Les afférences proviennent des extérocepteurs, elles constituent essentiellement les fameux cinq sens d'Aristote, la sensibilité superficielle. Les efférences constituent quant à elle l'innervation motrice des muscles somatiques (ou muscles squelettiques).

La deuxième est le système nerveux viscéral (ou autonome, ou végétatif, plutôt inconscient), chargé de la régulation de certains mécanismes physiologiques (ex. muscles intraoculaires ou système reproducteur) et des paramètres biologiques nécessaires au bon fonctionnement de l'organisme, telles la respiration ou la température du corps (maintien de l'homéostasie de l'organisme). Il est composé lui-même de trois parties : le système nerveux sympathique (ou orthosympathique ou adrénérique), dont la fonction est en substance de préparer le corps à l'action en jouant par exemple sur le rythme cardiaque ou la contraction de muscles lisses (cœur, intestins, vessie...) ; le système nerveux parasympathique (ou vagal), dont la fonction est principalement de contrôler les activités involontaires des viscères en s'opposant aux effets du système nerveux sympathique ; et enfin, le système entérique, qui comme son nom l'indique est situé dans le tube digestif et contrôle le système digestif. Les afférences proviennent principalement des viscérocepteurs, les récepteurs sensoriels situés dans les viscères (cœur, poumons, parties génitales, vaisseaux sanguins...) : elles renseignent sur l'état des différents organes de l'organisme. Elles constituent ainsi la sensibilité viscérale, l'intéroception. Les efférences, quant à elles, innervent le cœur, les muscles lisses et certaines glandes. Il est à noter que toutes les sensibilités humaines ne sont pas traitées par un seul de ces systèmes nerveux, car ils peuvent communiquer entre eux. Un exemple est donné avec le mouvement des doigts, activité somatique, qui nécessite également une régulation vasculaire, activité végétative.

Les systèmes sensoriels sont donc toutes ces afférences, provenant des très nombreux récepteurs sensoriels disséminés un peu partout dans l'organisme. Le Tableau 5 répertorie de façon synthétique les différents récepteurs sensoriels en indiquant la nature des stimuli auxquels ils sont sensibles et la sensibilité à laquelle ils sont associés.

	<b>Nature du stimulus</b>	<b>Sensibilité associée</b>	<b>Position dans l'organisme</b>	<b>Rôle dans l'organisme</b>
Barorécepteurs	Variation de la pression artérielle	Viscérale	Crosse aortique, sinus carotidien, atrium droit...	Régulation de la pression artérielle
	Changement dans la composition chimique de l'environnement	Superficielle	Fosse nasale (épithélium olfactif), langue (papilles gustatives)	Olfaction, gustation
Chimiorécepteurs		Viscérale	Crosse aortique (corpuscules carotidiens)	Contrôle de la ventilation, régulation de l'équilibre acido-basique du corps...
Mécanorécepteurs	Déformation mécanique	Profonde	Muscles, tendons, os, articulations (fuseaux neuromusculaires et organes neuro-tendineux) et système vestibulaire (récepteurs labyrinthiques)	Position relative et mouvement des différentes parties du corps (proprioception), suivi du regard, sens de l'équilibre (« équilibrionception »)
		Superficielle	Langue (papilles tactiles), peau (mécanorécepteurs cutanés), membrane basilaire (cellules ciliées)	Sensibilités tactile et auditive
		Viscérale	Atriums (volorécepteurs), Poumons (tensorrécepteurs)...	Régulation de la pression artérielle, contrôle de la ventilation...
Nocicepteurs	Douleur	Superficielle	Peau, cornée, muqueuses...	Alerte le corps face aux stimulations de forte intensité, dangereuses pour son intégrité (nociception)
		Viscérale	Muscles, articulations, viscères...	
Osmorécepteurs	Pression osmotique sanguine <sup>7</sup>	Viscérale	Artères carotides	Équilibre hydrominéral
Photorécepteurs	Ondes électromagnétiques dans le spectre visible	Viscérale	Rétine (cônes, bâtonnets et neurones ganglionnaires contenant de la mélancopsine)	
		Superficielle	Langue, peau (thermorécepteurs périphériques sensibles au chaud ou au froid)	Sensibilité visuelle, rythmicité circadienne
Thermorécepteurs	Variation de la température	Superficielle	Moelle épinière, hypothalamus, paroi des organes intra-abdominaux et des gros troncs veineux	Sensibilité thermique (thermoception)
		Viscérale		Thermorégulation

Tableau 5 : Types de récepteurs sensoriels

<sup>7</sup> La pression osmotique correspond à la pression minimum qu'il faut exercer pour empêcher le passage d'un solvant d'une solution moins concentrée à une solution plus concentrée à travers une membrane semi-perméable (phénomène d'osmose).

Remarque : Au niveau du design de produit, l'intérêt se porte principalement sur la sensibilité superficielle (ou extéroception). Dans une moindre mesure, il est également intéressant de garder en tête l'existence et le fonctionnement du système proprioceptif, notamment quand le système à concevoir propose à son utilisateur une certaine dynamique troublant son équilibre ou sa perception du mouvement. En mars 2016, l'arrivée sur le marché public de l'Oculus Rift, le casque de réalité virtuelle produit par l'entreprise Oculus VR (filiale de Facebook), en est un parfait exemple. Il s'agit d'un masque recouvrant les yeux qui plonge son utilisateur dans un univers virtuel, qui peut être une vidéo simple (pas de déplacement) ou une visite active (déplacement). Il s'avère que ce genre de système peut provoquer une cinétose (le fameux mal des transports), ou *cybersickness*, induisant une sensation de nausée [DAV,15]. Celle-ci est probablement due à une discordance entre les informations que l'utilisateur reçoit par ses yeux (sens visuel, extéroceptif) et par son oreille interne (sens de l'équilibre et du mouvement, proprioceptif). Cet enjeu est particulièrement présent dans le domaine de la simulation numérique où les développeurs devront trouver des solutions pour réduire les nausées des futurs utilisateurs, et surtout comprendre les facteurs entraînant cette nausée [DUC,16][LEC,15]. Dans le domaine des transports, l'étude de la proprioception peut se retrouver dans l'étude dynamique de l'expérience passager, avec la mesure des vibrations ou des accélérations du matériel roulant, produisant un certain inconfort voire un danger pour le passager (pouvant aller jusqu'à la chute) [ROB,06].

#### 2.1.2.3) Principes d'organisation des systèmes sensoriels

Malgré la grande diversité des systèmes sensoriels, ceux-ci présentent des principes de fonctionnement identiques donnant lieu à certaines « lois ». Par exemple, la loi « de projection » établit que quel que soit le mode de stimulation d'une voie sensorielle, la sensation qui en dérive est rapportée à la localisation du récepteur. L'exemple le plus marquant est celui du membre fantôme : une stimulation mécanique du moignon peut provoquer des sensations ou des douleurs dans le membre amputé.

Une autre loi est celle dite de l'énergie spécifique (des nerfs), formulée par le docteur allemand Johannes Peter Müller dans les années 1830, établissant qu'à une stimulation de chaque récepteur correspond généralement une sensation, quels que soient l'énergie, le stimulus, qui l'active. La qualité de la sensation serait réglée par le centre cortical correspondant aux récepteurs (exemple : le cortex auditif, qui se compose d'une aire primaire identifiant les fréquences et d'une aire secondaire restituant les sons, pour l'organe auditif). Il existe pour chaque récepteur son « stimulus adéquat » (la forme d'énergie correspondant spécifiquement à

l'excitabilité directe du système sensoriel donné), mais ils peuvent répondre à d'autres formes d'énergie si celles-ci sont suffisamment importantes. Par exemple, un bruit n'est un bruit que parce qu'il s'agit d'une onde mécanique activant l'organe auditif, mais si le son, l'onde, est suffisamment intense, il peut également activer des mécanorécepteurs sur la peau, induisant une sensation de vibration. Il faut donc faire une différence entre stimulus et sensation : le premier est physique, le deuxième est physiologique. Un autre exemple peut être donné avec la couleur. La couleur n'est pas un stimulus, elle est une sensation provoquée par une caractéristique particulière d'une onde électromagnétique.

Une dernière caractéristique fondamentale des récepteurs sensoriels est la présence d'un phénomène d'adaptation. Pour un stimulus dit échelon (c'est-à-dire maintenu un certain temps à une intensité constante), la fibre sensorielle ne reste pas constante mais décroît en fonction du temps d'application. La vitesse de cette adaptation dépend du type de récepteurs : de ceux à adaptation nulle voire très lente à ceux à adaptation très rapide (voir Figure 17) [CAL,16].

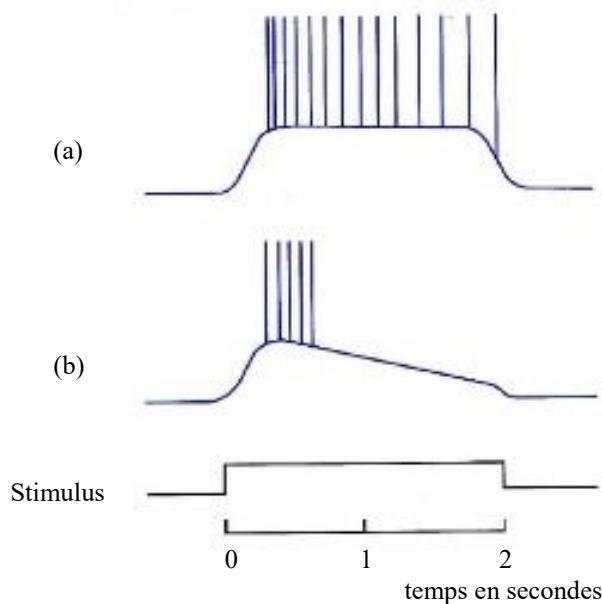
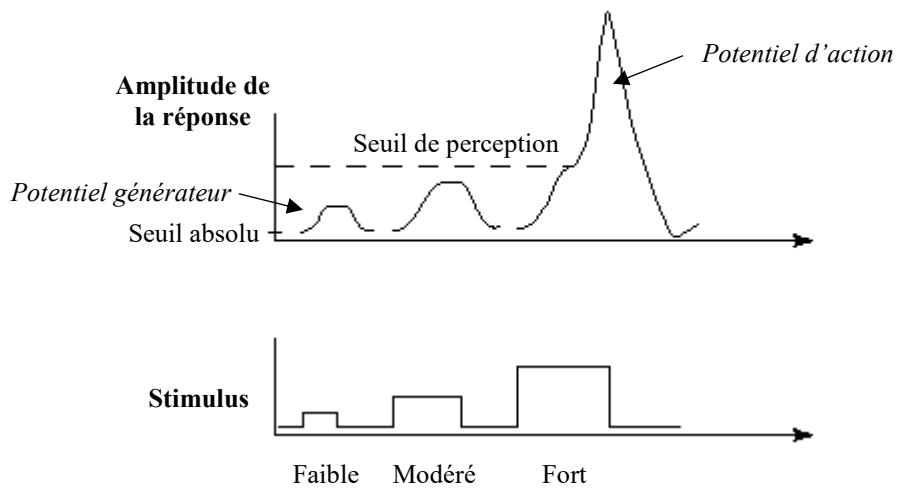


Figure 17 : Décharge de récepteurs à adaptation lente (a) ou rapide (b)

Les récepteurs à adaptation lente ou nulle renseignent les centres corticaux sur la valeur absolue ou efficace de l'intensité du stimulus : ils sont appelés récepteurs toniques ou statiques. Les nocicepteurs ou les récepteurs labyrinthiques font partie de cette catégorie. Les récepteurs à adaptation rapide ne traduisent quant à eux que les variations du stimulus en fonction du temps : ils sont appelés récepteurs phasiques ou dynamiques. Certains mécanorécepteurs présents dans la peau en font partie, comme les corpuscules de Pacini, sensibles aux variations

de pression. Finalement, certains récepteurs sont phasico-toniques, comme les mécanorécepteurs articulaires, qui renseignent sur les mouvements articulaires ainsi que sur la position de l'articulation. Fondamentalement, l'adaptation correspond donc au seuil temporel de réception de l'information. Ce phénomène d'adaptation n'est cependant pas lié à l'adaptation plutôt psychologique au niveau du cerveau qui fait un tri dans les informations sensorielles importantes. Par exemple, au bout d'un certain temps, l'individu n'a plus conscience des vêtements qu'il porte car le cerveau agit comme un filtre, malgré les sensations provoquées par le toucher constant de l'habit sur la peau. Il s'agit alors plutôt d'une attention sélective qui permet à l'individu de se concentrer sur de nouvelles informations de l'environnement.

Pour compléter, il existe plusieurs autres types de seuils associés à la réception d'une information sensorielle, conditionnant la sensation et la perception du stimulus et variant d'un récepteur à l'autre. Le premier est appelé le seuil absolu : il s'agit de la plus petite intensité capable d'engendrer un potentiel génératriceur au niveau des fibres sensorielles. Si un stimulus a une intensité trop faible par rapport au seuil absolu d'activation d'un récepteur, ce dernier ne sera pas affecté. Dans le même esprit, le seuil de perception (ou seuil de détection) correspond à la plus petite intensité du stimulus capable d'engendrer un potentiel d'action d'après le potentiel générateur et de donner une sensation/perception au sujet, lui permettant de dire qu'une stimulation est présente. La Figure 18 illustre ces deux seuils.



Le troisième est le seuil différentiel (ou seuil de discrimination) : il correspond à la plus petite variation d'intensité du même stimulus que le sujet peut percevoir. La Figure 19 indique par exemple les seuils différentiels pour les thermorécepteurs sur l'ensemble du corps humain en fonction de l'âge de l'individu. Enfin, le seuil spatial correspond à la plus petite distance

perceptible entre deux points de stimulations. Un exemple sera donné plus en détail dans la partie sur le toucher avec les seuils de discrimination spatiale de la peau.

Il existe dans un autre cadre le seuil de reconnaissance, institué par la psychophysique, qui se définit comme la valeur à partir de laquelle une stimulation est détectée et reconnue par l'individu. Il est principalement utilisé pour le sens olfactif, par exemple pour diagnostiquer des troubles sensoriels [DEL,10].

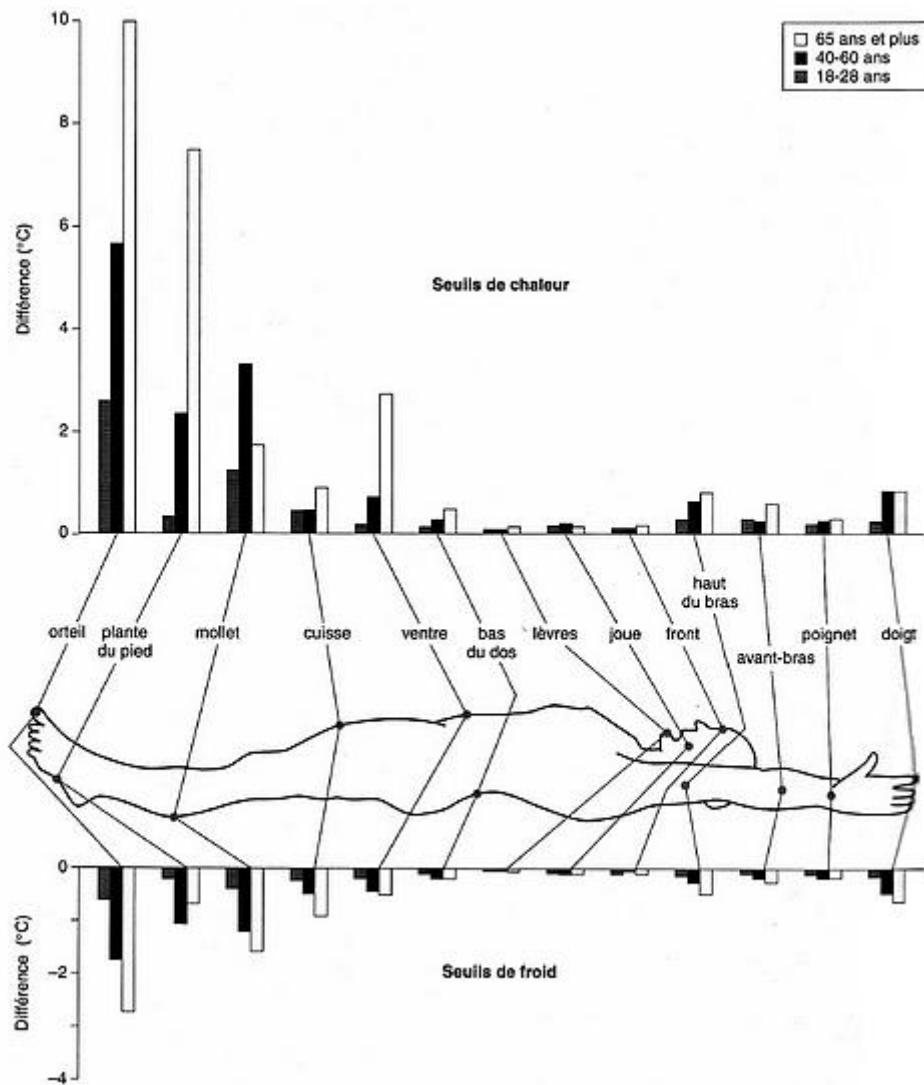


Figure 19 : Cartographie des parties du corps sensibles au chaud (barres supérieures) et au froid (barres inférieures). Ces barres indiquent les seuils médians pour trois groupes d'âge (blanc: 65 ans et plus; noir: 40-60 ans; gris: 18-28 ans) [DEL,03][STE,98]

#### 2.1.2.4) Organisation des voies de conduction

Une fois le récepteur activé par un stimulus, celui-ci va émettre un potentiel d'action qui se diffusera à travers les fibres sensorielles jusqu'à une première étape, au niveau du thalamus, noyau situé à la base du cerveau et servant de relais dans l'intégration des stimuli sensoriels. Il existe ensuite plusieurs sortes de voies anatomiques qui relient les informations sensorielles aux structures centrales. Les premières ne comportent qu'un nombre réduit de relais synaptiques et relient point par point les récepteurs d'une modalité donnée avec une région centrale bien délimitée, principalement dans le cortex (organisation dite topique). Ces voies sont appelées primaires (ou spécifiques) et permettent l'analyse des caractéristiques temporelles et spatiales de la stimulation sensorielle au niveau des aires correspondantes du cortex cérébral (aires primaires) (voir Figure 20). D'autres voies anatomiques relient les organes des sens avec les aires dites secondaires (ou associatives) du cortex : les relais synaptiques y sont plus nombreux et l'organisation topique moins marquée voire absente. Ces voies sont le siège d'associations entre influx sensoriels de modalités différentes et d'intégration de ces influx avec des inputs nerveux d'autres origines. Par exemple, à l'écoute d'un son, l'aire primaire auditive va identifier les fréquences sonores tandis que l'aire secondaire auditive va restituer le son. Enfin, de nombreuses voies anatomiques relient les organes des sens et des centres sous-corticaux divers : cervelet, corps striés, noyaux du tronc, formation réticulée... Par exemple, les voies aboutissant à cette dernière, dites voies non spécifiques car associant plusieurs modalités sensorielles, jouent un rôle important au niveau de la vigilance ou du cycle d'éveil.

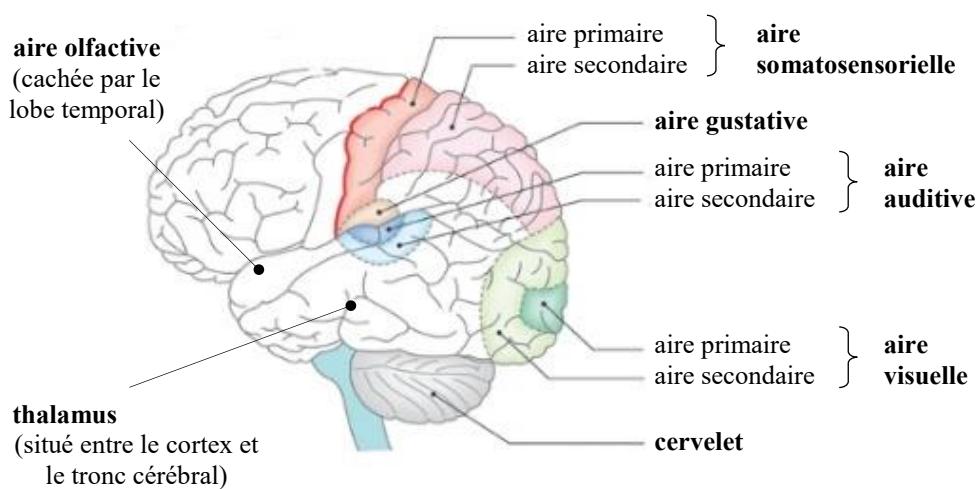


Figure 20 : Aires corticales sensorielles

### 2.1.2.5) Transduction sensorielle et codage de l'information sensorielle

Le type de récepteur détermine dans la majorité des cas la modalité sensorielle, mais à l'intérieur de l'une d'elle, la configuration des décharges nerveuses d'une fibre donnée et le nombre de fibres activées sont à la base du code de transmission de l'information sensorielle sur les caractéristiques du stimulus sensoriel. Il existe quatre dimensions caractérisant les modalités sensorielles : la qualité (groupement d'impressions sensitives apparentées ou semblables, ex : couleur), l'intensité (ex : intensité lumineuse, intensité d'une pression mécanique), la dimension spatiale (localisation spatiale de la stimulation) et la dimension temporelle (localisation temporelle de la stimulation).

La première étape de la réception d'un stimulus sensoriel est la transduction sensorielle. Il s'agit du processus par lequel les récepteurs sensoriels convertissent l'énergie des stimuli en signaux électriques, codant alors l'information en vue de son traitement par le SNC. Sans rentrer au niveau moléculaire, les différents mécanismes de codage comprennent :

- le type de l'information (qualité et modalité), identifié par le type de récepteur activé et la voie spécifique par laquelle l'information est transmise à une aire particulière du cortex cérébral ;
- le siège de l'information (dimension spatiale), identifié par le champ du récepteur activé par l'activation de la voie qui transmet cette information au cortex somato-sensoriel correspondant à ce siège particulier ;
- l'intensité et la durée de l'information, identifiés par la fréquence des potentiels d'action produits par un neurone afférent et par le nombre de récepteurs (et de neurones afférents) activés [RIV,17].

Très schématiquement, il a été déterminé que l'intensité d'une sensation dépend de la fréquence du potentiel d'action et de la masse globale d'activité nerveuse induite par le stimulus, tandis que sa qualité est représentée par la répartition spatiale de cette activité [MAC,09]. En général, un stimulus donné excite de nombreux récepteurs simultanément, et l'information complète du stimulus est contenue dans l'étendue de l'ensemble des impulsions des afférences. Afin de limiter l'excitation à une petite population de neurones, renforçant ainsi l'acuité du signal sensoriel et le pouvoir de discrimination spatiale, les neurones interconnectés vont inhiber leurs voisins dans le but de produire des contrastes à la limite des régions stimulées : il s'agit du phénomène d'inhibition latérale. De plus, l'organisation en relais successifs des voies sensorielles semble permettre de traiter les influx nerveux de manière à ce que, au niveau des centres sous-corticaux et du cortex primaire, les neurones soient sensibles à certaines

caractéristiques du stimulus. Ce codage de l'information au niveau des voies va s'ajouter à son traitement au niveau cortical. L'activité des neurones sensoriels et les activités centrales (notamment les activités globales de vigilance, d'attention, ou encore la mémoire) sont en interaction permanente, aboutissant à une intégration intracérébrale qui constitue la perception.

## 2.2) Le mécanisme de la perception

Afin de détailler le mécanisme de la perception, il convient dans un premier temps de revenir sur la loi fondamentale de Müller : l'organisme vivant n'accède pas directement à la lumière, à la vibration sonore, pas plus qu'à la température des objets ou à ce qui provoque la douleur. Il n'accède qu'à des sensations visuelles, auditives, somesthésiques, etc., c'est-à-dire aux variations de l'état de ses nerfs sensoriels. Cette loi a pour conséquence l'existence d'une barrière physiologique entre la réalité et le ressenti. Aucun organisme vivant n'a d'accès direct à la réalité, au monde extérieur. Il n'a conscience que de l'état de ses aires sensorielles [DEL,03]. Comme l'indique le philosophe empiriste français Michel Malherbe : « le sensible, s'il est traité philosophiquement, est traité comme le phénomène d'un quelque chose qui apparaît comme ceci ou cela à un sujet sensible pour qui cette apparition est phénomène. Et le paradoxe est immédiatement évident : s'il y a donation empirique, le sensible est une manière d'absolu, disons : l'absolu de la présence ; or cet absolu est essentiellement relativisé : cette présence n'est que présence *à* et que présence *de*. Le sensible devient un phénomène, une représentation. » [MAL,91]. Il ajoute, citant le philosophe anglais Thomas Hobbes : « si les apparitions sont les principes par lesquels nous connaissons toute autre chose, nous devons nécessairement accorder que le sens (*sensio*) est le principe par lequel nous connaissons ces principes, et que toute la connaissance que nous en avons en dérive». La perception passe alors premièrement par les sensations. En fait, il n'y a simplement pas de lien direct entre stimulus et perception. Stimulus, sensation et perception doivent être distingués. Ceci peut se résumer ainsi : le stimulus est physique, le processus sensoriel, physiologique, et le percept, psychologique. Pour aller plus loin, ni le stimulus ni la sensation ne sont porteurs de signification : alors que le stimulus n'est qu'une énergie physique, la sensation ne se définit que par son intensité et sa qualité. C'est l'inférence perceptive qui, en combinant les sensations avec des représentations, construira le percept. Ainsi, fondamentalement, c'est le cerveau qui donne un sens à l'environnement dans lequel l'organisme se situe.

### 2.2.1) Perception, représentation et cognition

Lorsque le rôle du système sensoriel est de récupérer l'information présente sous forme d'énergie spécifique dans l'environnement, celui du système nerveux central est de traiter celle-ci et de lui donner une signification, permettant alors à l'organisme de réagir en conséquence. Il existe beaucoup de théories cherchant à expliquer le fonctionnement de la perception, mais les approches dominantes aujourd'hui sont l'approche cognitive et le gestaltisme (de l'allemand *Gestaltpsychologie*, psychologie de la forme) [PER,99]. Comme indiqué précédemment dans le paragraphe consacré au codage sensoriel, les informations extraites par les mécanismes sensoriels sont spécifiques de quelques caractéristiques de la stimulation et par là discriminées. Or, la perception consciente est celle de tous organisés, structurés (*Gestalten*), elle est une représentation globale. Elle est plus encore une identification d'objets, c'est-à-dire un accès à la sémantique.

Avant cet accès, il s'agit pour l'organisme de mettre ensemble les informations relatives aux mêmes objets du monde extérieur et de les distinguer de celles qui appartiennent à d'autres objets. La réalisation de ces groupements perceptifs et la ségrégation des groupements, c'est-à-dire la structuration de l'information sensorielle, sont réalisées pour une part importante sur la base de mécanismes automatiques et modulaires. Cet aspect des traitements est appelé dépendant du stimulus (*Stimulus dependent*) ou encore ascendant (*Bottom-Up*).

Pour une autre part, les groupements perçus et les ségrégations corrélatives vont dépendre de représentations cognitives, c'est-à-dire de connaissances antérieures du monde qui vont servir à diriger ces structurations et à permettre l'interprétation des informations sensorielles en termes de leur référent-objet. Ces traitements sont appelés dépendants des représentations (*Concept dependent*) ou encore descendants (*Top-down*). L'attention va jouer ici un rôle majeur et conduire à la sélection des informations.

La Figure 21 synthétise ces deux aspects du traitement de l'information. La distinction de ces deux grands ordres de traitement n'est cependant que schématique, la réalité étant plus complexe et toujours sujette à débat. La majorité des traitements est ascendante car la perception reflète les événements du monde extérieur, elle ne doit pas être seulement guidée par les attentes de l'individu. Les processus cognitifs auraient alors une action rétroactive sur les processus sensoriels précoces, permettant une meilleure identification des objets. Ils permettent de faire des « inférences », d'aller au-delà de ce qui est contenu dans la simple information sensorielle reçue. C'est par exemple le cas de l'apprentissage du langage, la reconnaissance des mots à l'écrit comme à l'oral, ou de façon moins évidente le cas de l'apprentissage de la vue. Comme le décrivait Hall : « Dans ma jeunesse, j'ai passé plusieurs

étés en compagnie d'étudiants qui faisaient des recherches archéologiques dans les hauts déserts du nord de l'Arizona et du sud de l'Utah. Tous les membres de ces expéditions étaient animés du désir profond de découvrir des outils de pierre et surtout des pointes de flèches. Nous marchions en file indienne, tête baissée, yeux rivés au sol, selon la démarche classique des missions archéologiques sur le terrain. Mais il advenait que mes compagnons, malgré l'ardeur de leur recherche, piétinent des pointes de flèches posées à même le sol. À leur désespoir, je me baissais pour ramasser ce qu'ils n'avaient pas vu, pour la simple raison que j'avais appris à sélectionner mes objets perceptifs. » [HAL,71]

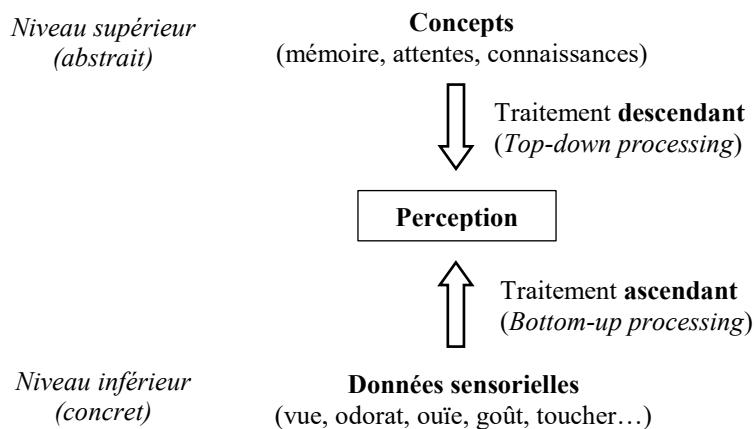


Figure 21 : Schéma simplifié des traitements de l'information "Bottom-Up" et "Top-Down"

Ainsi, des facteurs non perceptifs tels que les besoins, les valeurs, la personnalité, la pression sociale, la culture, etc... peuvent intervenir dans le processus perceptif. Le psychologue américain Irvin Rock énonçait l'hypothèse en 1983 dans son livre intitulé *The Logic of Perception* que « la perception est intelligente en ce sens qu'elle se fonde sur des opérations semblables à celles qui caractérisent la pensée », comme l'inférence inconsciente ou la résolution de problèmes [DEL,03]. Mais ces différents facteurs ne sont pas les seuls à influencer la perception, il y a également les émotions.

## 2.2.2) Notion d'émotion

De manière générale, les émotions informent l'individu sur les événements pertinents pour lui, pour ses besoins, buts, valeurs, son bien-être. Elles guideraient la perception en modulant l'attention et en sélectionnant les informations « utiles » parmi toutes celles reçues. Elles aident à naviguer dans un monde complexe, à prendre des décisions lorsqu'un raisonnement logique ne suffit pas, et à mieux mémoriser les événements importants [SAN,15]. Il existe autant de théories des émotions que de définitions du terme « émotion ». Pour continuer dans la logique empruntée, les émotions sont ici introduites sous l'approche de la psychologie

cognitive plutôt que bémoriste, théorisée par Ortony et al. [ORT,88]. Mais d'abord, qu'est-ce qu'une émotion ? Quelle est la différence entre une émotion et un sentiment ? Entre affect et humeur ? Ce paragraphe offrira une rapide vue d'ensemble sur la notion d'émotion afin d'en définir les éléments essentiels, de différencier certaines notions pouvant porter à confusion et de comprendre leur impact sur la perception.

Les émotions seraient des réactions à des événements, des agents ou des objets. La nature de ces réactions dépendrait de l'interprétation faite par l'individu de la situation suscitant ces émotions. Elles seraient également toujours perçues comme étant positives ou négatives (plaisantes ou déplaisantes, attirance ou répulsion). Cela est appelé la « valence » des émotions.

Il y aurait trois aspects du monde sur lesquels se portent les intérêts d'un individu : les événements, pour leurs conséquences ; les agents, pour leurs actions ; les objets, pour leurs caractéristiques propres, leurs aspects. Les événements sont des interprétations personnelles et subjectives de faits qui surviennent, considérés indépendamment de quelconques croyances que l'individu pourrait avoir sur leurs causes possibles ou véritables. Les agents sont des entités vues comme des moyens ou des intermédiaires causant ou contribuant à des événements. Il s'agit d'un terme très large, comprenant les humains, mais aussi des êtres animés non-humains, des objets inanimés ou des entités abstraites comme des institutions ou même des situations. Enfin, les objets sont des entités affectant nos sens, perceptibles, vues en tant qu'objets (il ne s'agit donc pas seulement d'objets inanimés).

Dans cette théorie, trois grandes familles d'émotions se distinguent alors. Face aux conséquences d'un événement, l'individu peut se trouver satisfait ou insatisfait. Concernant les actions d'un agent, l'individu va approuver ou désapprouver ce qu'il rencontre. Finalement, l'individu va aimer ou détester les aspects d'un objet. Ces familles se trouvent respectivement liées à la désirabilité, au mérite et à l'attirance. La Figure 23 synthétise cette structure globale des différents types d'émotion selon l'approche cognitive.

Ici, il faut remarquer que le terme d'émotions « de base » (ou « primaires ») n'a pas été utilisé, au contraire de théories évolutionnistes ou bémoristes, comme par exemple la célèbre roue des émotions de Plutchik, présentée dans la Figure 22 [PLU,01]. Une autre théorie des émotions se lit sur cette représentation. Plutchik considère que les émotions sont ressenties pour préparer l'humain à agir face aux événements rencontrés (modèle évolutionniste). Par exemple, la peur serait liée à la protection, la colère à la destruction, la joie à la reproduction. Il y aurait huit émotions de base, représentées par les différents quartiers colorés. Il est intéressant ici de noter l'association sémiologique de chaque émotion avec une couleur. Le cœur du cercle (ou la base du cône) regroupe les émotions de base sous leur forme la plus intense. L'intensité décroît

tout au long ensuite jusqu'à la pointe. Les émotions indiquées dans les intervalles correspondent aux « dyades primaires », c'est-à-dire à la combinaison de deux émotions voisines. Plutchik évoque également des dyades secondaires (combinaison d'émotions voisines à une émotion près, par exemple la combinaison de la joie et de la peur mènerait à de la culpabilité) et tertiaires (à deux émotions près, par exemple la combinaison de la joie et de la surprise mènerait à du ravissement), non représentées dans la figure. La roue permettrait alors de représenter jusqu'à 48 émotions. Finalement, il s'agit d'un modèle tridimensionnel, basé sur l'espace (valence, activation, intensité).

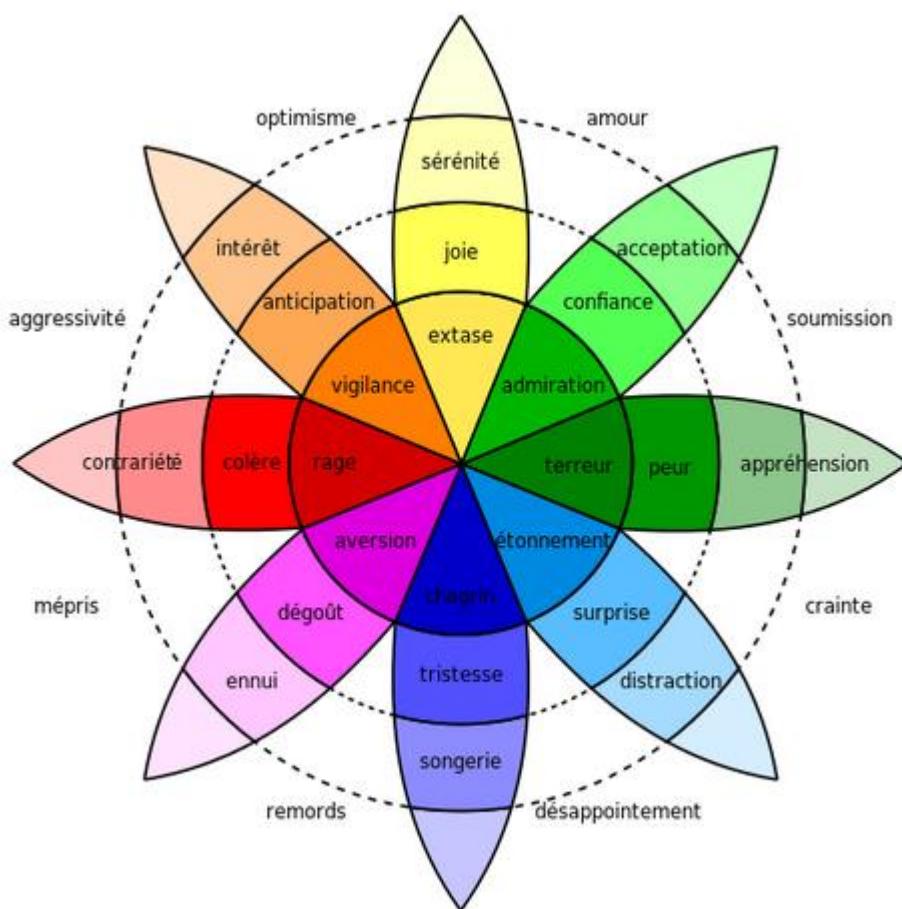


Figure 22 : Roue des émotions de Plutchik

La théorie cognitive des émotions essaie de contourner les problématiques posées par l'utilisation du terme « émotion de base », car il semble trop vague, trop imprécis, et la liste des émotions de base diffère d'un auteur à l'autre. Certes, des émotions semblent plus fréquentes que d'autres, elles peuvent sembler plus basiques dans le sens où les conditions provoquant ces types de réaction sont plus « simples », mais dans la théorie cognitive, la colère (souvent mentionnée comme basique ou primaire) est par exemple une émotion combinée

(désapprobation d'une action – reproche – et mécontentement autour d'un événement indésirable – détresse) ([ORT,88],p.147).

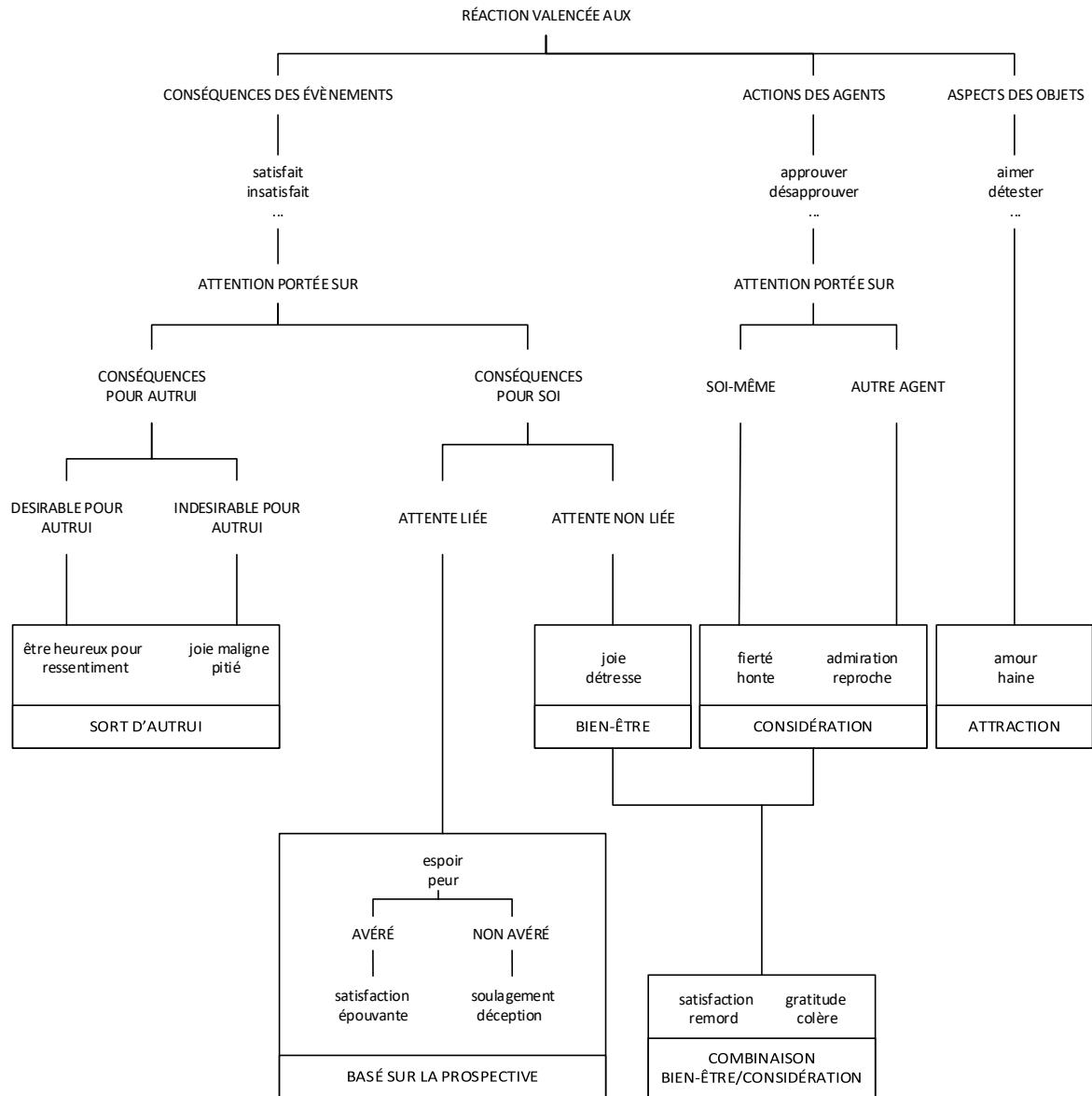


Figure 23 : Structure globale des différents types d'émotion [ORT,88]

Les émotions sont donc des réactions « valencées » à des situations qui ont une importance propre à chacun. Maintenant, quelle est la différence entre une émotion et un sentiment ? William James, philosophe américain du XIX<sup>e</sup> siècle et fondateur de la psychologie américaine, repris par Damasio, énonçait : « le sentiment est une perception du corps réel modifié par l'émotion » [DAM,03]. Les émotions ne sont pas du fait de la conscience, ce ne serait qu'une fois traitées par le cerveau, lorsque l'individu perçoit ce changement dans son organisme, qu'elles deviennent des sentiments, qui eux sont alors conscients. Les sentiments sont ainsi des phénomènes plutôt de « surface », plus diffus et plus durables dans le temps.

Il reste à définir les notions d'affect et d'humeur, qui comme le soulignait Ekkekakis sont souvent utilisées de façon interchangeable sans être conceptuellement différencierées [EKK,12]. Premièrement, l'affect est l'expérience émotionnelle pure et simple. Le terme d'« état affectif » est également utilisé. Il correspond à toutes les expériences subjectives qui impliquent une perception plaisante ou déplaisante. L'état affectif général (*core affect*) peut être ressenti par rapport à un stimulus particulier, comme dans une émotion, mais également sans, comme dans une humeur. A la différence d'une émotion, un état affectif peut survenir sans raison connue, sans rapport avec un événement, une situation ou un objet.

Finalement, l'humeur correspond à un état affectif diffus, d'intensité faible, mais durant longtemps. C'est une combinaison de différents sentiments vécus sur une longue période de temps. Elle donne à l'individu des dispositions, des attitudes spécifiques en lien avec cet ensemble émotionnel [DES,08]. Le schéma présenté en Figure 24 illustre de façon très synthétique les différences entre les quelques concepts liés aux émotions.

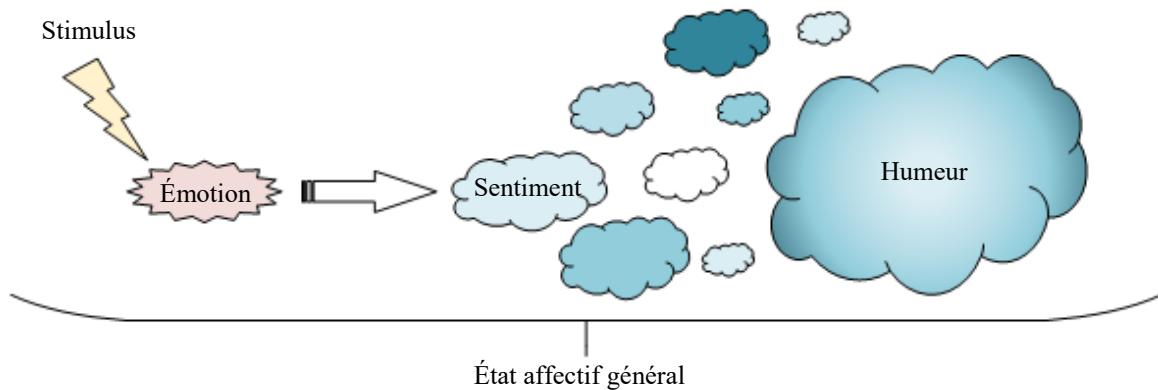


Figure 24 : Synthèse de la notion d'affect

### 2.2.3) Traitement des émotions : système limbique et amygdale

Du point de vue anatomique, lorsqu'une émotion est ressentie, le système nerveux viscéral, constitué des deux vastes réseaux nerveux que sont les systèmes orthosympathique et parasympathique, commande des modifications physiologiques telles que l'accélération des rythmes cardiaque et respiratoire, l'ajustement du diamètre des vaisseaux sanguins pour réguler le flux sanguin, la sécrétion d'adrénaline ou la libération de glucose. Les informations sensorielles passent d'abord au niveau du thalamus, comme vu précédemment, puis elles sont transmises au cortex cérébral sensoriel pour ensuite être traitées dans le système limbique (appelé parfois cerveau émotionnel), groupe de structures cérébrales impliqué dans le traitement des émotions, le comportement et la formation de la mémoire. Cette voie est appelée « voie longue », elle est lente et précise dans son traitement. Cependant, il existe une voie plus directe

dans le traitement d'influx sensoriels, rapide mais imprécise, court-circuitant le traitement cortical. En effet, le cerveau possède un certain « câblage », tel un système d'alarme naturel, permettant de réagir automatiquement et rapidement à des situations spécifiques, notamment liées à la peur et au danger potentiel (mécanisme de survie hérité de longues années d'évolution) [MCG,A]. L'amygdale, structure cérébrale essentielle au décodage des émotions et en particulier des stimuli menaçants pour l'organisme, s'aide de plusieurs régions du cerveau pour fournir une réponse émotionnelle adaptée à l'information reçue. L'hippocampe, en particulier, est spécialisé dans le traitement non pas d'un seul stimulus mais d'un grand nombre de stimuli, et il offre à l'amygdale des informations sur le contexte. Il est en effet impliqué dans le stockage et la remémoration de souvenirs explicites, et ses très nombreuses connexions avec l'amygdale facilitent l'encodage et la mémorisation des événements émotionnels. Cela explique pourquoi les événements marquants d'un point de vue émotionnel sont plus facilement retenus en mémoire à long terme. La Figure 25 schématise les deux « routes émotionnelles ».

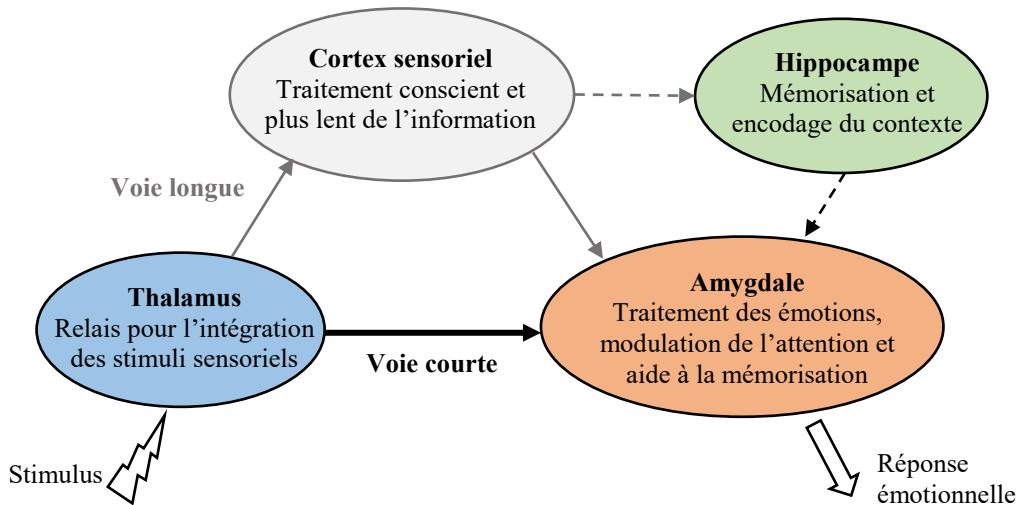


Figure 25 : Voie longue et voie courte du traitement des émotions

Ainsi, face à un stimulus « négatif », l'organisme de l'individu est mis en alerte avant même qu'il puisse percevoir consciemment son environnement. La voie longue est empruntée quelques fractions de secondes plus tard, impliquant le cortex et d'autres structures cérébrales dans le but de concentrer l'attention et de discriminer plus finement le stimulus menaçant.

L'amygdale a donc un rôle central dans le traitement, mais ce n'est pas sa seule fonction. Grâce à ses multiples connexions, elle influe sur de nombreux systèmes cérébraux, tels le cortex sensoriel, comme vu précédemment pour la perception. Ses connexions avec le lobe temporal et le système visuel lui permettent également d'augmenter l'activité des régions sensorielles impliquées dans la perception des événements marquants, focalisant alors l'attention sur ces

derniers. L’amygdale intervient de même dans les processus d’orientation attentionnelle involontaire (le fait de détourner la tête spontanément à l’entente d’un cri ou d’une lumière saillante). Finalement, il est à noter que l’amygdale contribuerait à représenter la valeur d’un stimulus, sa valence, et en particulier son importance pour les besoins de l’organisme.

Précédemment, les émotions négatives ont été mentionnées, mais qu’en est-il des émotions positives ? Brièvement, l’amygdale possède également des connexions avec des structures sous-corticales, comme l’aire tegmentale ventrale et le striatum ventral, essentielles pour l’apprentissage par renforcement, l’addiction, la représentation de l’aspect motivationnel d’un stimulus et les émotions positives. Les neurones composant ces deux structures libèrent de la dopamine, ce neurotransmetteur souvent qualifié de molécule du plaisir (mais dont la fonction ne se limite pas qu’à cela). L’électrophysiologie et l’imagerie cérébrale fonctionnelle ont révélé que l’activité dans ces régions augmente quand le sujet reçoit une récompense (surtout si elle est inattendue ou incertaine), mais s’amenuise et disparaît à mesure que sa prédictibilité accroît. C’est par exemple la loi de l’accoutumance (ou phénomène d’habituation) décrite par Frijda [FRI,88]. À l’inverse, cette activité est diminuée lorsqu’une récompense attendue manque. Ces signaux jouent un rôle déterminant dans les processus de décision. Les neurones modulés par la dopamine dans le striatum ventral se projettent directement sur le cortex préfrontal (la partie qui planifie les actions) et influent sur cette activité corticale. Par conséquent, le système dopaminergique joue un rôle important dans l’apprentissage et la prise de décision. Chez l’homme, l’imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) a montré que diverses situations activent le striatum : l’écoute d’une musique plaisante, le visage d’une personne aimée, ou encore une décision altruiste ou charitable.

Ainsi, les émotions, plus que de préparer à l’action, sont intimement liées à la prise de décision. La décision, processus souvent considéré comme rationnel et logique, est en fait anatomiquement liée aux processus affectifs. La partie orbitale du cortex préfrontal (appelée simplement cortex orbitofrontal), très connectée à l’amygdale et au striatum ventral, est un acteur majeur de la prise de décision. C’est un carrefour permettant l’intégration de la valeur émotionnelle liée aux informations sensorielles qui lui parviennent. Cette zone corticale permet de faire des choix, et joue également un rôle important dans la régulation des affects et des conduites sociales, car elle anticipe les émotions associées aux différentes actions possibles. Elle intervient dans la sélection des actions, mais aussi dans la régulation des émotions et l’inhibition de certains choix. Finalement, les études en IRMf ont montré que cette région réagit à la perception de signaux sociaux positifs ou négatifs, tels la colère d’autrui, la violation des

normes ou encore la culpabilité. Les processus affectifs contrôlés par le cortex orbitofrontal sont donc indispensables au développement d'une conduite sociale adaptée au contexte.

Il reste en dernier lieu à évoquer cette notion de « contexte », à savoir son intégration au niveau cérébral. Il a été indiqué précédemment que l'hippocampe était le système cérébral consacré à fournir des informations sur le contexte de l'information sensorielle, à travers la fonction de la mémorisation des stimuli et de leur perception. Il est maintenant temps de développer le fonctionnement de la mémoire, ainsi que ses différents types.

#### 2.2.4) Les trois types de mémoire

Il existe trois types de mémoire, correspondant à trois systèmes distincts [MCG,C]. Cependant, malgré cette distinction dans leur mécanisme respectif, ces trois systèmes s'enchaînent naturellement et peuvent correspondre aux différentes étapes nécessaires à la mémorisation durable d'un souvenir. Un modèle admis considère que les stimuli détectés par les sens peuvent être soit ignorés (auquel cas ils disparaissent instantanément), soit être perçus et entrer dans un premier temps dans la mémoire sensorielle. Celle-ci ne nécessite pas l'attention de l'individu car le stockage de l'information se fait automatiquement lors de la perception. Elle est essentielle car elle procure l'effet d'unité d'un objet. Ses deux sous-systèmes connus sont la mémoire iconique pour la perception visuelle (capacité à organiser une image) et la mémoire échoïque pour la perception auditive (capacité à organiser un son). La mémoire sensorielle est d'une durée inférieure à la seconde.

Ensuite, l'attention portée à l'objet détermine si l'information rentre dans la mémoire à court terme ou est oubliée. Cette deuxième étape dans la mémorisation permet d'enregistrer des informations limitées dans un laps de temps inférieur à une minute et de les restituer pendant ce délai. Généralement, il a été mesuré que les facultés de l'humain lui permettaient de retenir entre 5 et 9 éléments. Lorsque ce processus de mémorisation est facilité par un travail mental de répétition, cela devient une mémoire de travail. Elle permet d'effectuer des traitements cognitifs sur les éléments qui y sont temporairement stockés. Ainsi, elle serait plus largement impliquée dans des processus faisant appel à un raisonnement, comme la lecture, l'écriture ou le calcul, mais également dans des tâches plus complexes comme la conduite d'une voiture ou la traduction d'une langue à l'autre en temps réel comme le fait un interprète, par exemple.

Enfin, lorsque des informations sont maintenues un certain temps dans la mémoire à court terme, elles peuvent intégrer la mémoire à long terme. Celle-ci peut être subdivisée en mémoire explicite et implicite, ce qui sera développé un peu plus loin. La mémorisation pour le long terme suit trois étapes : l'encodage, le stockage et la restitution des informations.

L'encodage vise à donner une signification à la chose à remémorer. Par exemple, le mot « cerise » peut être encodé de la manière suivante : fruit, rond, rouge. Si ce mot n'est pas spontanément restitué, l'évocation d'un indice issu de l'encodage (par exemple « fruit ») permettra de le retrouver. L'efficacité de la récupération dépend en fait de la profondeur de l'encodage, donc de l'organisation des données. Ce processus d'encodage fait référence non seulement à l'information ciblée, mais aussi à son contexte environnemental, cognitif et émotionnel. De plus, l'association d'idées ou d'images par des moyens mnémotechniques contribuent à créer des liens qui facilitent l'encodage : plus il y a de « ponts » mentaux créés, plus la mémorisation est facilitée. Évidemment, une information peut toujours être oubliée avec le temps, même si elle est bien encodée. Le stockage peut être considéré comme le processus actif de consolidation rendant les souvenirs plus durables et plus ancrés. C'est cette consolidation qui différencie le souvenir de faits récents du souvenir de faits anciens, qui eux se trouvent associés à un plus grand nombre de connaissances déjà établies.

La dernière étape, la restitution des souvenirs, qu'elle soit volontaire ou non, fait appel à des mécanismes actifs qui vont utiliser les indices de l'encodage. L'information est alors copiée temporairement de la mémoire à long terme dans la mémoire de travail pour être utilisée. Plus un souvenir sera codé, élaboré, organisé, structuré, « référencé », plus il sera facile à retrouver. Cette restitution est traditionnellement subdivisée en deux types : le rappel et la reconnaissance. Le premier implique une récupération active de l'information, alors que le deuxième requiert seulement de décider si une chose parmi d'autres a été préalablement rencontrée. L'activation pour le rappel est plus difficile car elle doit se faire globalement dans toute l'assemblée de neurones impliquée dans le souvenir. Par contre, une activation partielle du réseau neuronal déclenchée par une partie d'un objet pourrait suffire à activer tout le réseau dans le cas de la reconnaissance. La Figure 26 illustre les différents processus de mémorisation d'une information sensorielle.

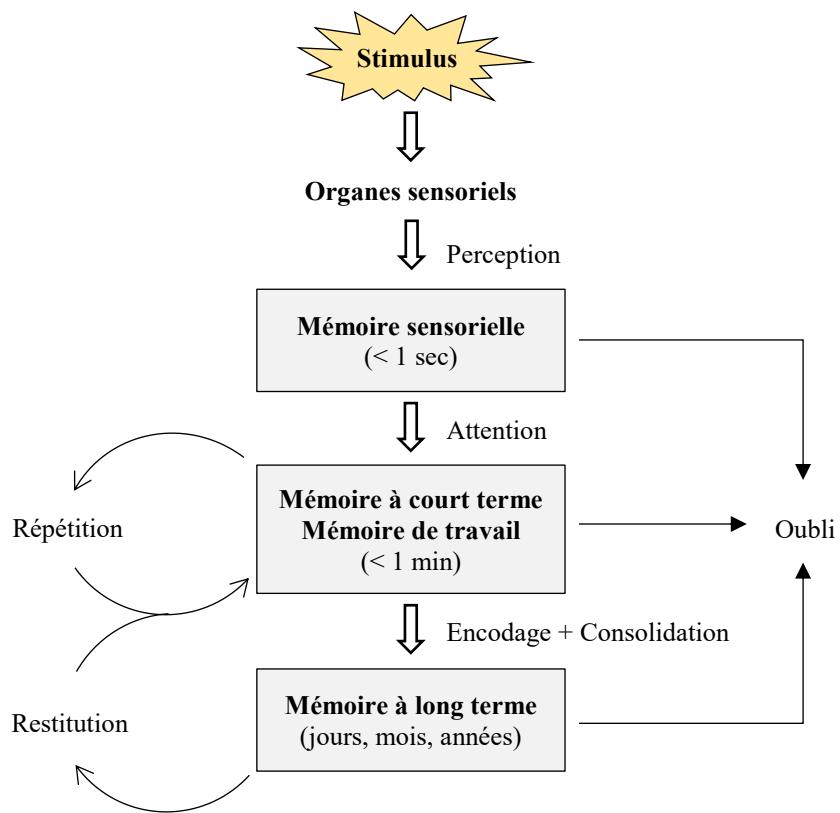


Figure 26 : Mécanisme de mémorisation

Au niveau physiologique, il s'avèrera que les traces mnésiques soient disséminées à travers des réseaux neuronaux distribués dans l'ensemble du cerveau mais parfaitement spécifiés, qui seraient le support d'activités neuronales organisées de façon spatio-temporelle. L'individualisation (ou marquage) de ces réseaux au cours de la mémorisation reposera sur les mécanismes de la plasticité synaptique. Le mécanisme le plus souvent évoqué est la transposition au niveau physiologique du phénomène expérimental de potentialisation à long terme (facilitation durable de la transmission synaptique à la suite de stimulations répétées). Lors de la mémorisation, l'hippocampe, qui est pour rappel relié aux structures du système limbique, jouerait un rôle dans le traitement de l'information (notamment concernant sa nouveauté ou sa qualification en termes émotionnels et motivationnels pour l'individu) et permettrait ou initierait le marquage de réseau.

## 2.2.5) Mémoire explicite et mémoire implicite

D'une manière générale, la mémoire humaine constitue une association de différents sous-systèmes en constante interaction. La mémoire à long terme, comme indiqué précédemment, semblerait se diviser en deux catégories : la mémoire explicite (déclarative) et

la mémoire implicite (non-déclarative), selon que leur contenu puisse s'exprimer verbalement ou non.

Si l'individu peut se rappeler consciemment les faits et les choses, il fait appel à sa mémoire explicite. Celle-ci peut se diviser à son tour en deux sous-catégories. La première est la mémoire épisodique (ou autobiographique) : elle permet à la personne de se rappeler des événements qu'elle a personnellement vécus dans un lieu et un instant donné. C'est par exemple le souvenir du repas de la veille, du nom d'anciens collègues ou de la date d'un concert auquel elle aurait assisté. La caractéristique la plus distinctive de ce type de mémoire est que l'individu se voit en tant qu'acteur des événements mémorisés. Ainsi, il mémorise non seulement un événement qu'il a vécu, mais tout le contexte particulier de celui-ci. La charge émotionnelle vécue au moment des faits conditionne également la qualité de la mémorisation épisodique, compte tenu des nombreuses connexions entre l'hippocampe et le système limbique, notamment l'amygdale. La deuxième sous-catégorie est la mémoire sémantique : c'est le système par lequel l'individu stocke sa connaissance du monde. C'est une base de connaissances que tout humain possède, et dont une grande partie lui est accessible rapidement et facilement. C'est la mémoire du sens des mots, celle qui permet de se souvenir du nom des pays, mais aussi de coutumes sociales, de la fonction des choses, de leur couleur, de leur odeur, etc... C'est aussi la mémoire des règles et des concepts qui permet la construction d'une représentation mentale du monde sans perception immédiate. Son contenu est donc abstrait et relationnel, et il est associé à la signification des symboles verbaux. Elle est cependant indépendante du contexte spatio-temporel de son acquisition. Il s'agit d'une mémoire de référence qui renferme des informations accumulées de façon répétée tout au long de la vie du sujet.

Il existe d'un autre côté la mémoire implicite, où le souvenir n'est pas lié à une expérience originelle et qui peut être restitué automatiquement, sans les efforts de rappel nécessaire à la mémoire explicite [MCG,B]. Elle fait appel à quatre sous-mécanismes : la mémoire procédurale, les conditionnements émotionnels, les réflexes conditionnés et l'effet d'amorçage. Le premier mécanisme permet l'acquisition d'habiletés et l'amélioration progressive des performances motrices. Elle est constituée d'automatismes sensorimoteurs si bien intégrés qu'ils deviennent inconscients. Cela permet par exemple de conduire sa voiture ou de manger sans devoir être totalement concentré sur ces tâches. Les deux mécanismes suivants sont des processus mnésiques très anciens du point de vue de l'évolution de l'espèce humaine et basés sur un apprentissage associatif. Les conditionnements émotionnels et les réflexes conditionnés se forment par l'association inconsciente entre des stimuli de

l'environnement et les réactions automatiques de l'organisme. Le traitement de la peur par l'amygdale comme énoncé plus tôt est un exemple d'un conditionnement émotionnel. Dans le même esprit, un réflexe conditionné signifie une réponse motrice en réaction à un stimulus conditionnel. Enfin, le dernier mécanisme de la mémoire implicite est l'effet d'amorçage (*priming*). L'acquisition d'un souvenir dans la mémoire implicite se fait à l'insu du sujet et elle doit souvent être mise en évidence de manière indirecte, par des phénomènes comme l'amorçage. Cet effet consiste en une augmentation de la précision ou de la vitesse de prise de décision survenant suite à l'exposition préalable d'une information pertinente sur le contexte, mais sans qu'il n'y ait aucune motivation à rechercher cette information de la part du sujet. La présentation d'un stimulus « amorce » peut alors influencer le traitement d'un autre stimulus « cible ». Par exemple, la chaîne de caractères « docteur » sera plus rapidement reconnue comme un mot si elle est précédée du mot « infirmière », en comparaison avec le mot « chaussure » ou une chaîne de caractères quelconque comme « brujadol ». La Figure 27 résume les différentes catégories et sous-catégories de la mémoire à long terme.

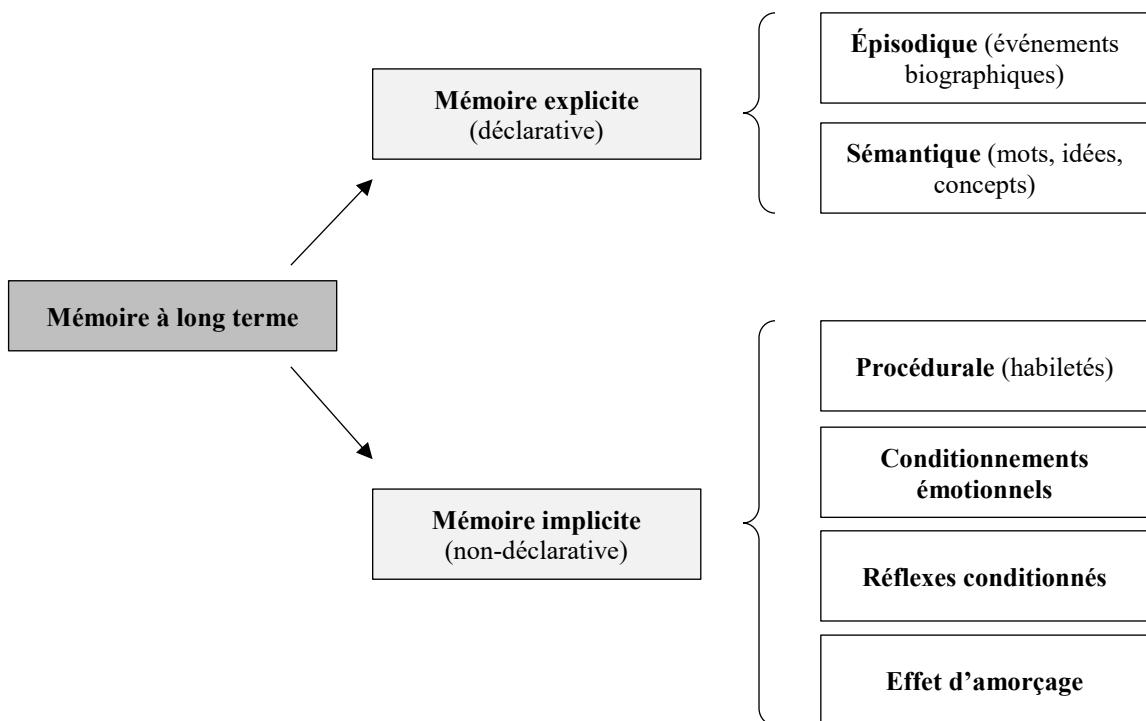


Figure 27 : Les différents types de mémoire à long terme

## 2.2.6) Synthèse du processus de perception

De nombreux détails ont volontairement été mis de côté pour se focaliser sur l'essentiel et comprendre le fonctionnement global de la perception. Cette première partie s'inspire largement de cours de physiologie, de neurosciences et de psychologie cognitive. Ces deux dernières disciplines étant relativement récentes, elles sont encore le foyer de nombreux débats, qui ne sont bien évidemment pas l'objet de cette introduction générale au fonctionnement du système perceptif.

La Figure 28 donne une synthèse de tout ce qui a été vu dans cette partie à travers un schéma opérationnel simplifié de la perception [MAC,09][BAR,95]. Par souci de clarté, les traitements ascendants (*Bottom-up*) et descendants (*Top-down*) de l'information sensorielle ne sont pas représentés, ni la voie courte du traitement émotionnel. Il s'agit donc du traitement « basique » d'une information sensorielle.

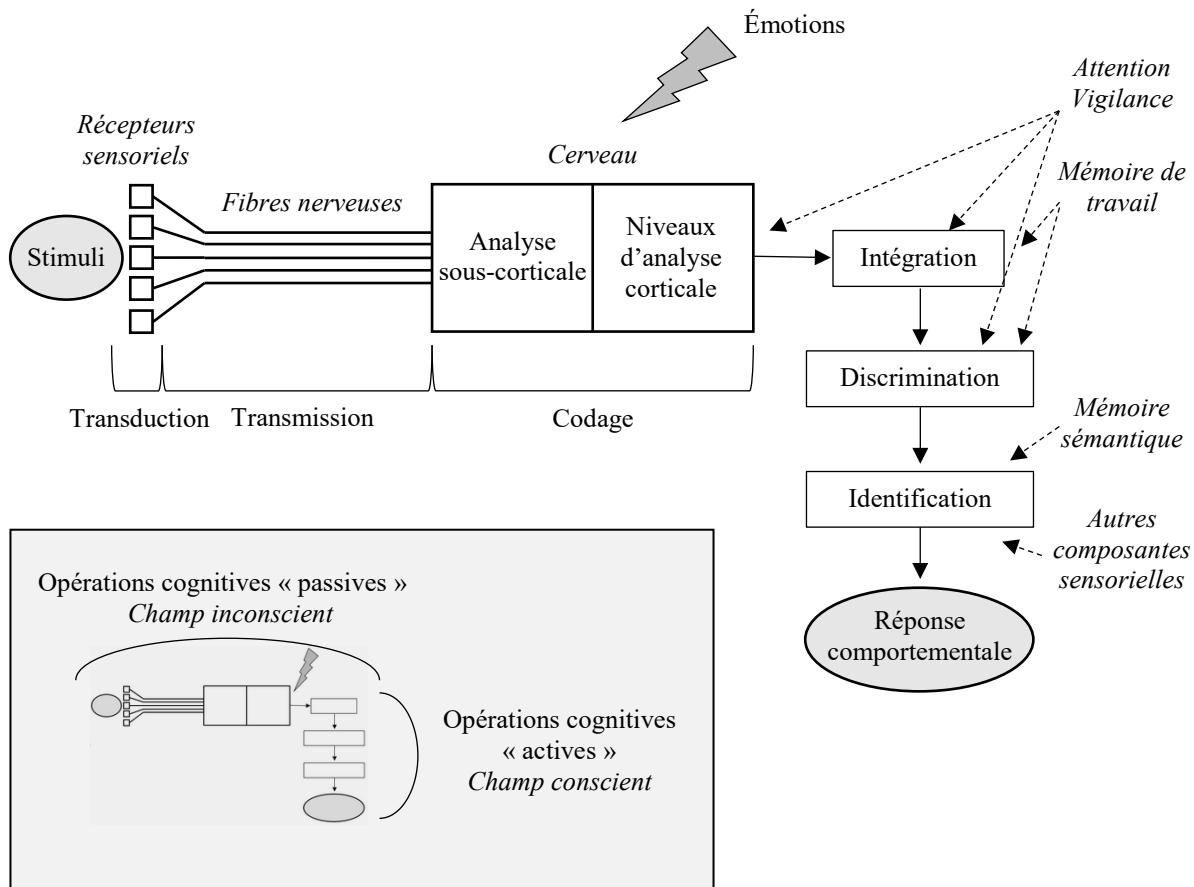


Figure 28 : Schéma opérationnel simplifié de la perception

Pour émettre quelques dernières remarques, il est à noter que la perception est un processus très complexe pouvant être influencé par de nombreux facteurs dépendants du sujet : son attention, sa vigilance, ses connaissances antérieures, sa mémoire, ou encore ses caractéristiques émotionnelles (au sens plus large, sa personnalité). Comme émis au chapitre

précédent concernant la métrologie sensorielle, l'individu n'a conscience que de la dernière partie de tout ce processus, mais il est tout de même (et heureusement) capable de verbaliser ce qu'il a ressenti de façon assez précise (selon son entraînement). Ainsi, il peut raisonnablement qualifier et quantifier ses sensations (qualité/intensité) de façon relative (pour rappel, les récepteurs sensoriels, du fait de leur structure adaptative, ne donnent que des informations relatives) et exprimer son appréciation de l'expérience sensorielle vécue (caractère hédonique de la perception, lié aux émotions vécues). Finalement, comme le disait le psychiatre Georges Lanteri-Laura dans son livre « La psychiatrie phénoménologique » (1963) : « c'est la perception qui révèle l'incarnation de l'expérience humaine et qu'on ne peut connaître qu'en s'efforçant de la décrire » [MUC,91].

Bien sûr, la perception ne se limite pas à une seule modalité sensorielle, elle comprend le traitement quasi-simultané d'un ensemble d'informations multi-sensorielles qui se mélangent et interagissent entre elles, se complètent ou se dégradent. Ici, cette recherche souhaite se concentrer sur la perception du toucher, modalité sensorielle principale mobilisée dans l'interaction entre le passager et le support auquel il va se maintenir. La dernière partie de ce préambule va donc s'intéresser au mécanisme du toucher.

### 2.3) Le cas de la perception tactile

Field cite l'anthropologue anglais Ashley Montagu, lui-même rapportant les mots du Dictionnaire de la Langue Russe : « En réalité, les cinq sens peuvent se réduire à un seul : le toucher. La langue et le palais sentent la nourriture ; l'oreille, les ondes sonores ; le nez, les émanations ; les yeux, les rayons lumineux » [FIE,14]. Le toucher serait ainsi le sens primaire, universel. A l'instar des autres sens, le toucher semble avoir la propriété d'être impossible à duper, il serait le plus affûté et le plus fiable de tous. Cette pensée est ancrée dans les esprits depuis l'Antiquité, comme en témoigne par exemple le tableau de Caravage intitulé « L'incrédulité de saint Thomas » (Figure 29). Saint Thomas, ne croyant pas en la résurrection du Christ, avait besoin de toucher les plaies de ce dernier pour y croire : « Thomas voulait établir sa foi sur le témoignage du plus grossier de tous les sens, et il ne s'en rapportait pas même à ses yeux. Car il n'a pas dit seulement: si je ne vois, mais encore: si je ne touche; de peur que ce qui paraissait ne fût qu'un fantôme et une illusion » [CHR,65]. Le toucher permet de matérialiser l'objet, il serait le seul contact direct avec le monde. Aujourd'hui encore, le fonctionnement de ce sens si particulier n'a pas encore été entièrement résolu. Comme l'annonçaient Loomis et Lederman en 1986 : « Notre connaissance du toucher comprend seulement des fragments de concepts et de découvertes, certains traitant des propriétés

fonctionnelles de base (par exemple la sensibilité cutanée ou les limites de la perception kinesthésique de l'espace) et d'autres traitant des capacités des systèmes dans leur ensemble (par exemple l'identification des objets en trois dimensions) » [LOO,86] (repris de [TOR,06], traduit de l'anglais). Cette dernière partie tâchera d'exposer les connaissances actuelles sur le sujet, en commençant par développer les différentes formes de toucher puis leurs mécanismes associés.



Figure 29 : L'incrédulité de Thomas, Le Caravage (1603)

### 2.3.1) Le système haptique

Le toucher est un sens bien particulier, car il comprend une partie sensible et une partie motrice. Effectivement, à l'instar de l'odorat, du goût, de l'ouïe et de la vue, le toucher peut avoir une partie « active », exploratoire, guidant la perception en plus d'une partie « passive », sensorielle. La littérature comporte plusieurs essais de qualification ou de catégorisation des différentes formes de toucher, amenant des définitions parfois contradictoires entre plusieurs recueils [APP,91]. Ceci montre que la compréhension du fonctionnement du toucher n'en est encore qu'à ses débuts, celui-ci formant un système complexe. Ce système est souvent appelé « système haptique », où « haptique » est simplement synonyme de « toucher » (du grec ancien ἀπτικός – *haptikós*, « capable de toucher », dérivé de ἄπτω – *háptō*, « toucher »). Il fait référence à la capacité de manipuler et d'identifier des objets à travers le sens du toucher. Selon Appelle, ce terme aurait premièrement été utilisé par le psychologue Revesz en 1931 (cité dans [REV,50]) pour désigner la synthèse des perceptions des systèmes sensoriels de la main ainsi

que de ses mouvements d'exploration. Plus tard, pour Loomis et Lederman [LOO,86], la perception haptique s'étend aux sensibilités cutanées et kinesthésiques transmettant l'information sur un objet ou un événement. La main n'est alors plus la seule concernée, par exemple la sensation de la texture de la nourriture dans la bouche apparaît dorénavant comme faisant partie de cette perception haptique. Une dernière définition, provenant de Gibson [GIB,66], décompose le système haptique en plusieurs sous-systèmes :

- « toucher cutané » : stimulation de la peau sans mouvements des muscles ou des articulations ;
- « toucher haptique » : stimulation de la peau avec mouvements des articulations ;
- « toucher dynamique » : stimulation de la peau avec mouvements des muscles et des articulations ;
- « toucher prise de température » ;
- « toucher douloureux » ;
- « toucher orienté » : stimulation de la peau et stimulation du système vestibulaire (sens de l'équilibre).

Pour lui, la manipulation d'objets implique la pression, la force, la proprioception, la stimulation du système vestibulaire, la stimulation de plusieurs récepteurs de la peau, ainsi que l'activité des muscles, des articulations et des tendons. Afin de synthétiser toutes ces définitions, la Figure 30 donne l'organisation actuellement admise pour le système haptique.

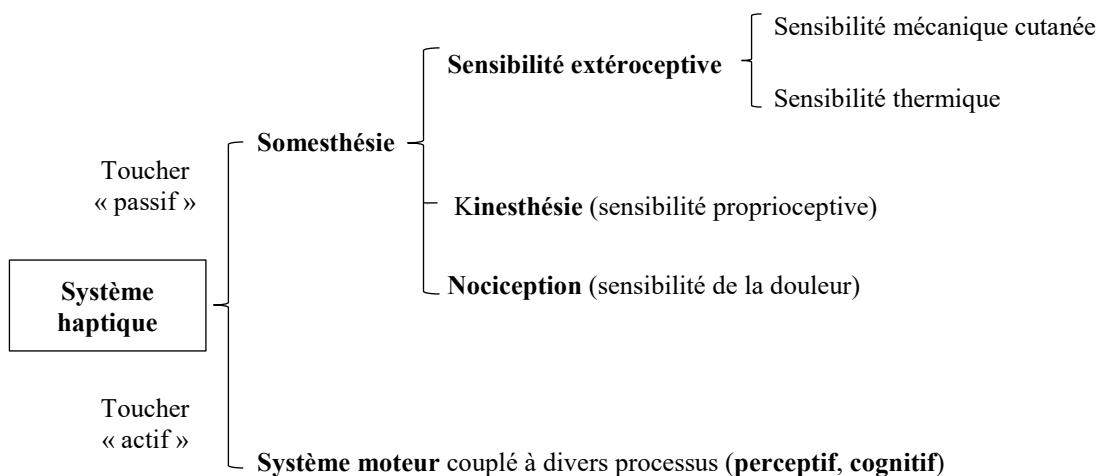
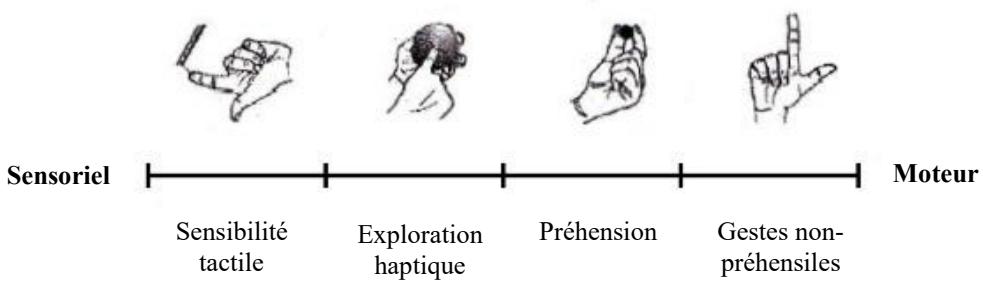


Figure 30 : Organisation du système haptique

Cette organisation « réductionniste » ne doit cependant pas laisser penser que ces différents sous-systèmes agissent indépendamment les uns des autres. En effet, ils agissent ensemble de façon inconsciente, notamment lors de l'exploration haptique qui implique plusieurs sous-processus. Jones et Lederman parlent par exemple d'un « continuum sensorimoteur » pour le toucher manuel (Figure 31) [JON,06].



La possibilité pour l'humain de se « déplacer » sur ce continuum lui permet d'améliorer directement sa perception tactile. Des expériences menées par Gibson et rapportées par Hall ont démontré que le toucher actif permettait aux sujets de reproduire avec 95% d'exactitude des objets abstraits dissimulés à la vue, tandis que le toucher passif ne permettait que 49% d'exactitude [HAL,71]. Comme le constatait amèrement Hall à l'époque, le toucher actif est resté longtemps dans l'ombre : « les designers et ingénieurs n'ont pas su reconnaître la signification fondamentale du toucher [actif] », ce à quoi il ajoutait : « Ils n'ont pas compris combien il importe de maintenir le contact de l'individu avec le monde où il vit » (p.83). Effectivement, le sens du toucher crée un lien entre le sujet et son environnement, comme évoqué dans l'exemple de saint Thomas. Non seulement le sujet perçoit son environnement proche, mais il s'implique aussi dedans, comme le démontre le philosophe Michel Serres. Nul ne peut toucher sans être touché à son tour. Comme il le dit : « La peau est une variété de contingence : en elle, par elle, avec elle se touchent le monde et mon corps, le sentant et le senti, elle définit le bord commun. [...] Je me mélange au monde comme il se mélange à moi. La peau intervient entre plusieurs choses et les fait se mêler » [SER,85]. D'un point de vue phénoménologique, il convient donc de distinguer deux concepts : le sentant et le senti, ou ici, le touchant et le touché. Le touchant correspond à la partie du corps humain en contact avec la partie d'objet (le touché) et le touché correspond à la partie de l'objet en contact avec la partie du corps humain (le touchant) [BA2,09].

Plus précisément, le touché représente les différentes parties de l'objet qui vont servir d'interfaces avec une ou plusieurs parties du corps humain. Par exemple, lorsqu'un individu

boit un café dans un mug, le touché va être la poignée de la tasse et le touchant les différents doigts effectuant la prise. Cette « décomposition perceptive » sera utile lorsqu'il s'agira d'évaluer les propriétés organoleptiques d'un objet de façon précise lors d'une évaluation sensorielle.

De l'autre côté, le touchant regroupe donc l'ensemble des récepteurs tactiles répartis sur les différentes parties du corps potentiellement en contact avec l'objet. Le corps humain est recouvert en grande majorité de ce qui est communément appelé une « peau », un organe constitué de plusieurs couches de tissus, elles-mêmes constituées de sous-systèmes aux fonctions bien spécifiques. La peau est l'organe principal lié à la sensibilité tactile extéroceptive.

Maintenant que le système haptique a été abordé de manière globale, il est temps de revenir plus en détail sur le fonctionnement du toucher « passif ».

### 2.3.2) Le toucher « passif » : la somesthésie

La somesthésie englobe différentes sensibilités : la sensibilité mécanique cutanée, la sensibilité thermique, la sensibilité proprioceptive (ou kinesthésie) et la nociception (douleur). Comme son nom l'indique, l'acteur principal de cette sensibilité est la peau, qu'il faut se représenter comme une immense surface réceptrice. Elle comporte trois couches : l'épiderme, qui est la partie externe, apparente ; le derme, situé juste en-dessous ; et les tissus sous-cutanés, plus profondément. Une partie de cette surface externe est habillée de poils, tandis qu'une autre partie est nue, ou glabre. Cette partie glabre se situe sur la paume de la main ou sur la plante des pieds, par exemple. L'épaisseur de la peau varie selon les différentes parties du corps, la peau étant très mince au niveau du visage (0,5 mm) et plus épaisse à la plante des pieds (5 mm) [DEL,03]. Chaque région de la peau est innervée par les fibres nerveuses d'un segment spinal donné, permettant ensuite une communication avec le cortex somatosensoriel.

#### 2.3.2.1) Acuité tactile

La peau comprend, comme indiqué précédemment, un nombre considérable de structures réceptrices. Par exemple, la main contiendrait à elle seule environ 17.000 récepteurs tactiles. Cela n'est pas le cas pour d'autres régions du corps, qui présentent une sensibilité bien inférieure, comme les bras. La concentration plus ou moins importante de récepteurs sensoriels dans une région va déterminer notamment son acuité tactile. Il s'agit sommairement de la capacité à discerner deux points de pression sur la peau. Si deux points de pression sont trop rapprochés, ils ne seront perçus que comme une seule stimulation. Ainsi, des études ont visé à

déterminer la distance minimale entre ces deux points pour que ces derniers soient perçus comme deux points distincts plutôt que comme un seul point, par exemple avec un compas à pointes sèches, appelé compas de Weber (voir Figure 32). Plus le seuil, ou distance minimale, requis pour distinguer les deux points est petit, plus l'acuité tactile est grande. La distance nécessaire pour distinguer les deux points varie selon la nature de la surface stimulée. En général, l'acuité tactile est plus grande sur des surfaces de la peau destinées à être mobiles, comme la langue ou les doigts, plutôt que sur des surfaces telles que le dos ou la poitrine [WEI,68]. À titre d'exemple, le seuil de discrimination tactile est de 1,1 mm à la pointe de la langue, de 13 mm sur la paume et de 31 mm sur le dos de la main [CAL,16].

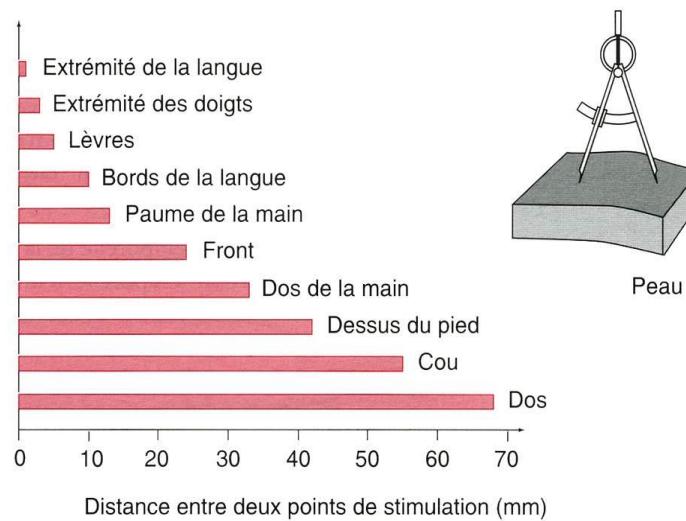


Figure 32 : Acuité tactile et compas de Weber (d'après [RIC,94])

Il existe d'autres seuils de précision pour le sens tactile, évoqués par Tornil. Par exemple, au bout du doigt, le seuil moyen de détection d'une force serait de 63 mg, tandis que le seuil de perception d'un déplacement statique serait de 11,2  $\mu\text{m}$  [TOR,06]

Les seuils de discrimination spatiale renseignent indirectement sur la concentration des récepteurs sensoriels dans la peau selon les différents endroits du corps. Le neurochirurgien québécois Wilder Penfield proposait en 1950 une autre représentation de la répartition des récepteurs tactiles, sous la forme d'un « homonculus » [PEN,50]. Il s'agit d'une représentation déformée du corps humain, où chaque partie sensitive du corps est représentée proportionnellement à sa richesse en terminaisons sensitives. La Figure 34 illustre cet homonculus sensoriel et indique la distribution somatotopique sur le cortex somato-sensoriel des différentes parties du corps. Ces projections corticales proviennent des différents mécanorécepteurs présents dans la peau, objets du prochain paragraphe.

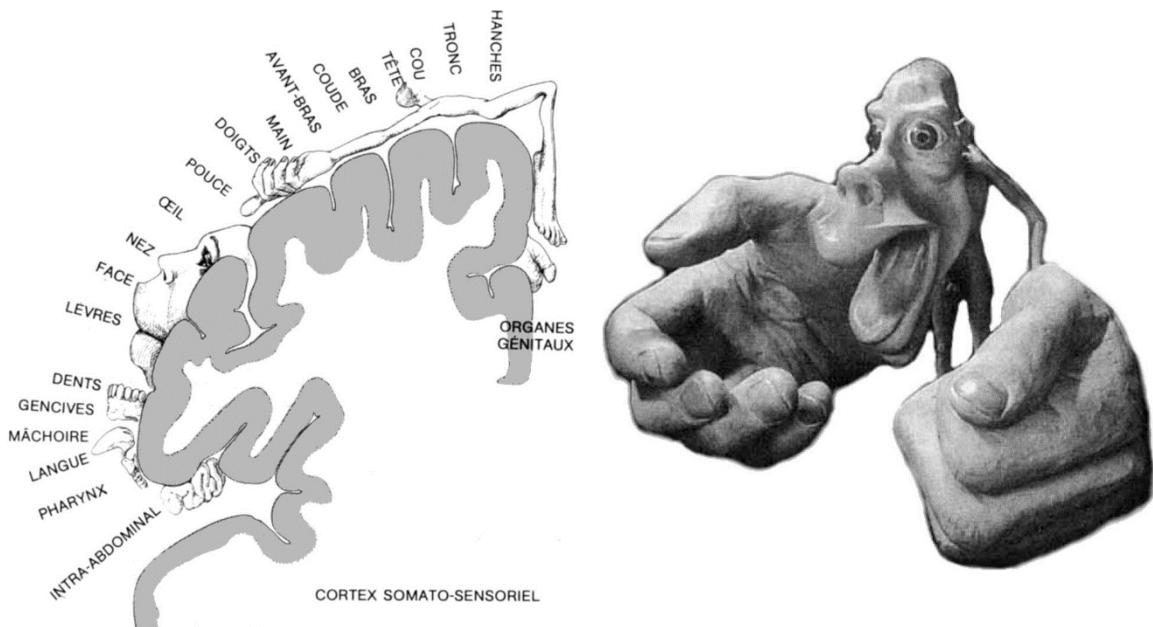


Figure 33 : Distribution somatotopique des différentes parties du corps sur le cortex somatosensoriel et homonculus somesthésique, repris de [TOR,06]

### 2.3.2.2) Récepteurs sensoriels cutanés

La peau renferme de nombreux corpuscules destinés à récupérer divers types d'informations, comme la pression, la chaleur, etc. La Figure 34 illustre les différents récepteurs présents dans la peau. Dans l'ensemble, le corps humain est muni de structures permettant d'être informé tant sur l'état statique que des changements dynamiques de la peau. Parmi ces structures se distinguent des thermorécepteurs (sensibles aux variations de température), des nocicepteurs (liés à la douleur) et des mécanorécepteurs (sensibles aux déformations mécaniques). Pour la suite, seules les caractéristiques de la peau glabre seront présentées, notamment dans la main.

Pour évoquer rapidement les deux premiers types de récepteurs sensoriels, les thermorécepteurs cutanés sont séparés en deux catégories : les récepteurs au chaud et les récepteurs au froid, tous deux étant des terminaisons libres situées dans l'épiderme ou le derme. Les récepteurs au froid sont les plus nombreux et réagissent à des baisses de températures entre 5 et 43°C, avec un maximum d'intensité à 25°C. De l'autre côté, les récepteurs au chaud s'activent avec des hausses de température, avec un pic d'intensité aux alentours de 45°C. Malgré le fait que les seuils de détection thermique diffèrent selon les parties du corps, toutes les régions restent plus sensibles au froid qu'au chaud. D'une manière générale, le seuil pour détecter une baisse de température (froid) est moitié plus faible que celui pour détecter une hausse de température (chaud), et plus une région est sensible au froid, plus elle l'est au chaud. Pour donner un exemple, en moyenne, le seuil de froid au bout du doigt est de 0,12°C et de

0,16°C pour le chaud. Cependant, il faut noter que les changements de température sont détectés uniquement si la vitesse de changement de température est supérieure à un certain taux. En-dessous de celui-ci, si par exemple la température change à un taux de 0,5°C par minute, et si la température de la peau reste dans la zone thermique neutre de 30-36°C, le sujet peut ne pas détecter un changement de 4 à 5°C. Le taux de détection est admis à 0,1°C/s [JON,06]. A ce jour, il n'existe pas de consensus scientifique sur la localisation relative de ces différents thermorécepteurs, ni d'étude de leur répartition dans la peau glabre ou pileuse, même s'il existe une cartographie des seuils de chaleur et de froid sur les différentes parties du corps humain [STE,98].

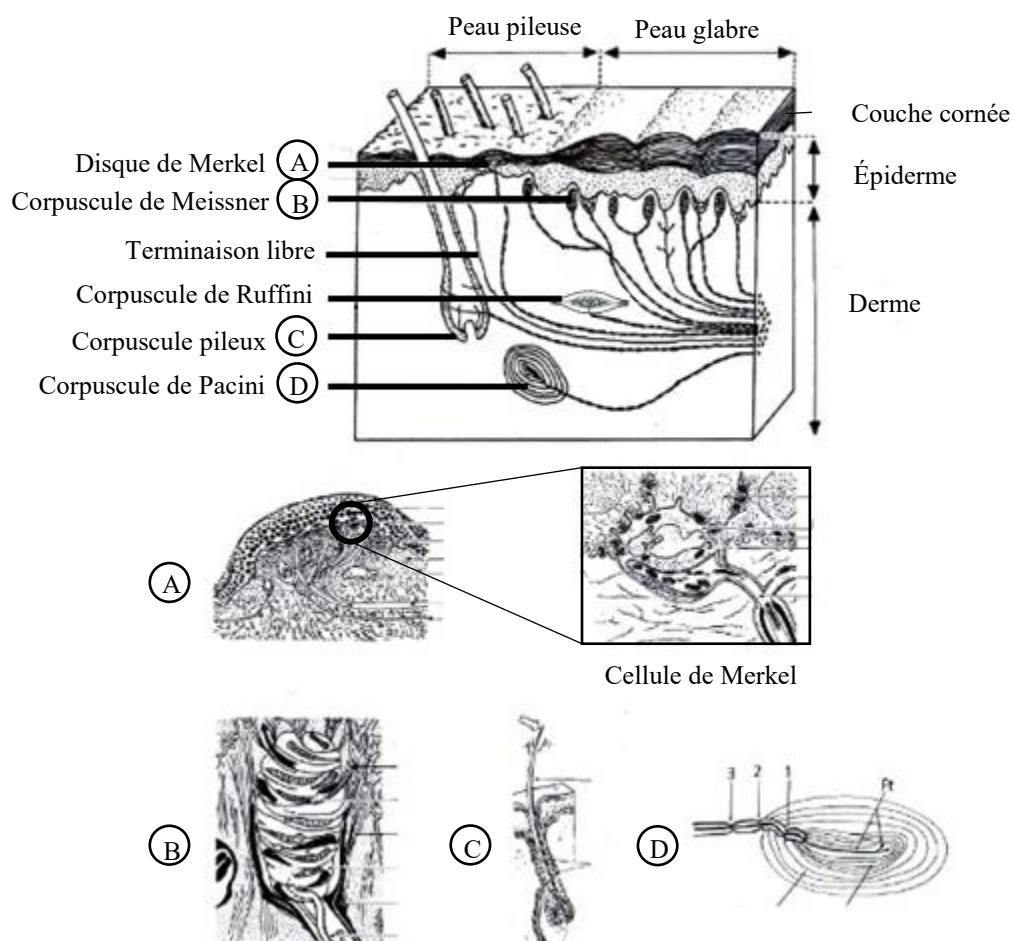


Figure 34 : Illustration des différents récepteurs de la peau et de leur localisation en profondeur  
[CAL,16][DEL,03]

Le deuxième type de récepteur sensoriel cutané correspond aux nocicepteurs. Ces derniers sont sensibles aux stimuli intenses provenant de diverses sources d'énergie (e.g. électriques, mécaniques, chimiques ou thermiques) pouvant endommager les tissus. Par exemple, les nocicepteurs prennent le relais des thermorécepteurs lorsque les températures dépassent 45°C ou sont inférieures à 13°C. Pour développer succinctement, la douleur liée au

froid, associée à des températures inférieures à 14°C, est assez lente à se manifester, car les dommages provoqués par le gel prennent généralement du temps. A l'inverse, la douleur liée au chaud (à partir de 45°C) est très rapide à se manifester, car les dommages sont imminents [JON,06].

Enfin, les mécanorécepteurs vont détecter les diverses déformations de la peau. Les études récentes offrent un classement de ces différents récepteurs fondé sur la capacité d'adaptation, rapide ou lente, et sur la dimension des champs récepteurs [ROL,94]. La Figure 35 illustre ces propriétés pour la main et décrit les récepteurs en fonction de leur type d'adaptation, rapide (AR) ou lente (AL), et de la taille des champs récepteurs, petit (I) ou grand (II).

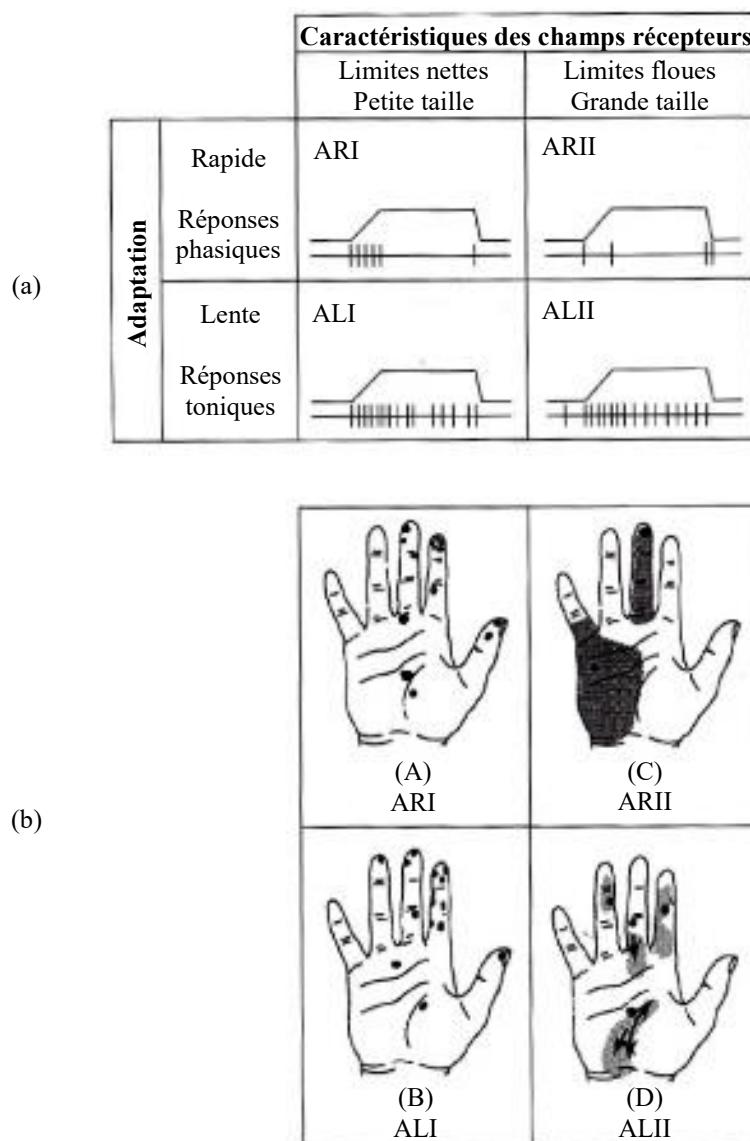


Figure 35 : Récepteurs cutanés en fonction de leur type d'adaptation, repris de [DEL,03]. Une adaptation rapide signifie un arrêt rapide du potentiel d'action (la série de petites lignes verticales en (a) après stimulation indiquée juste au-dessus). En (b), il faut noter que les champs récepteurs des afférents AR II et AL II sont de grandes tailles et ont des limites floues, contrairement aux afférents AR I et AL I. Source : [VAL,84][ROL,94].

Le sens tactile cutané active en effet une variété d'unités tactiles, chacune comprenant une fibre afférente et sa terminaison (présumée). Il y a quatre types de terminaisons différentes dans la peau glabre : les disques (ou cellules) de Merkel, les corpuscules de Meissner, les corpuscules de Ruffini et les corpuscules de Pacini. Les cellules de Merkel sont disposées en groupes dans la couche basale épidermique (couche la plus profonde de l'épiderme), au bout de petites éminences épidermiques se projetant dans le derme. Les corpuscules de Meissner sont des structures ovoïdes qui sont également localisés « en surface », immédiatement sous l'épiderme, dans les papilles dermiques. Les corpuscules de Ruffini sont des structures d'allure fuselée qui sont localisées plus profondément dans le derme. Enfin, les corpuscules de Pacini sont des structures multicouches en forme d'oignon suffisamment grandes pour être observables à l'œil nu. Elles se trouvent en profondeur du derme et dans l'hypoderme, tissu adipeux sous-cutané situé sous le derme.

De l'autre côté, quatre populations d'afférents tactiles ont été documentés dans la peau glabre de la main. Comme indiqué précédemment, elles sont nommées communément ALI (adaptation lente type I), ARI (adaptation rapide type I), ALII (adaptation lente type II) et ARII (adaptation rapide type II) [JON,06]. La densité d'innervation moyenne des quatre unités mécanorécepteurs-afférents est donnée dans la Figure 36, pour trois sites de la peau glabre sur la main : le bout du doigt, la première phalange du doigt et la paume. Chaque point y représente une seule unité sensorielle innervant la région cutanée.

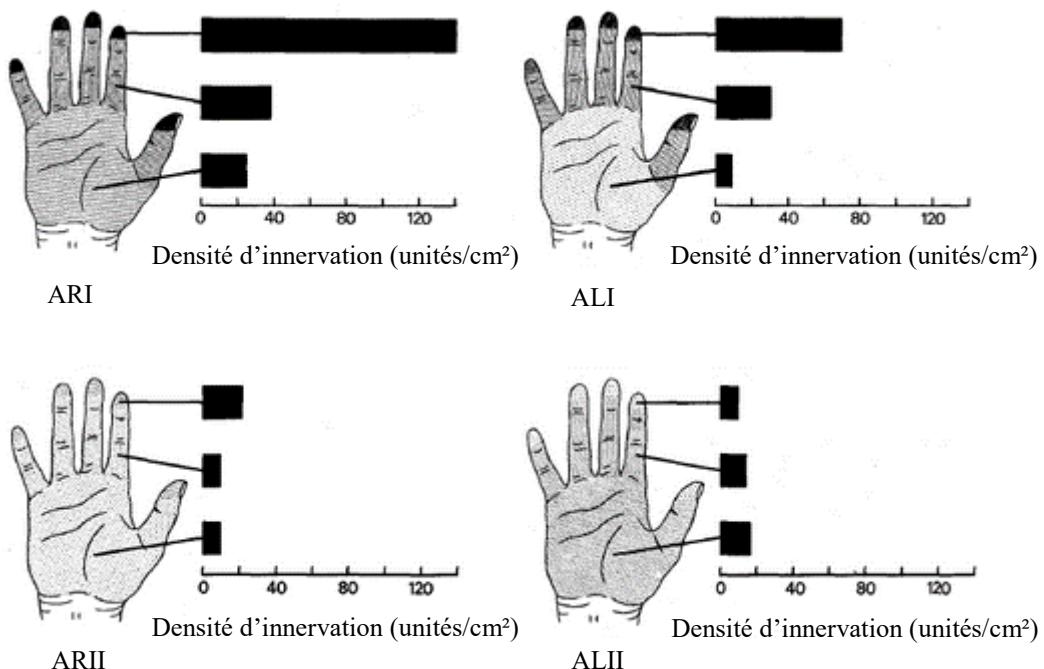


Figure 36: Densité moyenne des différents canaux afférents sur la main, repris de [VAL,84]

Pour compléter les informations données dans cette figure, il faut retourner à la Figure 35 et observer la partie (b), illustrant les tailles et positions des champs récepteurs des différents afférents. Les points noirs pour la partie gauche (A,B) correspondent aux champs récepteurs de 15 unités afférentes ARI (A) et 15 unités afférentes ALI (B). La plupart des champs sont circulaires ou ovales, et ils ont une taille entre  $3 \text{ mm}^2$  et  $50 \text{ mm}^2$ , correspondant à des aires circulaires de 2 à 8 mm de diamètre. Les zones sombres pour la partie droite (C,D) illustrent les champs récepteurs de deux unités afférentes ARII (C) et quatre unités afférentes ALII (D). Les points représentent les zones où la sensibilité est maximale.

Maintenant, il a été vu que chaque unité tactile associait une fibre afférente et une terminaison spécifique présumée. Les afférents ALI sont liés aux disques de Merkel, les afférents ARI aux corpuscules de Meissner, les afférents ALII aux corpuscules de Ruffini et les afférents ARII aux corpuscules de Pacini. Il existe un modèle dit des « canaux multiples » qui lie en un ensemble cohérent toutes ces structures anatomiques, provenant notamment des travaux de Bolanowski [BOL,88]. Cette idée est fondée sur l'hypothèse qu'il y aurait un ou plusieurs mécanismes propres à chaque canal, ces mécanismes étant définis par la manière spécifique avec laquelle est manipulée l'information obtenue de l'extérieur. Ces canaux ont un seuil qui leur est propre, c'est-à-dire la détection est particulière à un canal donné et est indépendante de la contribution des autres canaux. Ils répondent de façon sélective à certaines fréquences et permettent à l'individu d'étiqueter ces réponses.

Ainsi, les disques de Merkel, à l'origine des sensations de pression, répondent de façon optimale à des fréquences temporelles de stimulation vibrotactile de 0,4 à 3 Hz. Grâce à eux, l'humain est capable de discriminer des formes et des textures de façon très fine, comme des points, des crêtes, des barres, des coins et des courbures. Les corpuscules de Meissner, insensibles au contact statique, répondent à des déformations rapides, et plus particulièrement aux vibrations à basse fréquence issues du premier contact et des périodes de déplacement relatif entre la peau et l'objet en contact. Ils détectent des forces normales et surtout tangentialles, ainsi que les glissements et micro-glissemens entre la peau et l'objet, ce qui permet un contrôle précis lors de la prise de ce dernier. Ils sont sensibles à des fréquences allant de 3 à 100 Hz et créeraient quant à eux une impression de battement, à la manière des ailes d'un papillon (cette sensation peut être engendrée par une série de petites tapes sur la peau). Ensuite, les corpuscules de Ruffini contribuent à la perception de la direction du mouvement et de la force de l'objet sur la peau quand celui-ci produit un étirement de la peau. Couplés aux fuseaux neuromusculaires (des propriocepteurs, et éventuellement à leurs fibres afférentes associées), ces unités ALII jouent également un rôle important dans la perception de la configuration

spatiale de la main et de la position des doigts. Celles-ci sont sensibles à des fréquences entre 80 et 500 Hz (voire plus). Ils produiraient une sensation désagréable de bourdonnement (« *buzzing* » [JON,06] ou tintement [DEL,03]). Enfin, le canal associé aux corpuscules de Pacini est sensible à des fréquences entre 35 et 500 Hz et est spécialisé dans les impressions de vibration. Ces unités sont également très importantes pour détecter des événements distants, par exemple provenant d'objets tenus à la main (penser à la canne de l'aveugle). Elles sont également sensibles aux très hautes fréquences, de l'ordre de 10000 Hz, rapportées sous la forme d' « éclats » éphémères mais bien définis, pour la reconnaissance de textures à très petits détails en toucher actif [GEL,72]. Le Tableau 6 résumé toutes les différentes caractéristiques vues dans cette partie pour chacun des quatre canaux pour les mécanorécepteurs cutanés.

Type afférent	Terminaisons	Zone réceptrice	Fréquences d'activation	Sensibilité température	Sensation	Fonction
ALI	Disques de Merkel	Petite ( $\varnothing 2\text{-}3\text{mm}$ ) Limites nettes	0,4-3 Hz (Optimum : 0,4-1 Hz)	Légère	Pression	Pression locale, rugosité fine
ARI	Corpuscules de Meissner	Petite ( $\varnothing 3\text{-}5\text{mm}$ ) Limites nettes	3-100 Hz (Optimum : 25-40 Hz)	Légère	Battement*	Tact, vitesse
ALII	Corpuscules de Ruffini	Grande Limites floues	80-500 Hz (Optimum : 150-400 Hz)	Oui	Tintement*	Direction du mouvement et force (pression, étirements et cisaillements de la peau)
ARII	Corpuscules de Pacini	Grande Limites floues	35-500 Hz (Optimum : 250-300 Hz)	Oui	Vibration	Vibration, détection d'événements distants (retour haptique d'un objet)

\*[DEL,03]

Tableau 6 : Synthèse des quatre canaux liés à la mécanoréception [BOL,88][JON,06]

En résumé, les deux canaux associés aux disques de Merkel et aux corpuscules de Ruffini partagent la propriété d'être à adaptation lente, c'est-à-dire que tant que le stimulus est appliqué, une réponse nerveuse est maintenue. De l'autre côté, les canaux associés aux corpuscules de Meissner et aux corpuscules de Pacini sont à adaptation rapide, c'est-à-dire que la réponse revient à un niveau zéro même si la stimulation est maintenue. Ainsi, l'être humain est capable de percevoir des résolutions spatiales et temporelles. Ces informations peuvent être complétées grâce à la sensibilité proprioceptive, nommée kinesthésie.

#### 2.3.2.4) Kinesthésie

Pour se maintenir debout, l'humain doit nécessairement être bien renseigné sur l'état de tension musculaire ou articulaire de certaines parties de son corps. Dans le cas d'un transport, si celui-ci freine brusquement, les passagers peuvent se retrouver projetés vers l'avant et donc devenir déséquilibrés. Cependant, ils sont capables de reprendre leur équilibre, en modifiant éventuellement rapidement leur position, grâce au simple fait qu'ils peuvent détecter leur état de déséquilibre. Cela s'explique par le fait que le corps humain comporte une ensemble de structures qui permettent de rendre compte de son état, de manière à pouvoir rétablir son équilibre au besoin, ou, tout simplement, qui permettent à l'individu de connaître l'état de son corps afin de s'adapter à l'environnement. De manière générale, ces structures peuvent être appelées le sens de l'équilibre, ou également la kinesthésie. Celle-ci est constituée par les différentes sensations internes que procurent les mouvements des membres ou segments corporels (du grec *kinésis*, pour mouvement, et *aisthesis*, pour sensation) [DEL,03]. Un terme plus générique est parfois employé pour désigner la même chose : la « proprioception ».

De même que pour la sensibilité mécanique cutanée, les structures réceptrices de la kinesthésie sont des mécanorécepteurs, appelés plus spécifiquement propriocepteurs. Pour le cas de l'équilibre, les propriocepteurs sont disséminés dans plusieurs endroits du corps : ils se trouvent dans l'oreille interne (où est situé l'appareil vestibulaire, spécialisé sur l'orientation dans l'espace), les muscles, les tendons et les articulations. Cette distribution permet de renseigner le sujet sur la position des parties de son corps dans l'espace, ainsi que des forces exercées sur les différents segments corporels, permettant alors par exemple d'évaluer le poids d'un objet.

Il existe plusieurs récepteurs sensoriels kinesthésiques. Déjà, il s'avère que les corpuscules de Ruffini et les corpuscules de Pacini y jouent également un rôle. Par exemple, dans le cas de la peau pileuse, non abordée jusqu'ici, la population de récepteurs ALII (associée aux corpuscules de Ruffini) située sur le dos de la main permettrait de différencier les mouvements des différents doigts de la main [JON,06]. D'une manière générale, ces deux unités tactiles se retrouvent aussi au niveau des articulations, renseignant alors sur l'ouverture de celles-ci, ainsi que sur la vitesse, la direction et l'amplitude des mouvements articulaires. Maintenant, il existe deux autres types de propriocepteurs, les fuseaux neuromusculaires (FNM) au niveau des muscles et les organes neurotendineux au niveau des tendons, aussi appelés « récepteurs de Golgi » ou « appareils tendineux de Golgi » [DEL,03].

Pour bien comprendre ce qu'est un FNM, il faut savoir que les muscles sont constitués d'un ensemble de fibres musculaires. Autour d'environ une demi-douzaine de ces fibres, un

nerf vient s'enrouler pour former un des FNM d'un muscle donné (voir (a) de la Figure 37). Deux types de fibres sont présents dans un FNM : les fibres Ia, qui sont très sollicitées lorsque le muscle est étiré puis qui reviennent à un état de repos, et les fibres II, pour lesquelles l'activité dépend de l'étirement du muscle (plus le muscle est étiré, plus les potentiels d'action sont rapprochés). Le FNM est donc capable de renseigner le corps à la fois sur la position du muscle et sur son mouvement relatif. Parmi les différentes réponses que peuvent provoquer ces informations se trouve une activité réflexe, appelée « réflexe myotatique » (de « myo » signifiant « muscle »), qui sera évoquée un peu plus loin.

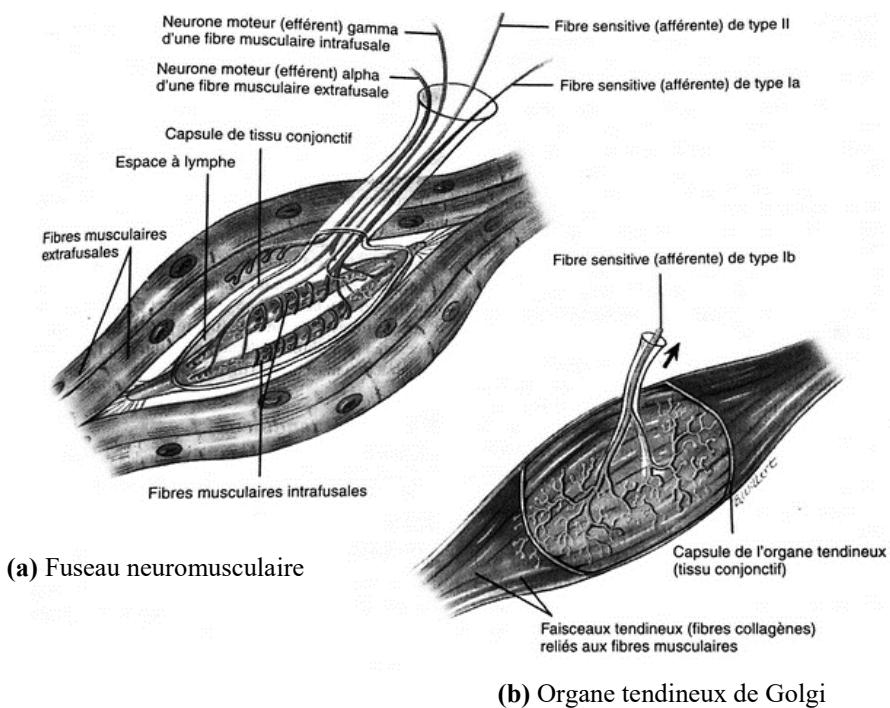


Figure 37 : Illustration d'un fuseau neuromusculaire (a) et d'un organe neurotendineux (b), repris de [DEL,03]

La densité des FNM dans un muscle donné, soit leur quantité pour un espace donné, augmente avec la précision de mouvement que doit atteindre ce muscle. Ce nombre peut atteindre jusqu'à la centaine pour un seul muscle. Ainsi, les muscles des mains sont très riches en FNM, malgré leur petite taille. De même, des groupes musculaires plus gros comptent davantage de FNM, mais leur densité est moindre, donc moins de précision dans le geste.

Aux extrémités des muscles se trouve une structure, les tendons, qui permet aux muscles d'être attachés aux os. Or, au niveau des tendons, plus précisément à la jonction musculotendineuse, un autre type de structure agit comme récepteur sensoriel : l'organe tendineux de Golgi (voir (b) de la Figure 37). Plutôt que de donner de l'information sur la longueur du muscle, comme le FNM, les appareils de Golgi sont des détecteurs de tension en

ce qu'ils informent sur le degré de tension musculaire. C'est par l'intermédiaire des afférences Ib que les influx nerveux engendrés par l'organe neurotendineux sont transmis au système nerveux central. L'excitation de ces récepteurs engendre aussi une activité réflexe, appelée réflexe d'inhibition (ou réflexe myotatique inverse).

Ces deux récepteurs kinesthésiques provoquent donc des réponses musculaires involontaires et stéréotypées, inconscientes et très rapides suite à une stimulation. Sans rentrer dans les détails, ces mécanismes réflexes sont fondamentaux pour le bon contrôle du corps. En effet, si quelqu'un ajoute soudainement une lourde charge dans la main du sujet alors que celui-ci a le bras tendu, il n'aura pas besoin de prendre conscience de la présence de cette nouvelle charge pour fournir l'effort musculaire additionnel nécessaire pour la supporter. La contraction du muscle activé (extenseur) corrige son étirement et le relâchement du muscle antagoniste (fléchisseur) permet la contraction et donc le mouvement induit par le muscle extenseur. Cette balance contraction/décontraction musculaire permet le mouvement réflexe et participe par exemple au maintien de la posture lorsqu'il s'agit des muscles antigravitairement.

Enfin, de même qu'il existe des interactions entre le toucher et la vision, il faut noter que la vision et la kinesthésie travaillent souvent ensemble. En effet, le sens de l'équilibre est polysensoriel, puisqu'il est plus difficile de conserver l'équilibre lorsque les yeux sont fermés. Le mécanisme de l'appareil vestibulaire, participant à la perception de la gravité, ne sera pas présenté dans cette étude.

En résumé, la somesthésie comprend la sensibilité extéroceptive, proprioceptive et la nociception. Concernant la perception des surfaces, plusieurs récepteurs sensoriels vont intervenir. Grâce au travail commun entre sens tactile et sens kinesthésique, le sujet va pouvoir percevoir plusieurs aspects caractéristiques des objets ou de l'interaction avec ces objets, comme la pression, le relief, les textures, les formes, mais également le poids, la dureté, etc. Cependant, les informations récoltées grâce au toucher passif peuvent être améliorées grandement grâce au mouvement volontaire, notamment de la main.

### 2.3.3) Le toucher « actif » : l'exploration haptique

Jusqu'ici, toutes les informations portaient sur le côté passif du toucher, c'est-à-dire sans mouvement volontaire de la part du sujet. Maintenant, dans la réalité, le toucher est souvent fondé sur une participation active du sujet dans son rapport à l'environnement. Le côté actif du toucher devient fondamental dans la reconnaissance et l'identification des objets. Celui-ci est possible grâce au système moteur, dont quelques notions seront évoquées par la suite. L'étude

étant plutôt axée sur la partie sensible que sur l'aspect moteur du toucher, sa description restera très succincte.

### 2.3.3.1) Système moteur

Les mouvements et la posture dépendent comme vu précédemment de la contraction coordonnée de muscles qui agissent sur les articulations. L'organe effecteur du mouvement est représenté par le muscle squelettique : il s'agit des muscles pouvant être contrôlés volontairement par le système nerveux central. De même qu'une unité sensorielle est constituée d'un récepteur sensoriel et d'une fibre afférente projetant l'information jusqu'au système nerveux central, il existe dans l'autre sens (efférent) des unités motrices constituées d'un motoneurone et des fibres musculaires qu'il innervé. La coordination des contractions musculaires dépend de l'importance et de la synchronisation des décharges des motoneurones sur certains muscles et de l'absence d'activité neuronale sur d'autres groupes musculaires.

Le contrôle moteur est en partie volontaire, mais il est réalisé par l'essentiel par des mécanismes réflexes et des mécanismes subconscients. Les mouvements volontaires sont souvent complexes et résultent plus d'un processus cognitif que d'une réponse à un stimulus externe.

Brièvement, les commandes motrices suivent cinq étapes. Avant que les commandes motrices ne soient envoyées aux centres d'exécution, celles-ci doivent être organisées au niveau cortical. La première étape est l'intégration sensorielle, où les données sensorielles relatives au milieu interne et externe vont être intégrées au sein du cortex pariétal postérieur, partie du cerveau jouant un rôle important dans le séquençage des mouvements volontaires, du raisonnement spatial et de l'attention. Ces informations sont dans un second temps transmises au cortex préfrontal, à l'aire motrice supplémentaire et aux aires prémotrices, où une planification de l'action motrice est réalisée. Ce plan moteur inclue les muscles qui doivent être contractés, la force et la séquence des contractions musculaires. La troisième étape consiste ensuite en la transmission de ce plan moteur par le cortex moteur primaire aux centres exécutifs de la moelle ou du tronc cérébral, via les voies motrices descendantes. La réalisation de l'action nécessite également un retour de l'information périphérique vers le cortex moteur via les voies sensorielles et le cortex somesthésique, ainsi que via les voies visuelles et le cortex occipital, analysant les informations venant de l'œil. Ces informations sensitives exercent alors un rétrocontrôle à chacun des étages du système moteur, afin de moduler le mouvement en cours d'exécution. En effet, celles-ci sont intégrées à tous les étages du système nerveux pour susciter des réponses motrices appropriées qui sont des réflexes simples dans la moelle spinale, des

réponses plus complexes dans le tronc cérébral et les réponses les plus élaborées dans le cerveau. Ensuite, les noyaux gris centraux (NGC) et le cervelet assurent dans un quatrième temps une modulation continue du plan moteur. Le but de cette modulation est de permettre que les mouvements volontaires soient correctement réalisés en termes de planification, initiation, coordination, guidage et arrêt du mouvement. Ces structures participent également à l'apprentissage et à la mémorisation des mouvements appris et des comportements complexes. Enfin, dans un cinquième et dernier temps, l'exécution du plan moteur est assurée par l'intermédiaire de boucles cortico-sous-corticales et cortico-cérébelleuses [SAU]. La Figure 38 illustre les différentes étapes de la motricité au niveau du cerveau.

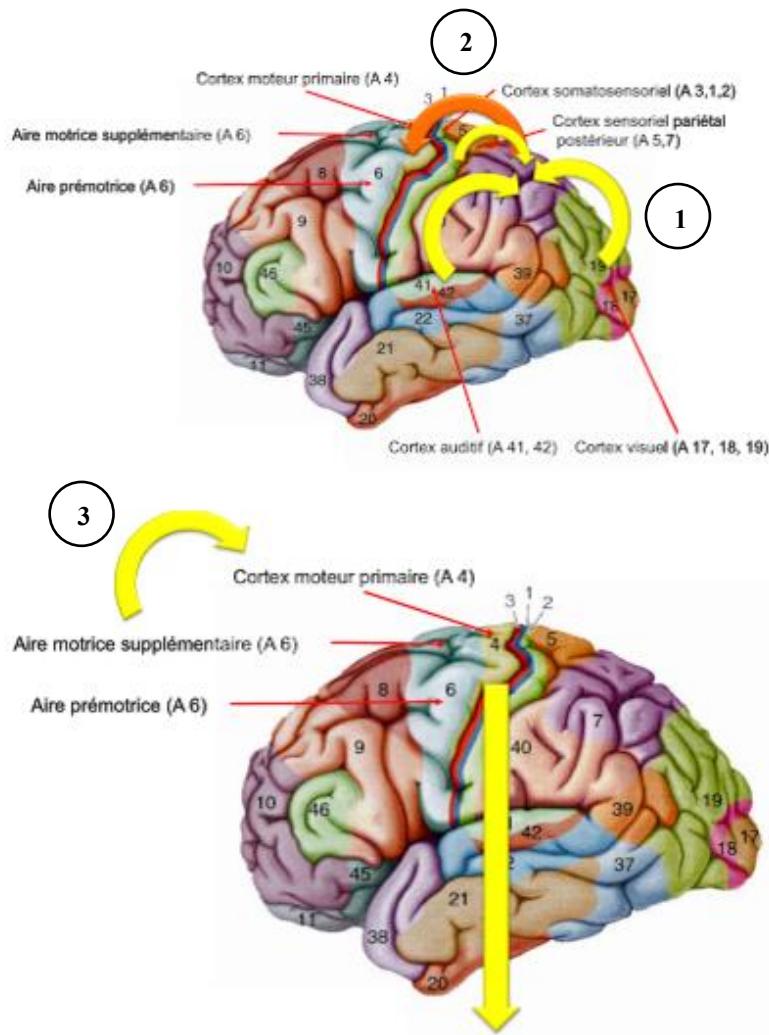


Figure 38 : Illustration au niveau cortical des étapes de la motricité : (1) Intégration sensorielle, (2) Planification de l'action motrice, (3) Transmission du plan moteur aux centres exécutifs, repris de [SAU]

La Figure 39 schématisé les relations des différentes structures nerveuses impliquées dans le mouvement corporel. Elle résume également les différentes étapes de l'action motrice.

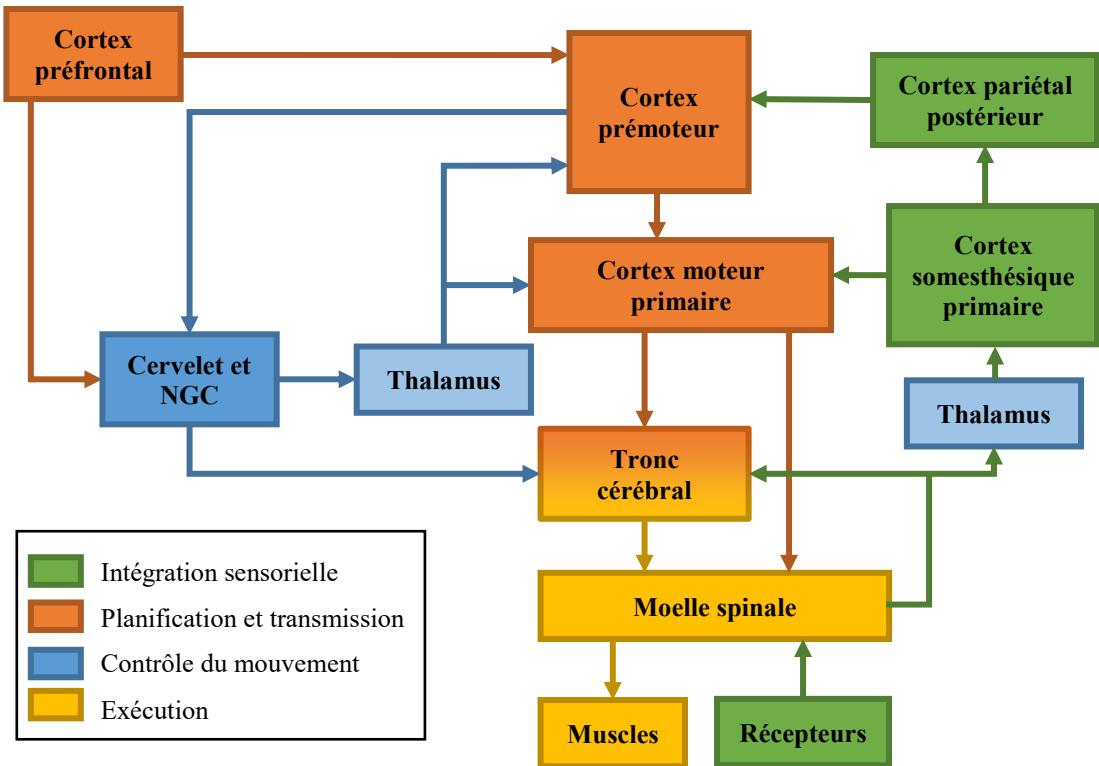


Figure 39 : Synthèse des relations des structures nerveuses impliquées dans le mouvement, repris de [SAU]

De même qu'il existe un homonculus sensitif, un homonculus moteur a été conçu par Penfield (voir Figure 40). Celui-ci représente l'organisation de la commande motrice des muscles du corps humain à la surface du cortex moteur, situé directement en face du cortex somatosensoriel dans le cerveau.

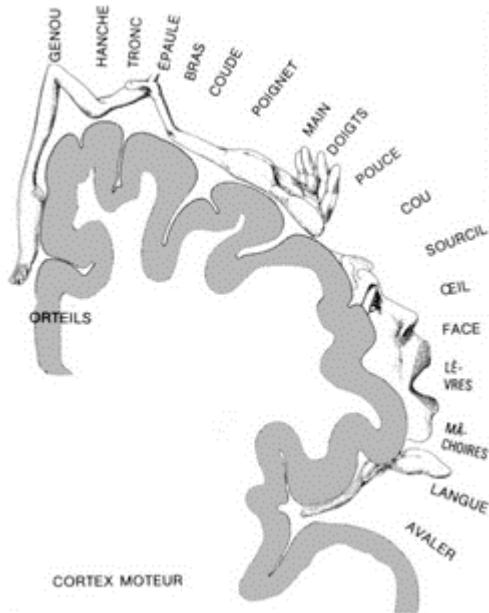


Figure 40: Homonculus moteur, repris de [TOR,06]

Chacune des régions correspond à un territoire corporel, et plus la région corticale est grande, plus la partie du corps considérée est complexe du point de vue de sa motricité. Ainsi, la surface correspondant à la main est très grande, surtout celle correspondant au pouce.

Maintenant que les parties sensibles et motrices du toucher ont été évoquées, la suite de cette partie va concerner la fusion des capacités de perception et d'action du système haptique, appelé l'exploration haptique.

### 2.3.3.2) Exploration haptique

L'exploration haptique concerne le mouvement volontaire et contrôlé de la main ou d'un autre membre corporel (par exemple la langue) en vue de reconnaître ou d'identifier les objets de l'environnement. Le sujet va coupler sa perception tactile à un mouvement exploratoire, appelé « procédure exploratoire », afin d'augmenter la précision de sa perception.

Un exemple : la capacité de détecter une toute petite protubérance au bout du doigt à l'aide du toucher passif (sans mouvement du sujet) requiert une dénivellation d'environ  $10\text{ }\mu\text{m}$ . Cette capacité à sentir une variation dans une surface, déjà très fine, est découpée grâce au toucher actif : dans ce cas, un changement de  $1\text{ }\mu\text{m}$  suffit à faire sentir une différence dans la surface [JOH,83]. Non seulement le toucher actif permet d'améliorer l'acuité tactile cutanée, mais il permet également d'identifier différentes formes beaucoup plus rapidement que ne le permet le toucher passif [HEL,84]. Il faut noter que l'utilisation des deux mains plutôt qu'une seule améliore également l'identification tactile.

Lederman et Klatzky ont noté les différentes procédures exploratoires utilisées par les gens pour identifier un objet [KLA,87]. A chaque propriété organoleptique sa stratégie exploratoire optimale : en effet, l'humain va identifier les différentes propriétés tactiles de l'objet, comme sa dureté ou sa forme, selon certaines stratégies bien distinctes. Les six stratégies principales sont illustrées dans la Figure 41. Pour reconnaître une texture, le sujet va effectuer un mouvement latéral sur la surface, consistant en un mouvement de va-et-vient. Le support sans préhension est le fait de soupeser un objet avec le bras ou le poignet, sans l'écraser, afin de déterminer son poids. Le contact statique consiste à faire reposer la main sur une surface externe afin d'en estimer la température. Pour évaluer la dureté d'un objet, le sujet va appliquer une force normale sur la surface de celui-ci. Ensuite, afin d'apprécier la forme globale et le volume d'un objet, le sujet va plutôt envelopper sa main autour de l'objet, maximisant la surface de contact (cette stratégie s'accompagne souvent d'un déplacement de l'objet entre les deux mains). Enfin, le suivi des contours consiste à effectuer un mouvement doux et continu des doigts le long du contour ou d'une partie de l'objet dans le but de déterminer sa forme exacte.

Il existe éventuellement deux autres stratégies, non représentées ici : le test de fonction, consistant à l'exécution de nombreux mouvements pour tester la fonction de l'objet, en plaçant la main ou un doigt dans un contenant, ou en faisant du bruit avec ; et une dernière stratégie, le test de mouvement partiel, où le sujet fait bouger une partie de l'objet tout en maintenant le reste stable [DEL,03].

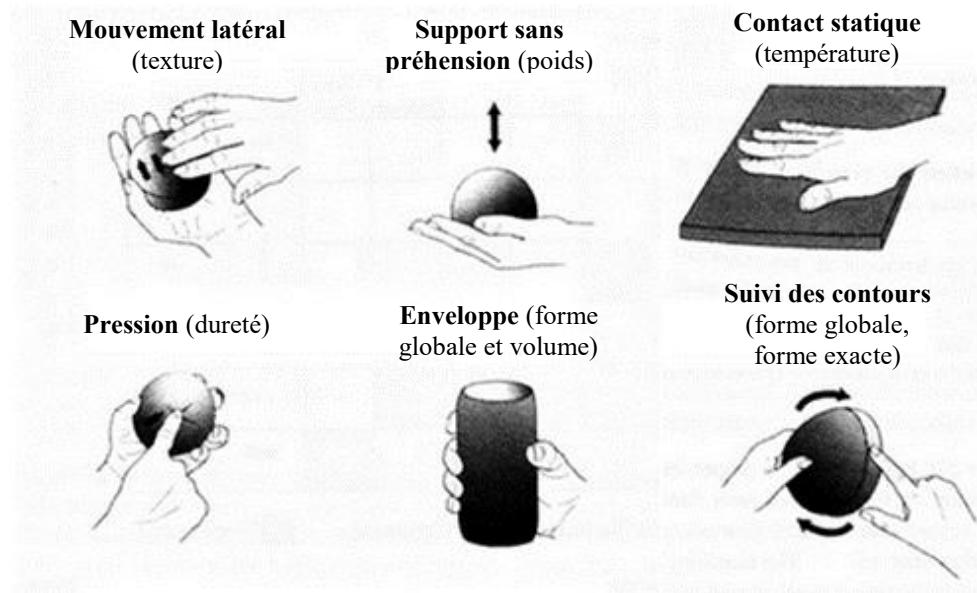


Figure 41 : Procédures exploratoires et propriétés évaluées par celles-ci, repris de [JON,06]

Dans le cas où la main n'a pas besoin de saisir ou de porter l'objet, certaines études ont permis de mesurer les forces de contact moyennes effectuées par la pulpe du doigt sur la surface de l'objet, suivant la propriété tactile qui a été demandé d'être évaluée. La Figure 42 recense ces valeurs.

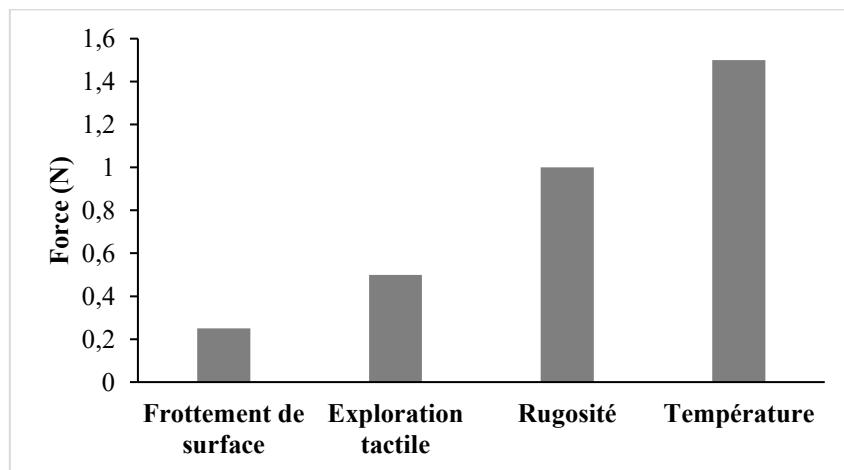


Figure 42 : Forces de contact moyennes mesurées au bout du doigt lors de l'évaluation des propriétés suivantes: frottement de surface, petite aspérité sur une surface lisse, rugosité et température, repris de [JON,06]

Lorsqu'il s'agit d'estimer la rugosité d'une surface présentant des aspérités, les sujets exercent sur celle-ci une force allant de 0,8 à 1,6 N, avec une moyenne de 1 N. Pour évaluer la température, les forces appliquées par le doigt orthogonalement à la surface varient entre 0,5 et 2 N, avec une moyenne de 1,5 N. Des forces plus minimes sont utilisées lorsqu'il est demandé à des personnes d'évaluer le frottement de surfaces macroscopiquement lisses et plates (entre 0,2 et 0,3 N) ou pour chercher une petite bosse sur une surface lisse (0,5 N) [JON,06].

Jusqu'ici, il a donc été vu que le système haptique était composé d'un système sensoriel, permettant de récolter des informations sur l'environnement tactile du sujet, et d'un système moteur, permettant d'améliorer les performances du système sensoriel. Dans cette perspective, le processus haptique peut alors être conçu comme la mise en œuvre de diverses fonctions haptiques, de haut niveau (fonctions cognitives) et de bas niveau (fonctions psychophysiques) [TOR,06].

De la même façon qu'il existe un traitement de l'information ascendant ou descendant (voir partie 2.2.1) Perception, représentation et cognition), l'exploration haptique peut être conduite soit « par le haut », soit « par le bas ». Si l'observateur souhaite rechercher une information tactile particulière sur un objet, l'opération va être descendante : les fonctions cognitives vont diriger les fonctions psychophysiques. Cependant, l'observateur peut être amené à explorer davantage une surface pour trouver d'autres informations qu'il ne cherchait pas dans un premier temps. Ce suivi des informations tactiles induites par l'exploration va alors donner lieu à une opération ascendante, du niveau bas au niveau haut. Les touchers actifs et passifs se complètent alors à travers des « boucles » d'action et de rétroaction, comme illustré dans la Figure 43.

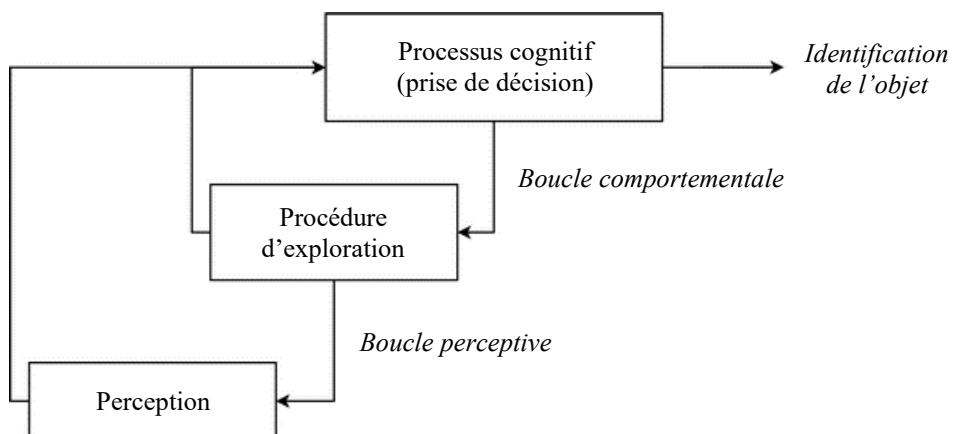


Figure 43 : Boucles rétroactives lors de l'exploration haptique, repris de [TOR,06], d'après [WAL,00]

Le toucher est bien évidemment aussi mobilisé lors de l'utilisation d'un objet (appelé alors « outil ») en vue d'accomplir une tâche nécessitant ce dernier. Dans ce cas, le toucher n'a

plus pour fonction principale l'identification des propriétés tactiles de l'objet, mais plutôt une fonction intermédiaire entre le sujet et l'action à effectuer. Un triplet émerge alors : l'opérateur, l'outil et la tâche [TOR,06]. De même que le sujet va adopter des stratégies exploratoires spécifiques pour identifier une propriété tactile précise d'un objet, il va adopter des stratégies de préhension adaptées à la tâche à accomplir et aux dimensions de l'objet.

### 2.3.3.3) Le toucher fonctionnel

Jones et Lederman rapportent qu'il y a eu de nombreux essais pour déterminer une classification des diverses dispositions que la main adopte pour effectuer différentes tâches [JON,06]. La plupart des taxonomies font une distinction entre deux modes de préhension dominants, la « prise puissante » et la « prise précise », qui peuvent prendre plusieurs formes suivant les dimensions de l'objet. La taxonomie classique est celle de Cutkosky et Howe, représentée en Figure 44 [CUT,90].

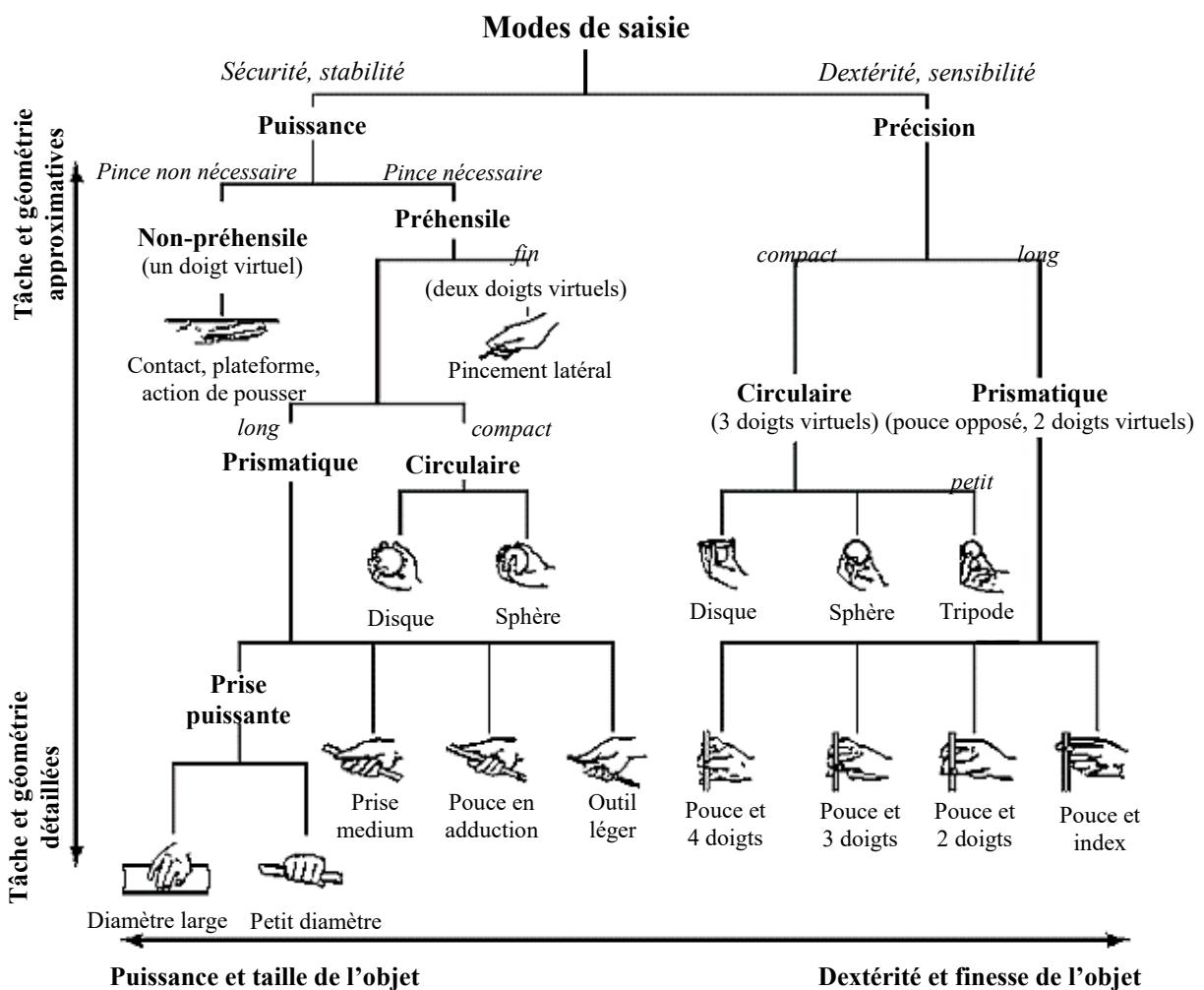


Figure 44 : Taxonomie des modes de saisie selon [CUT,90]

Lorsque la tâche requiert une prise puissante, comme par exemple se tenir à une barre de maintien dans un transport urbain, le mode de saisie utilisé sera du côté gauche de la Figure 44. Dans ce type de saisie, il y a généralement une large surface de contact entre l'objet saisi et les surfaces antérieures des doigts et de la main (la paume), mais très peu de mouvement des doigts. Ainsi, la prise est stable et très résistante au glissement. Lorsqu'il s'agit de manier un objet avec ce genre de prise, le mouvement prend la main entière, utilisant alors le poignet et le bras. De l'autre côté, lorsqu'une tâche requiert une prise précise, comme par exemple valider son ticket de transport, le mode de saisie sera du côté droit. Une telle préhension implique généralement les extrémités du pouce et de l'index, parfois du majeur, de façon à obtenir un contrôle précis de la position de l'objet et des forces de préhension. Les pinces les plus utilisées pour le mode précis sont la pince par opposition terminale ou subterminale (*tip pinch*, prise entre les extrémités des pulpes ou des faces palmaires du pouce et d'un autre doigt, souvent l'index) et la pince par opposition subtermino-latérale (*lateral pinch*, prise entre la face palmaire du pouce et la surface latérale de la deuxième ou troisième phalange de l'index). Ces deux pinces nécessitent seulement deux doigts, elles sont appelées pinces bi-digitales, mais la pince tri-digitale est également très courante, par exemple pour porter un aliment à la bouche ou dévisser une bouteille. Celle-ci implique le pouce, l'index et le majeur. La Figure 45 illustre les modes de saisie les plus communs.

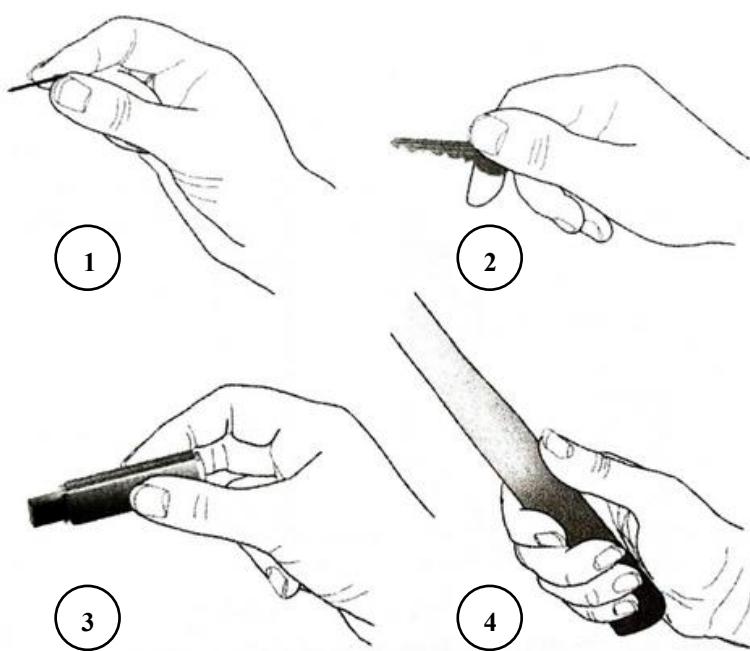


Figure 45 : Modes de préhension les plus communs. Sont représentées les pinces bi-digitales (1) *Tip pinch* et (2) *Lateral pinch*, la prise tri-digitale (3) *Palmar pinch* et la prise puissante (4) *Power grip*. Repris de [JON,06].

Une classification plus récente a été publiée par Feix *et al.* sous le nom de « GRASP Taxonomy ». Elle étend le nombre de modes de saisie à 33, selon le type d'opposition (parallèle à la paume de la main – pad opposition, perpendiculaire à la paume – palm opposition, et transverse – side opposition), le nombre de doigts virtuels assignés, le type de tâche (puissance, précision ou intermédiaire) et la position du pouce (abduction ou adduction du pouce) [FEI,11]. L'auteur admet cependant que le nombre général de configurations se réduit à 17 en ne considérant que les dimensions de l'objet, ce qui revient sensiblement à la même classification que celle présentée à l'instant.

Jusqu'ici ont été traitées trois grandes familles de toucher : le toucher passif, le toucher actif avec exploration haptique, et le toucher actif avec un but fonctionnel. Bassereau a proposé une classification de quatre types de toucher, suivant le niveau de conscience mobilisé par le sujet [BAS,97] :

- « Toucher neutre » : il s'agit du cas du toucher passif, lorsque le contact n'est pas vraiment choisi par le sujet. La conscience n'est pas mobilisée à ce stade. Typiquement, il s'agirait de la sensation provoquée par les vêtements sur la peau.
- « Toucher fonctionnel » : ici, le contact est associé à une action, dont le toucher de l'objet n'est pas le but final. Un exemple serait l'utilisation d'un téléphone ou l'ouverture d'une porte.
- « Toucher informatif » : il s'agit ici du cas de l'exploration haptique, lorsque le sujet entre en contact avec l'objet pour obtenir des informations sur celui-ci.
- « Toucher sensoriel » : il s'agit du toucher maîtrisé par le sujet, selon un geste précisément effectué (pression, vitesse, voire angles de contact contrôlés). Il se rapporte à un certain niveau d'expertise qui va être sollicité lors d'une évaluation sensorielle. Il existe plusieurs niveaux d'expertise, allant d'un niveau « naïf », interrogé pour des tests hédoniques ou consommateurs, jusqu'à un niveau « expert sensoriel », interrogé pour des tests descriptifs, comme le serait le « nez » en parfumerie pour la modalité olfactive.

Cette classification est notamment utile en évaluation sensorielle, afin de déterminer le type d'évaluation sensorielle approprié au contexte d'utilisation d'un objet particulier.

## Conclusion du chapitre 1

Ce premier chapitre a permis dans un premier temps de mieux cerner le contexte de la recherche, puis d'introduire le lecteur à la démarche de design sensoriel. La problématique de recherche a également était mise en place et a été divisée en deux axes. Dans un deuxième

temps, les principaux mécanismes du système perceptif humain ont été présentés, avec une partie spécialement consacrée au sens du toucher. Ces éléments vont permettre de comprendre comment les humains perçoivent leur environnement, et comment se crée le sentiment de confort.

Cette étude va donc s'intéresser aux aspects perçus des systèmes d'appuis présents dans les intérieurs des transports publics urbains, par les usagers. Il a été vu que le mécanisme de perception était très complexe et faisait intervenir tout un ensemble de fonctions sensorielles et cognitives qu'il est difficile d'évaluer directement. Il faut donc s'y prendre prudemment, à commencer par différencier sensation et perception. La première correspond à une réponse physiologique du corps à un stimulus physique, qui peut se définir par une intensité et une qualité, tandis que la seconde est une construction mentale, combinant les sensations avec des représentations.

Les deux axes de recherche vont interroger ces deux notions à travers deux approches. Le premier va explorer l'apport d'une nouvelle méthode instrumentale pour la mesure des propriétés tactiles liées au toucher tangentiel de surfaces. Ici, ce sont les sensations tactiles qui vont être au centre de l'intérêt, pour un contexte simplifié et spécifique : celui du doigt glissant sur une surface. L'hypothèse a été faite que le contact entre la pulpe du doigt et la surface touchée pouvait être assimilé à un tribosystème à contact surfacique. Le deuxième axe va quant à lui interroger la perception du confort lors d'un déplacement dans un véhicule de transport public urbain. Il s'agit ici de proposer un cadre d'étude afin de mieux comprendre les différents facteurs intervenant dans cette perception et ainsi d'aider à la conception de nouveaux appuis, voire de systèmes de transports, plus confortables.

# Chapitre 2 : Exploration pour la mesure de la perception tactile : évaluation du toucher tangentiel d'une surface

## Introduction

Les données anthropométriques utilisées aujourd’hui pour dimensionner les différents éléments d’appuis à l’intérieur du matériel roulant ne suffisent pas à représenter les utilisateurs d’un point de vue de leur perception. En effet, la variable humaine ne peut se limiter à un dimensionnement normé, les passagers ont des attentes en termes de confort, qu’ils interrogent à travers leurs sens. La question est alors de savoir comment intégrer ces attentes, ces sensations, dans le cahier des charges en vue d’une conception souhaitant maîtriser les aspects perceptifs du produit. Pour cela, différentes approches sont envisageables. L’approche sensorielle introduite dans le premier chapitre s’accompagne d’outils objectifs mettant l’humain au centre de la mesure, décrits dans les normes AFNOR V09 [AFN,07] ou encore dans le manuel méthodologique de Depledt [DEP,09]. Ils interviennent à tous les niveaux de vie du produit, de la phase d’idéation à celle de la production [BA1,09]. Pour cette dernière phase, qui est finalement le contrôle qualité en suivi de production et de distribution, l’évaluation sensorielle peut se heurter à ses propres limites. En effet, lorsqu’il s’agit d’une grande cadence de production, la durée de mise en place de ces outils peut vite devenir dépassée, et les coûts financiers peuvent vite grimper. L’entraînement des panels experts, seuls qualifiés pour valider l’homologation, se déroule sur plusieurs mois : ils doivent être en quelque sorte « étalonnés » sur l’espace produits qui leur est présenté, afin d’apprendre à décrire leurs ressentis de façon objective et répétable. De plus, l’évaluation sensorielle en elle-même exige un certain temps, et mobilise un certain nombre d’experts pour un nombre de produits limités. Ainsi, dans ce genre de situation, il convient de se tourner vers une autre méthode, instrumentale, qui peut pallier ces limitations. L’objectif de ce chapitre est alors de développer une procédure instrumentale permettant d’évaluer les sensations procurées par un objet.

En considérant que la modalité tactile est la plus pertinente à interroger lorsqu’il s’agit de concevoir un appui, il a fallu trouver une discipline adaptée à son étude. La tribologie se prête plutôt bien à cet exercice. Cette branche du génie mécanique et des sciences des matériaux s’intéresse à l’étude des phénomènes susceptibles de se produire lorsque deux corps en contact sont animés de mouvements relatifs. Elle se fonde sur les essais tribologiques ou la tribométrie,

qui se définit comme l'ensemble des technologies permettant de mesurer le comportement tribologique d'un système en frottement. Ce dernier est appelé système tribologique (ou tribosystème) et est composé de quatre éléments : un premier corps entrant en contact avec un deuxième corps, à travers un troisième corps, dans un environnement spécifique (typiquement l'antagoniste lié à un capteur, le matériau testé et le lubrifiant, le tout dans un contexte d'interaction maîtrisé) [YMC,11]. Le troisième corps peut être introduit (ex. lubrifiant) ou être généré selon les conditions du tribosystème (ex. débris d'usure). Quelques essais présents dans la littérature ont pour sujet la recherche de corrélations entre des sensations tactiles et des mesures physiques. Les angles d'approche sont souvent différents, car les champs d'application de la tribologie sont nombreux et les problématiques rencontrées peuvent être très différentes : diagnostic médical [YMC,01], influence de l'âge et du sexe sur la sensation du toucher [ABD,17], développement de crèmes cosmétiques [GIL,12], de pièces automobiles [CRO,02], perception sensorielle et affective du packaging [CHE,09]... Malgré cette multiplicité de recherches, il subsiste à ce jour des difficultés dans la caractérisation instrumentale du toucher tangentiel [CRO,04].

Ce deuxième chapitre propose de développer un axe de recherche entrepris en collaboration avec l'équipe du laboratoire de tribologie du Centre technique des industries mécaniques (CETIM) de Senlis. Il s'agit d'explorer les corrélations éventuelles entre les résultats obtenus via un tribomètre développé au CETIM et ceux obtenus à travers une évaluation sensorielle, pour un groupe d'échantillons rappelant les matériaux trouvés dans le compartiment voyageurs d'un matériel roulant urbain. L'objectif final est de valider l'apport d'une approche tribologique sur la caractérisation de la perception tactile pour les surfaces d'appuis situés à l'intérieur d'un matériel roulant urbain. L'utilisation de la tribologie pour l'évaluation de propriétés sensorielles a été nommée « tribologie sensorielle ».

La première partie de ce chapitre présente la première étude qui a été réalisée, dont le but était de valider les performances du tribomètre utilisé. Après des essais sur 14 avant-bras, des premiers résultats ont montré que l'outil permettait une différenciation des surfaces testées observables à travers les frictiogrammes obtenus. Un groupe de 43 échantillons a été constitué, puis a fait l'objet d'une épreuve de classement selon trois descripteurs tactiles (lisse, accrochant et adhérent). Ces résultats ont ensuite été mis en relation avec une campagne d'essais tribologiques sur ces mêmes échantillons grâce à une matrice de corrélations de Pearson et une analyse en composantes principales (ACP). Là encore, l'outil a pu mettre en avant une certaine différenciation des surfaces, appartenant à différentes familles de matériaux (tissus, aciers, polymères thermoplastiques...), mais n'a pas permis d'observer de corrélations avec les

données sensorielles. Cette différenciation a voulu être approfondie dans une deuxième campagne d'essais exploratoire, introduite dans la deuxième partie du chapitre. Certaines améliorations ont été effectuées au niveau du protocole expérimental, et un nouveau groupe d'échantillons a été constitué, afin cette fois de se concentrer sur des surfaces plus proches du point de vue tactile. Un nouveau type d'évaluation sensorielle a été mis en place : le napping. De même, les résultats de ce dernier et ceux des essais instrumentaux ont été mis en relation à l'aide d'une analyse factorielle multiple (AFM).

### 3) Exploration du lien éventuel entre tribologie et sensoriel : développement du « tribomètre sensoriel »

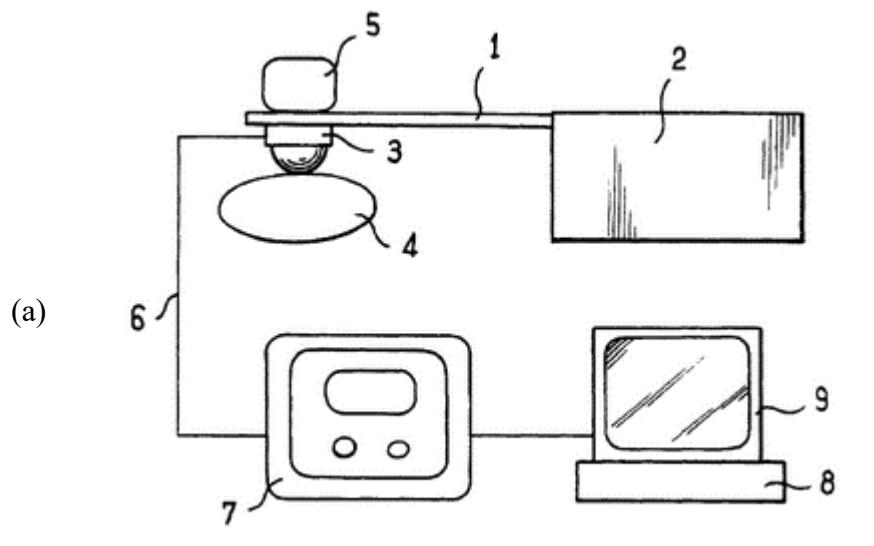
Le toucher est un sens très complexe à instrumenter : il ne possède pas d'organe propre à sa perception, toute l'enveloppe corporelle humaine est habitée d'un réseau incroyable de corpuscules et de mécanorécepteurs en lien direct avec le réseau neuronal, qu'il est impossible de reproduire avec précision à l'heure actuelle. Michel Malherbe, reprenant Aristote, affirme que « le toucher est à la fois le sens le plus intime, le plus vécu, si l'on veut, et le plus ouvert. [...] La sensation est toucher » [MAL,13]. Toucher une surface, c'est donc la ressentir, la percevoir intimement. Est-il seulement possible de mesurer un toucher ? Il a été vu dans le premier chapitre que l'approche anthropocentrique s'accompagne de nombreux outils de métrologie sensorielle qui permettent d'évaluer au moyen notamment d'évaluations sensorielles certaines sensations procurées par un objet.

Aujourd'hui, la mesure des sensations perçues par l'évaluation sensorielle est effectuée grâce à un panel sensoriel expert, un groupe d'individus formés et entraînés sur plusieurs mois à objectiver leurs ressentis à travers différentes modalités sensorielles (la vue, le toucher, l'olfaction, le goût...) et plus précisément sur un recueil défini de qualificatifs propres à chaque modalité (communément appelés grandeurs ou descripteurs sensoriels). Elle participe à différentes étapes lors de la conception de produits, comme vu précédemment, en tant qu'aide aux choix de conception, en phase de développement pour valider les aspects perçus et également en phase de production pour valider la qualité de conformité du produit sur les sensations recherchées. Il existe bien sûr des avantages mais également des inconvénients à ce genre d'évaluation, notamment sur des aspects de temps et de coûts de mise en place [GIB,00]. Par exemple, lors de la phase de contrôle de la qualité de production, où la cadence peut s'avérer trop importante pour une évaluation par un groupe d'experts, une méthode instrumentale est souvent recherchée pour pallier cette limite.

L'objectif de l'étude en deux temps présentée dans ce chapitre est alors de déterminer s'il est possible au moyen d'un instrument de mesure spécifique d'évaluer des propriétés organoleptiques d'un matériau, voire d'évaluer ses propriétés de confort. Comme indiqué précédemment, le choix s'est porté sur l'outil tribologique afin d'explorer dans un premier temps les corrélations éventuelles entre mesures instrumentales de frottement et la perception en toucher tangentiel d'une surface. L'étude préliminaire présentée ici propose tout d'abord de valider l'apport d'une approche tribologique sur la caractérisation instrumentale de la perception tactile, à travers une première série de trois descripteurs sensoriels : adhérent, accrochant et lisse.

### 3.1) Matériel et méthodologie

Le tribomètre utilisé pour cette recherche a été développé par le Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM) à la fin des années quatre-vingt-dix. Il répondait à la demande d'un dermatologue de l'hôpital Saint Louis à Paris qui souhaitait développer une méthode objective pour examiner un type de maladie cutanée ne pouvant être diagnostiquée que par le toucher. Ce toucher consiste en un mouvement exploratoire du doigt sur l'avant-bras du patient. L'appareil avait à l'époque permis de différencier les patients sains et malades, mais aussi les peaux jeunes et plus âgées, ou féminines et masculines. L'appareil et la méthode ont fait l'objet d'un brevet en 2001 [YMC,01]. La Figure 46 présente le principe de fonctionnement du tribomètre ainsi qu'un exemple de tribographe obtenu durant des essais sur un sujet. Le contact est de type surfacique (plan/plan) : le pion du tribomètre étant en réalité très légèrement bombé, il sera plutôt assimilé à un plan. Le détail du protocole instrumental est donné par la suite.



1 : Bras de mesure  
 2 : Support  
 3 : Capteur  
 4 : Avant-bras du sujet  
 5 : Charge ajustable  
 6 : Câblage  
 7 : Amplificateur de signal  
 8 + 9 : Système d'acquisition (oscilloscope)

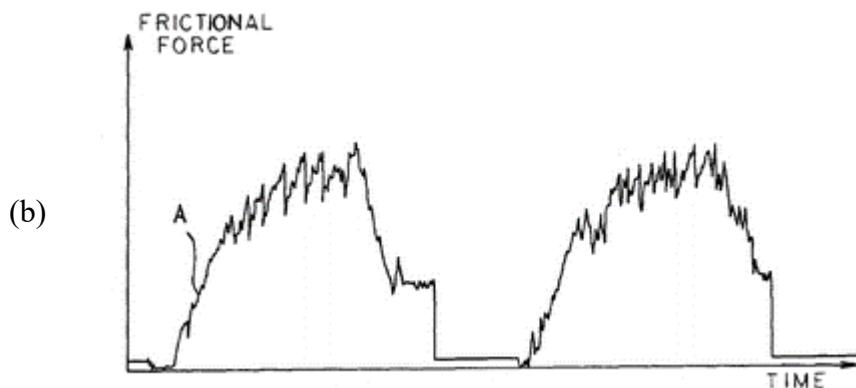


Figure 46 : (a) Principe de fonctionnement du tribomètre utilisé ; (b) exemple de tribographie obtenu suite à deux essais consécutifs sur un sujet, repris de [YMC,01]

Ce tribomètre, dans sa conception, a donc pour objectif de simuler le toucher du dermatologue pour diagnostiquer de façon non-intrusive et suffisamment précise la peau du patient par rapport à la pathologie recherchée, la zone caractérisée de l'avant-bras devenant le matériau testé. Le même concept peut s'appliquer à cette recherche dans le contexte du transport public, où le « doigt » instrumental va être utilisé pour caractériser des matériaux pouvant se retrouver dans les appuis de l'habitacle. Une étude préliminaire a d'abord été mise en place pour valider le montage du tribomètre et confirmer sa sensibilité vis-à-vis des différentes textures. Les résultats des tests préliminaires ne seront décrits que très brièvement, car ils ne sont pas l'objet principal de l'étude.

### 3.1.1) Étude préliminaire : protocole instrumental

Le montage présenté par la suite est le même qui a été utilisé pour tous les essais de l'étude. Ils ont été réalisés dans une salle à atmosphère contrôlée, où la température ambiante était de 22°C et le degré hygrométrique de 50%. Le tribomètre est composé d'un patin de glissement muni d'un capteur de mesure d'effort piézoélectrique tridirectionnel (type Kistler 9251A) et d'un bras articulé relié à une platine micrométrique, dont le déplacement linéaire est actionné par un moteur pas à pas commandé par un bloc de puissance programmable, permettant de régler la vitesse et la distance parcourue. Le capteur d'effort est disposé le plus près possible de la zone de contact et est soumis à une précontrainte nécessaire à la mesure de l'effort de cisaillement dans l'axe tangentiel. Le coefficient de frottement entre le patin et la surface à caractériser est déterminé à partir de la force normale et de la force tangentielle dans le sens du déplacement, mesurées par le capteur piézoélectrique qui délivre des charges électriques (picocoulomb/Newton) transformées en tensions (Volt/Newton) proportionnelles aux forces par l'intermédiaire d'amplificateurs de charge (type Kistler 5011 et 5015). Ces tensions sont ensuite numérisées par un système d'acquisition (type Yokokawa DL750) et le traitement des signaux est finalement effectué à l'aide des logiciels Microsoft Excel et Matlab.

Le geste que souhaite simuler le « tribomètre sensoriel » correspond initialement au geste associé à l'examen médical effectué par le dermatologue. Dans la littérature, il est indiqué que la pulpe du doigt exerce une force normale entre 0,2 et 2 N lors d'une exploration tactile, suivant la propriété organoleptique qui cherche à être évaluée [JON,06]. Ici, la charge normale appliquée sur le patin de glissement a été fixée à 1,5 N ( $\pm 0,5$  N) grâce à une petite masse. La commande du moteur pas à pas est réglée pour un déplacement de la table micrométrique de 10 mm en 36 s. Ce paramètre a été choisi par consensus entre l'équipe du CETIM chargée du développement du système et le dermatologue. Elle correspond à un déplacement plus lent que le geste médical mais fournit un signal plus riche en informations. Enfin, un tissu est collé sur l'extrémité hémisphérique du patin : il a été choisi parmi plusieurs autres matériaux en raison de sa ressemblance au niveau du comportement mécanique avec la peau. Le même tissu a été utilisé pour toute l'étude. Le détail de son état de surface est présenté dans la Figure 47 ci-après. Il s'agit plus précisément d'un tissu autocollant composé de fibres synthétiques tissées simplement en armure toile (alternance des fils pairs et impairs de la chaîne pour laisser passer les fils de trame). Le brevet indique par ailleurs qu'un tel matériau tissé a l'avantage de présenter une très faible différence entre le coefficient de frottement statique et le coefficient de frottement dynamique [YMC,01].

Afin de valider le montage du système, une première série d'essais préliminaires a été effectuée sur la peau de 13 volontaires, dans le but de retrouver dans un premier temps les résultats annoncés par les concepteurs du tribomètre. Trois mesures ont été effectuées pour chaque participant. 8 hommes et 5 femmes ont pris part aux essais, âgés de 24 à 60 ans. Le patin de glissement est posé manuellement sur la face antérieure de l'avant-bras, où la pilosité est la moins importante (voir Figure 48). Le déplacement étant très limité, la surface de la peau a été considérée comme homogène dans la zone testée. N'ayant pas de système d'attache pour rendre l'avant-bras fixe, il a été demandé aux volontaires de ne pas bouger, en respirant normalement.

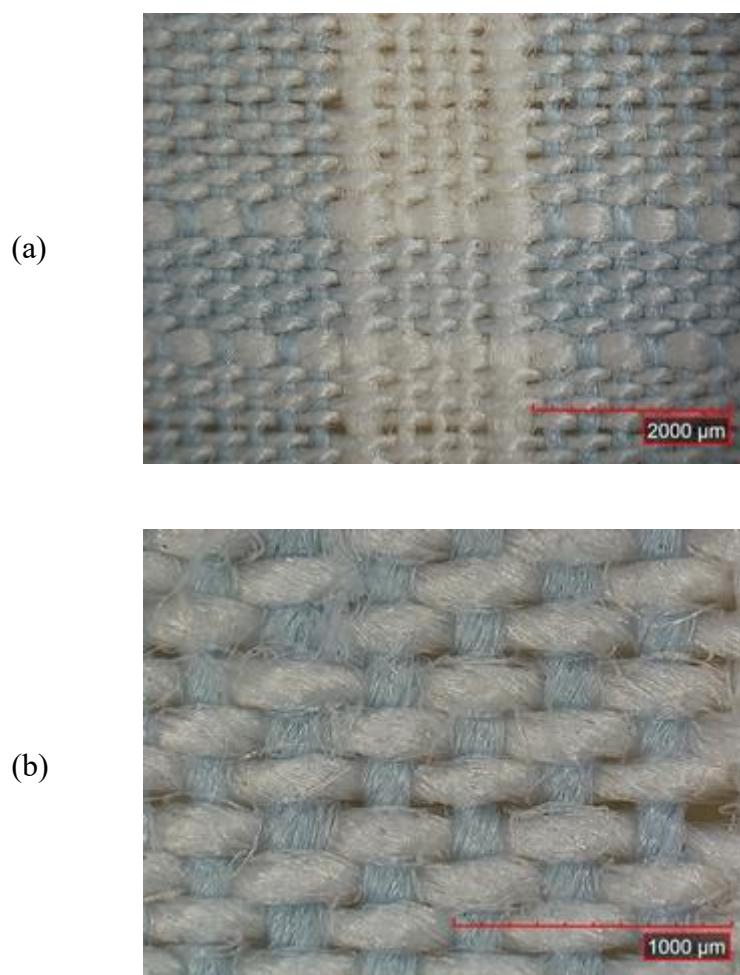


Figure 47 : Détail de l'état de surface du tissu utilisé comme interface entre le patin et la surface à caractériser, à une échelle de (a) 2000μm et (b) 1000μm (images obtenues par microscope numérique)



Figure 48 : Essai tribologique sur un avant-bras

Une fois tous les essais enregistrés via le système d'acquisition, les signaux ont été traités grâce au logiciel Matlab. La Figure 50 donne à titre indicatif le graphe comparatif du coefficient de frottement en fonction des différentes peaux caractérisées. Il est possible d'y observer des coefficients bien distincts ainsi qu'un grand écart-type pour certains sujets, cela étant dû aux mouvements plus ou moins importants de l'avant-bras lors de la mesure.

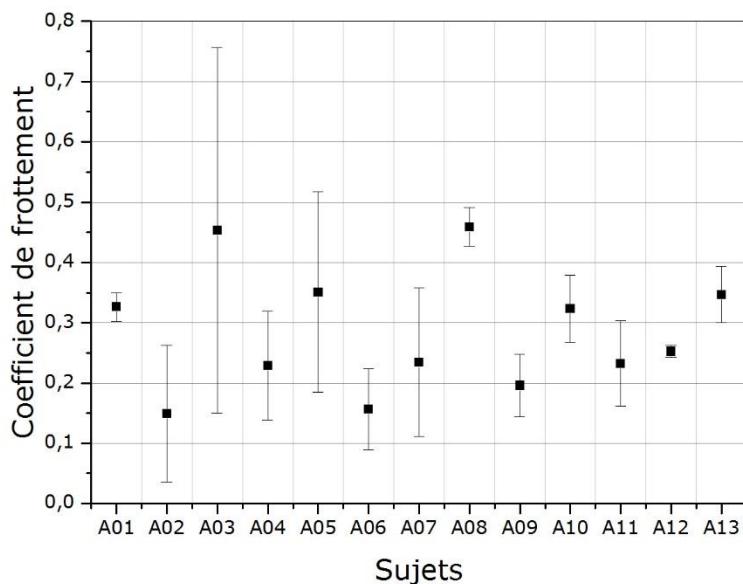


Figure 49 : Graphe comparatif du coefficient de frottement en fonction des peaux caractérisées

Les résultats étaient bien en accord avec ce que le brevet annonçait, à savoir une différenciation des surfaces et un signal caractéristique pour chaque individu (voir partie résultats). Le montage ainsi validé, l'étude sur les échantillons a pu être effectuée. Avant de passer à la phase de test, la question de la construction de l'espace produits a dû se poser.

### 3.1.2) Construction de l'espace produits : choix des échantillons

L'objectif de cette étude étant d'explorer l'éventuelle complémentarité entre la tribologie et l'évaluation sensorielle, il faut travailler sur un même cadre de référence : l'espace produits. Le choix des objets qui constitueront l'espace produits est essentiel car il faut chercher à être le plus représentatif du processus de perception. Ici, l'intérêt est porté sur les différents appuis ou supports que les passagers sont susceptibles de rencontrer dans l'espace intérieur des transports publics urbains. Il faut donc chercher à avoir un espace produits le plus exhaustif possible, qu'il puisse être représentatif des zones de contact actuelles, mais aussi plus anciennes et possiblement futures des matériels de transport. Sa construction repose sur un concept de similarité et d'appartenance, où trois critères interviennent : fonctionnel (les objets possèdent une fonction similaire), sémantique (les objets appartiennent à une même famille d'objets) et morphologique (les objets ont une forme similaire) [BA2,09].

Dans l'habitacle d'un transport public urbain, il est possible de catégoriser les différents appuis en quatre familles : ce qui peut être saisi avec la main ou une autre partie du membre supérieur (ex. barres d'appui, poignées de maintien), ce qui est en contact passif avec le corps en position assise (ex. composants du siège), ce qui est en contact passif avec le corps en position non-assise (comprenant la position debout et « assis-debout », ex. parois, appuis ischiatiques, bord de strapontins) et ce qui est en contact avec les pieds (ex. sols). La Figure 50 illustre ces différentes catégories à travers l'exemple de l'habitacle du tramway de Tours. Ces appuis vont varier selon l'époque, le pays ou encore le modèle du véhicule, en nature de formes, de textures, de surfaces, de matériaux ou encore d'interactions avec le voyageur. La Figure 11 présentant dans le chapitre précédent les différents styles d'intérieurs dans le tramway de Berlin montrait déjà ces variations. De toute évidence, l'espace produits à construire pour rassembler tous les différents types d'appui ayant existé et potentiellement imaginables pour l'avenir, dans toutes leurs variations possibles, devient très vite gigantesque. Dans les limites de cette recherche, cet espace produits ne peut pas être construit dans son idéal théorique car il demanderait des ressources qui ne sont pas accessibles. Ainsi, pour le bien de cette exploration, seul un groupement d'échantillons réduit a été constitué, en tâchant de représenter au mieux les différents types de matériaux rencontrés dans un transport public urbain. Les surfaces d'appui ne sont alors pas représentées avec les « vrais » objets dans une situation écologique, avec leurs variations de formes ou de dimensions. Pour des raisons de moyens et de temps, l'étude va se concentrer plutôt sur une interaction simplifiée entre le doigt du passager et un recueil limité de matériaux utilisés pour les appuis.

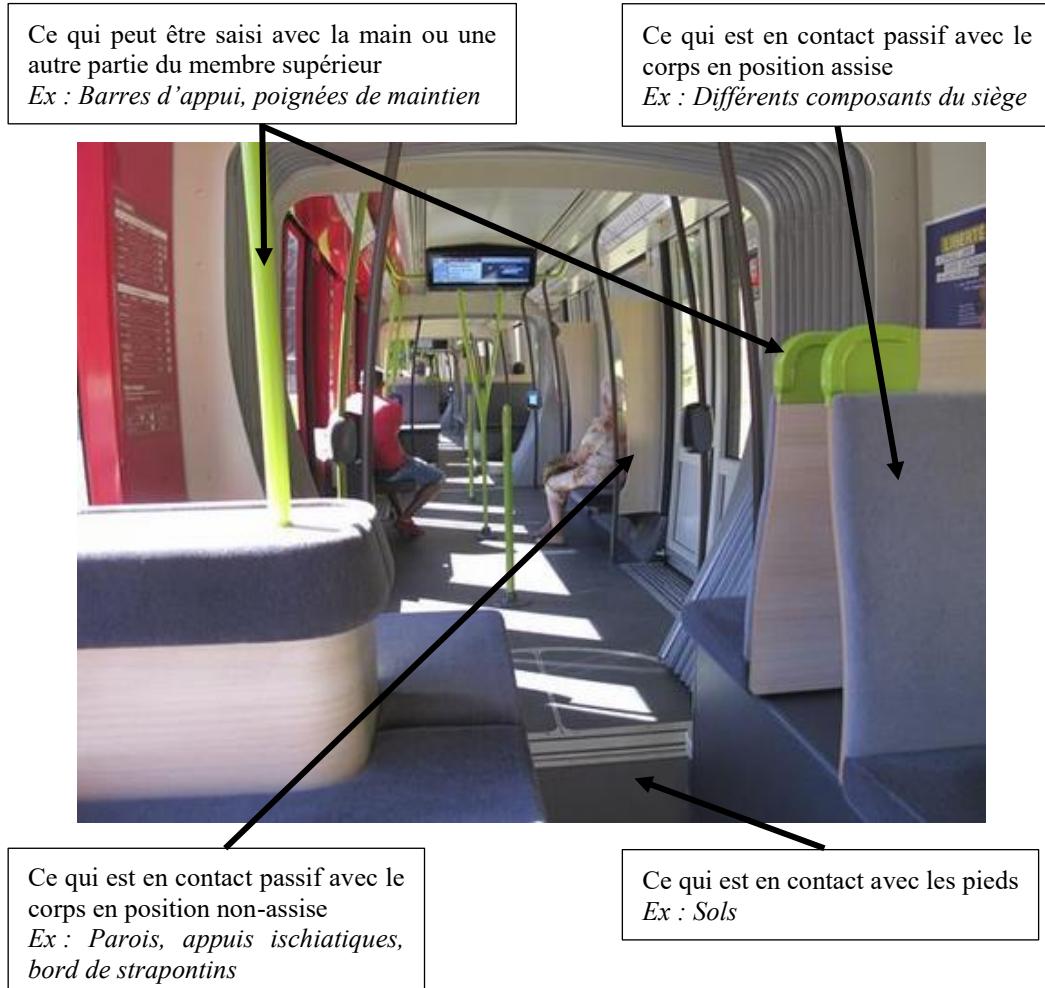


Figure 50: Illustration des différentes catégories d'appui recensées dans un transport public urbain (exemple du tramway de Tours)

Pour cette première campagne de mesure, 43 échantillons ont été choisis parmi des matériaux utilisés dans le domaine du transport. Ils comptent 7 polymères thermoplastiques à base de polypropylène, 5 polyamides type PA6, 8 tissus, 5 peintures époxy sur plaque en aluminium, une plaque de verre, 4 aciers inoxydables, 8 élastomères, 3 stratifiés et 2 composites à matrice organique et à renfort de verre. Ils possèdent tous une dimension suffisante pour les mesures et sont tous plans, à l'exception des 5 polyamides présentant une surface légèrement bombée, et 2 aciers inoxydables sous forme de tubes, dont la mesure a été réalisée sur l'axe longitudinal. Les échantillons sont présentés dans l'annexe A, selon les libellés qui leur ont été attribués lors des essais. Ils ont été prêtés pour la durée de l'étude par l'agence RCP Design Global, le CETIM et l'entreprise Eurostar Engineering Plastics.

### 3.1.3) Choix de la famille de sensations et protocole d'évaluation

Une fois le groupement d'échantillons effectué, il convient de s'interroger sur les sensations à évaluer. Ici, l'étude s'intéresse à un geste d'exploration tactile, au mouvement du premier contact entre le doigt et la surface de la matière constituant l'appui. L'intérêt est donc porté sur la modalité tactile. En raison des différentes contraintes liées à cette première exploration, il n'a pas été fait appel à un panel sensoriel pour définir les descripteurs tactiles, leurs définitions et leurs protocoles d'évaluation. Le choix des descripteurs a été fait en toute hypothèse pour cette expérience en s'aidant du dictionnaire des mots du sensoriel [BAS,11]. L'hypothèse a été faite que les sensations dues au caractère accrochant, adhérent et lisse d'une surface sont de nature mécanique et liées d'une certaine manière au frottement entre la peau et la matière, ce qui correspond aussi à ce que le tribomètre peut mesurer. Ce sont donc ces trois qualificatifs qui ont été choisis pour cette première exploration.

La pré-caractérisation sensorielle des échantillons a été effectuée via un tri simple réalisé par consensus d'un panel de trois sujets qualifiés, avec les yeux non bandés, dans une salle à atmosphère contrôlée. Pour chaque descripteur, les sujets devaient classer les 43 échantillons sur une échelle d'intensité relative à l'espace produits. Il était possible d'avoir des ex-aequo. Le Tableau 7 reprend la définition des descripteurs ainsi que les protocoles d'évaluation utilisés, comme indiqués dans le dictionnaire des mots du sensoriel [BAS,11].

	Définition	Protocole d'évaluation
<b>Accrochant</b>	Qui retient le doigt lors d'un mouvement parallèle à la surface	Déplacer le doigt parallèlement à la surface. Contrôler la vitesse et la pression.
<b>Adhérent</b>	Qui retient le doigt lors d'un mouvement perpendiculaire à la surface, suite à une mise en pression	Appliquer le doigt perpendiculairement à la surface et le retirer verticalement
<b>Lisse</b>	Qui présente un état de surface sans relief	Déplacer le doigt parallèlement à la surface, explorer tactilement

Tableau 7 : Définitions et protocoles d'évaluation des descripteurs tactiles retenus

L'objectif est de regarder dans un premier temps si les mesures instrumentales permettent de retrouver le même classement, et le cas échéant l'existence de pistes éventuelles sur des corrélations entre données tribologiques et données sensorielles.

### 3.1.4) Essais tribologiques

La procédure instrumentale mise en place pour caractériser les échantillons suit le même principe que l'étude préliminaire. Une série de 3 essais par échantillon a été effectuée, sous atmosphère contrôlée, selon le même protocole. Le patin de glissement étant posé manuellement, il peut exister une différence entre les zones de frottement mesurées pour un même échantillon. Pour simplifier l'exploration, l'hypothèse a été faite que les échantillons présentaient des propriétés de surface globalement homogènes. La mesure a été effectuée sur la partie centrale des échantillons (Cf. Figure 51).



Figure 51 : Placement du patin de glissement sur l'échantillon

Le choix des propriétés de surface qui permettront de caractériser instrumentalement les différentes surfaces a été effectué après observation du type de signal obtenu. Quatre propriétés ont été retenues. Elles seront présentées dans la partie résultats.

### Traitements des données

Les résultats sont sous forme d'un tableau de dimension 43x7 (43 lignes pour les différents échantillons, 3 colonnes pour les caractéristiques sensorielles et 4 colonnes pour les caractéristiques physiques). Une première analyse statistique a été réalisée grâce au logiciel OriginPro 2015, utilisant l'analyse en composantes principales (ACP). Cette technique permet de transformer les variables quantitatives initiales, plus ou moins corrélées entre elles, en nouvelles variables quantitatives, non corrélées, appelées composantes principales. Elle permet notamment de visualiser dans un espace sémantique l'existence ou non de structures, de groupes d'individus qui se ressemblent ou se distinguent des autres, ainsi que les corrélations pouvant exister entre les variables. Elle donne également une matrice de corrélation de Pearson, qui met en relation les variables entre elles, sous forme de coefficients  $r$ .  $r$  prend une valeur comprise entre -1 et 1 et correspond au degré de corrélation linéaire entre les deux variables. Si  $r$  est nul, il n'y a pas de corrélation. Si  $|r|$  est inférieur à 0.5, il existe une faible corrélation, si  $|r|$  est supérieur à 0.5, il existe une forte corrélation. Enfin, si  $|r|$  est égal à 1, l'une des variables est une fonction affine de l'autre variable (croissante ou décroissante selon le signe).

## 3.2) Résultats

### 3.2.1) Pré-caractérisation sensorielle des échantillons

Le classement des différents échantillons selon les descripteurs accrochant, adhérent et lisse est donné sous forme d'histogrammes en Figure 52. Le rang le plus élevé correspond à l'intensité la plus importante de la sensation. Sont dénombrés 14 rangs pour le descripteur accrochant, 9 pour adhérent et 13 pour lisse. Le panier d'échantillons est ainsi constitué d'éléments considérés significativement différents pour ces descripteurs.

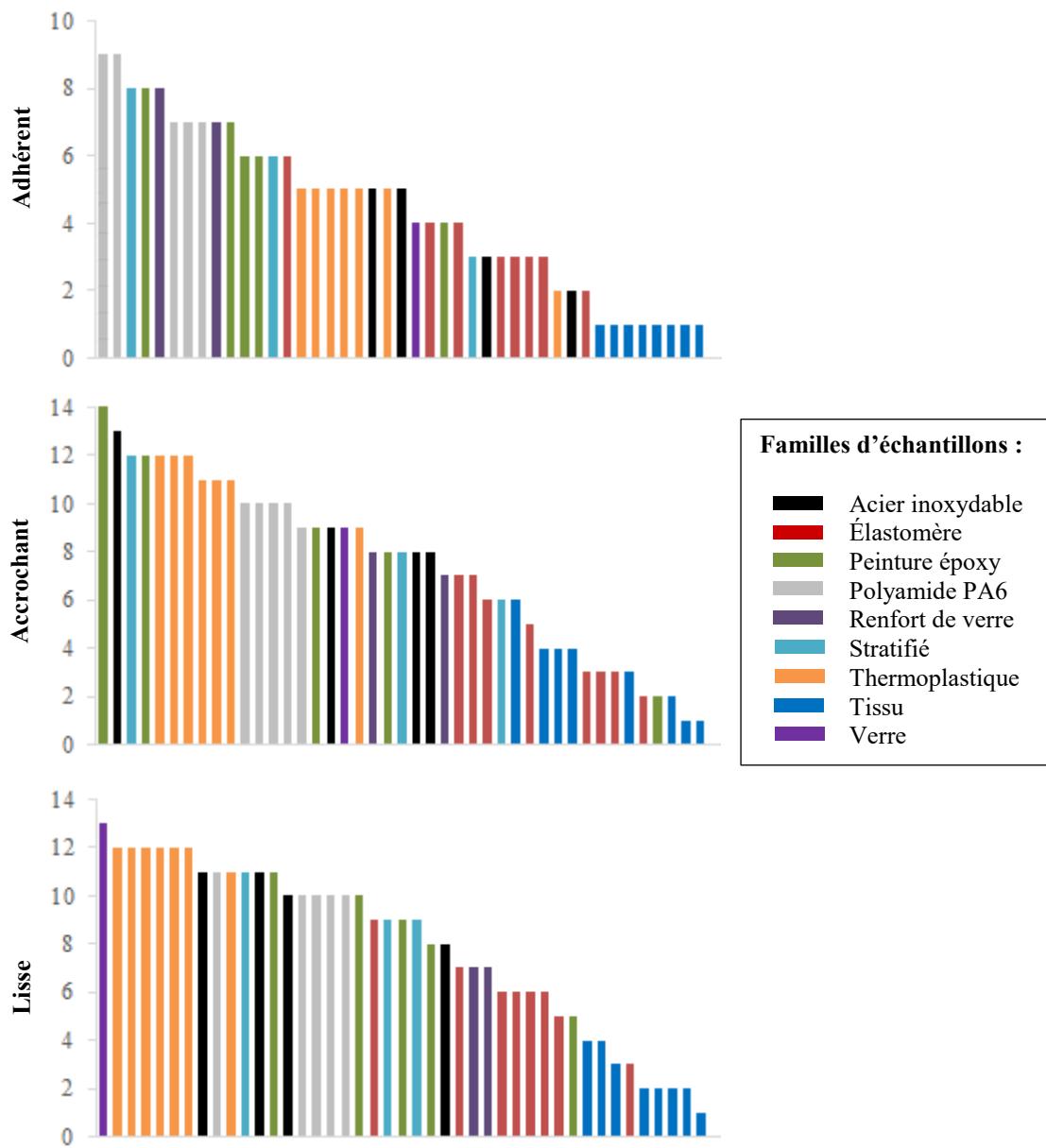


Figure 52 : Répartition des échantillons selon les descripteurs : adhérent, accrochant et lisse

### 3.2.2) Récupération des données physiques sur les tribographes

Les signaux obtenus avec ce tribomètre correspondent à des courbes de frottement classiques, affichant la force de frottement en fonction du temps. La même forme de signal est retrouvée sur les trois essais pour chaque échantillon et avant-bras (Cf. Figure 53), et chaque surface donne un signal caractéristique différent (Cf. Figure 54). La méthode est donc répétable et permet de différencier les surfaces.

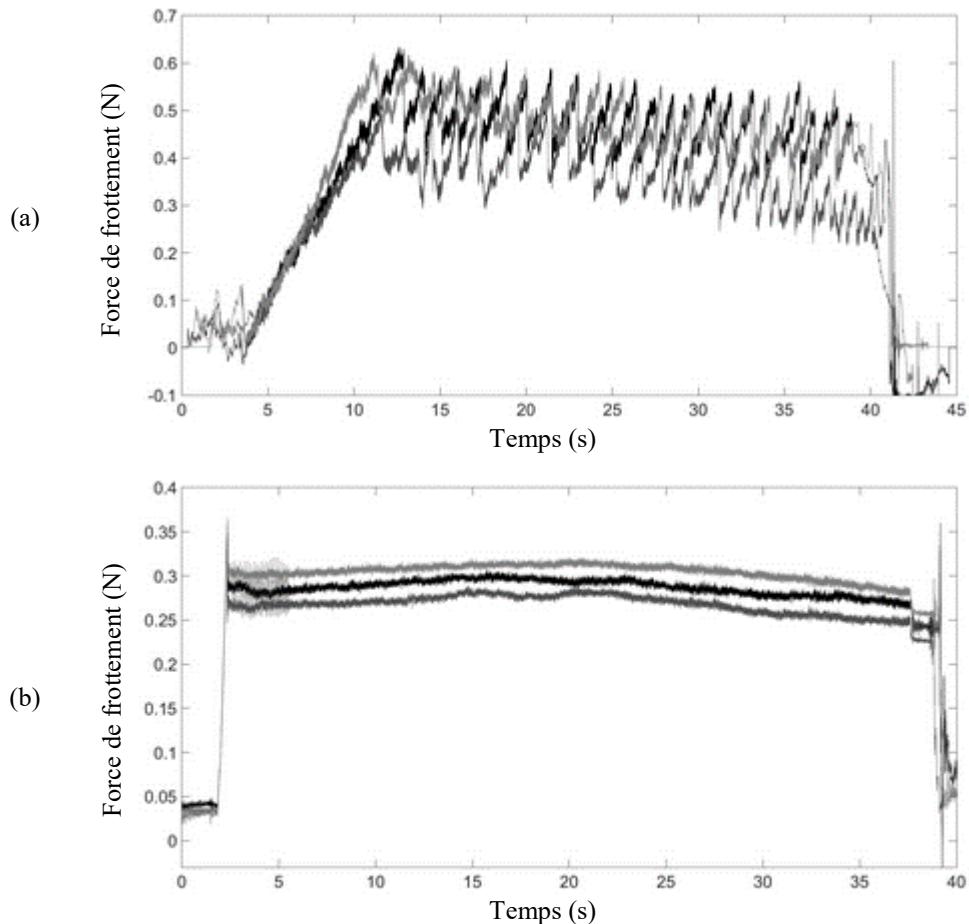


Figure 53 : Représentation du signal des trois essais sur un même graphe pour un individu (a) et un échantillon (b)

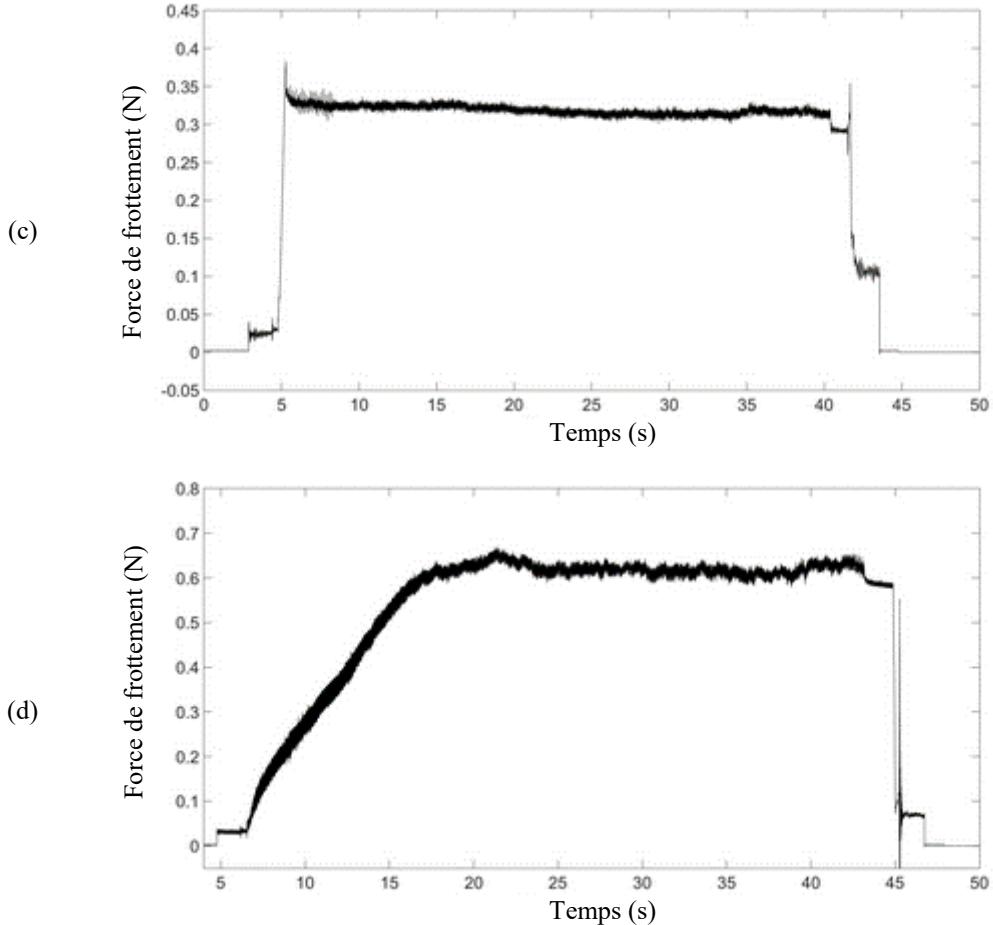


Figure 54 : Différences de forme de signal entre deux échantillons (c) et (d)

Le signal peut se décomposer en plusieurs parties. La première correspond à un régime statique, où le pion est encore immobile par rapport à la surface (phénomène d'adhérence). La pente de la courbe durant cette phase est récupérée ( $P$ , en Newton/seconde). Ensuite, quand la force de traction est supérieure à la force de frottement statique, il y a « décrochage » et passage au régime dynamique, où le pion est en déplacement (glissement). Le rapport de la force de frottement maximale (statique) sur la force normale donne le coefficient de frottement statique ( $\mu_S$ ) selon la loi de Coulomb. De même, le coefficient de frottement dynamique est tiré du rapport de la force tangentielle moyenne dans le régime dynamique sur la force normale. Enfin, l'amplitude des oscillations (AO, en Newton) est récupérée dans cette dernière phase (aussi appelées oscillations de relaxation). Le tribomètre se déplaçant lentement, des saccades sont également observées, correspondant au phénomène de « *stick-slip* », ou glissement adhérent.

Le détail des valeurs instrumentales est donné dans l'annexe B. Pour faciliter la comparaison des surfaces caractérisées d'un point de vue tribologique, le graphe comparatif du

coefficient de frottement dynamique en fonction des échantillons testés est donné dans la Figure 55.

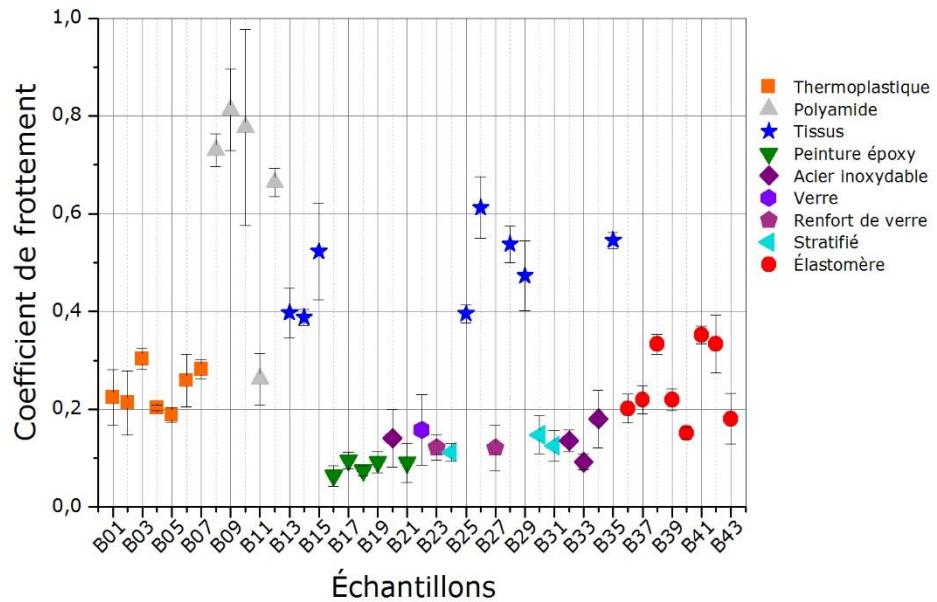


Figure 55 : Graphe comparatif du coefficient de frottement dynamique en fonction des échantillons caractérisés

Il est ici possible d'observer une palette assez large de coefficients de frottement, montrant la diversité des surfaces recueillies avec ce jeu d'échantillons. Déjà, quelques regroupements se profilent : les sept premiers thermoplastiques se situent tous entre 0,2 et 0,3, tandis que les tissus oscillent entre 0,4 et 0,6. Les échantillons polyamide présentent un fort coefficient de frottement ( $> 0,6$ ), sauf pour l'échantillon B11 qui reste autour de 0,3. Le reste des échantillons ne présente pas de tel clivage, mise à part les élastomères qui, comme les thermoplastiques, vont se situer de manière plus dispersée aux alentours de 0,2 et 0,3. Afin d'approfondir l'analyse, un traitement statistique a été réalisé.

### 3.2.3) Traitement statistique

Une première ACP est effectuée. Dans le plan des deux premières composantes principales PC1-PC2, quatre points se détachent du reste, supposément des données aberrantes. Elles correspondent en réalité aux échantillons en polyamide PA6 qui ont la particularité de présenter un faible rayon de courbure (Cf. Figure 56). Plus spécifiquement, il s'agit sur cette figure des échantillons B8, B9, B10 et B12. Du fait de cette forme, la surface du capteur n'était pas entièrement posée sur la surface de ces échantillons, résultant en des signaux visiblement erronés. Cette observation *a posteriori* confirme le fait que le contact n'est plus surfacique mais se rapproche d'un contact ponctuel dans ce cas, non adapté au tribosystème. Une deuxième

ACP est alors effectuée en laissant de côté les données pour les 5 polyamides de forme bombée (Cf. Figure 57). La matrice de corrélation associée est donnée dans le Tableau 8.

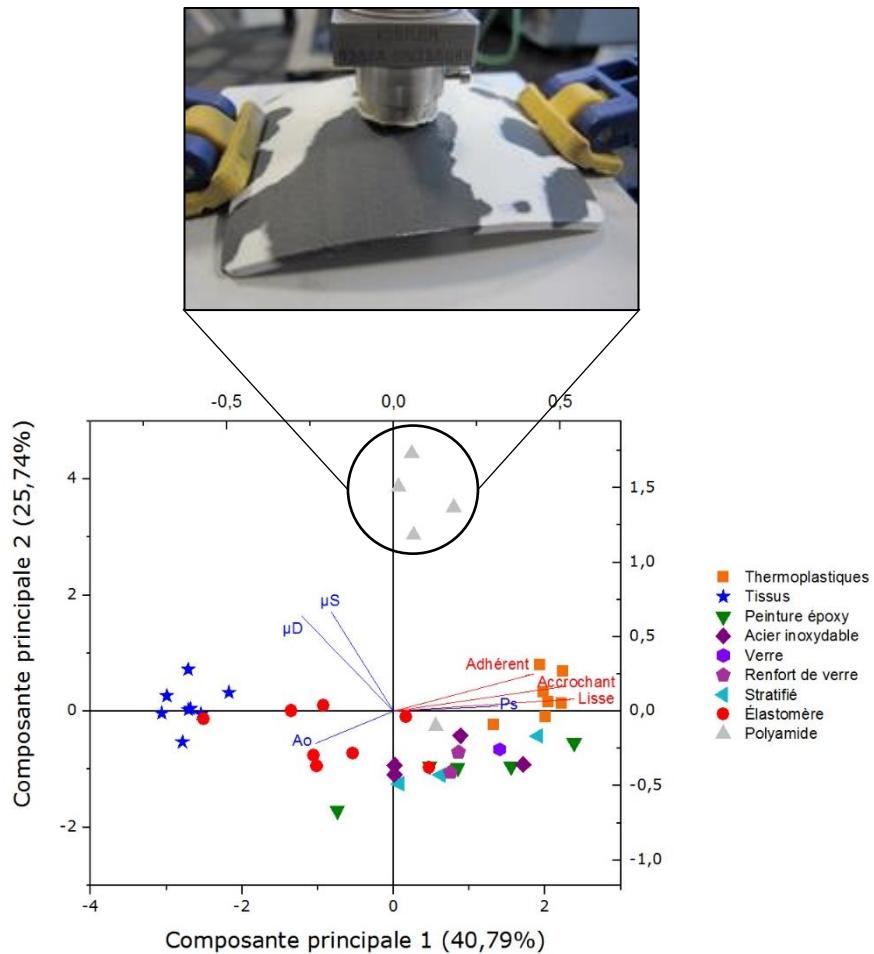


Figure 56 : Observation de données aberrantes dans le plan PC1-PC2 dues à la forme bombée des échantillons concernés

	Accrochant	Adhérent	Lisse	P	$\mu S$	$\mu D$	AO
Accrochant	1	0.69	0.78	0.32	-0.50	-0.52	-0.43
Adhérent	0.69	1	0.59	0.22	0.62	-0.75	-0.16
Lisse	0.78	0.59	1	0.49	-0.57	-0.68	-0.46
P	0.32	0.22	0.49	1	0.10	-0.30	-0.19
$\mu S$	-0.50	0.62	-0.57	0.10	1	0.71	0.33
$\mu D$	-0.52	-0.75	-0.68	-0.30	0.71	1	0.05
AO	-0.43	-0.16	-0.46	-0.19	0.33	0.05	1

Tableau 8 : Matrice des coefficients de corrélation de Pearson associée à la seconde ACP

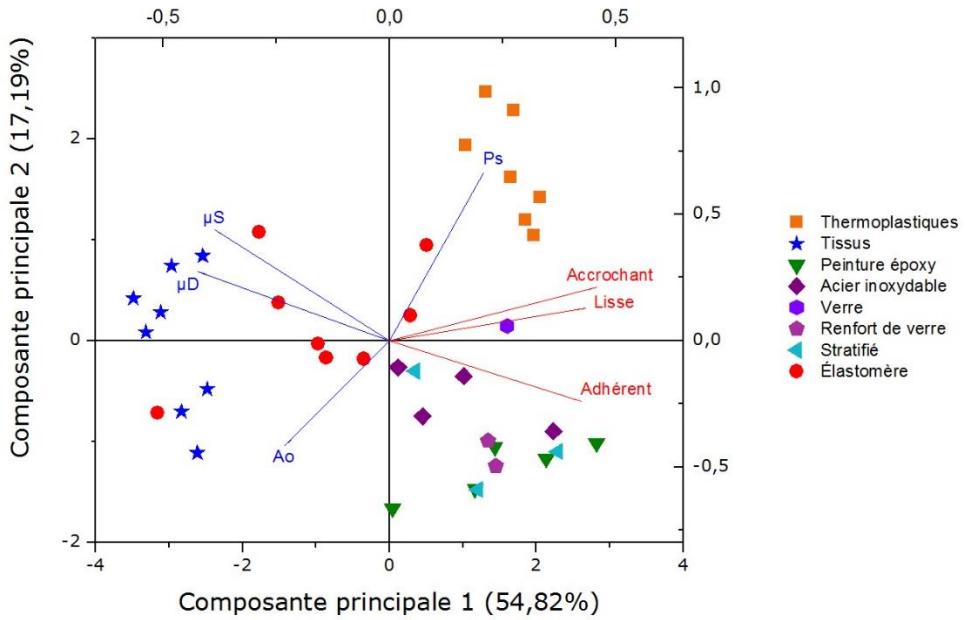


Figure 57: Nouvelle répartition des échantillons dans le plan PC1-PC2

La matrice montre que le descripteur accrochant est assez bien corrélé aux deux autres, adhérent ( $r = 0.69$ ) et lisse ( $r = 0.78$ ). Du côté des données physiques, seul le taux de corrélation entre  $\mu S$  et  $\mu D$  se démarque ( $r = 0.71$ ). Entre les variables sensorielles et instrumentales, seul  $\mu D$  présente un taux de corrélation négatif plus important avec les descripteurs adhérent ( $r = -0.75$ ) et lisse ( $r = -0.68$ ).

Concernant le nouveau plan PC1-PC2, deux tendances se distinguent : une première dans le premier quadrant regroupe tous les échantillons thermoplastiques, caractérisés plutôt par une pente élevée et une sensation lisse (rangs 11 à 12 sur 13), puis une deuxième à gauche de l'axe PC1 rassemble tous les tissus, qui se situent globalement dans les premiers rangs des trois descripteurs sensoriels. Cette séparation se retrouve également à l'œil nu dans les formes des signaux obtenus, notamment pour les tissus. Leurs courbes de frottement présentent un passage progressif entre régime statique et régime dynamique, sans rupture brusque, ce qui n'est pas le cas des thermoplastiques par exemple (voir Figure 58).

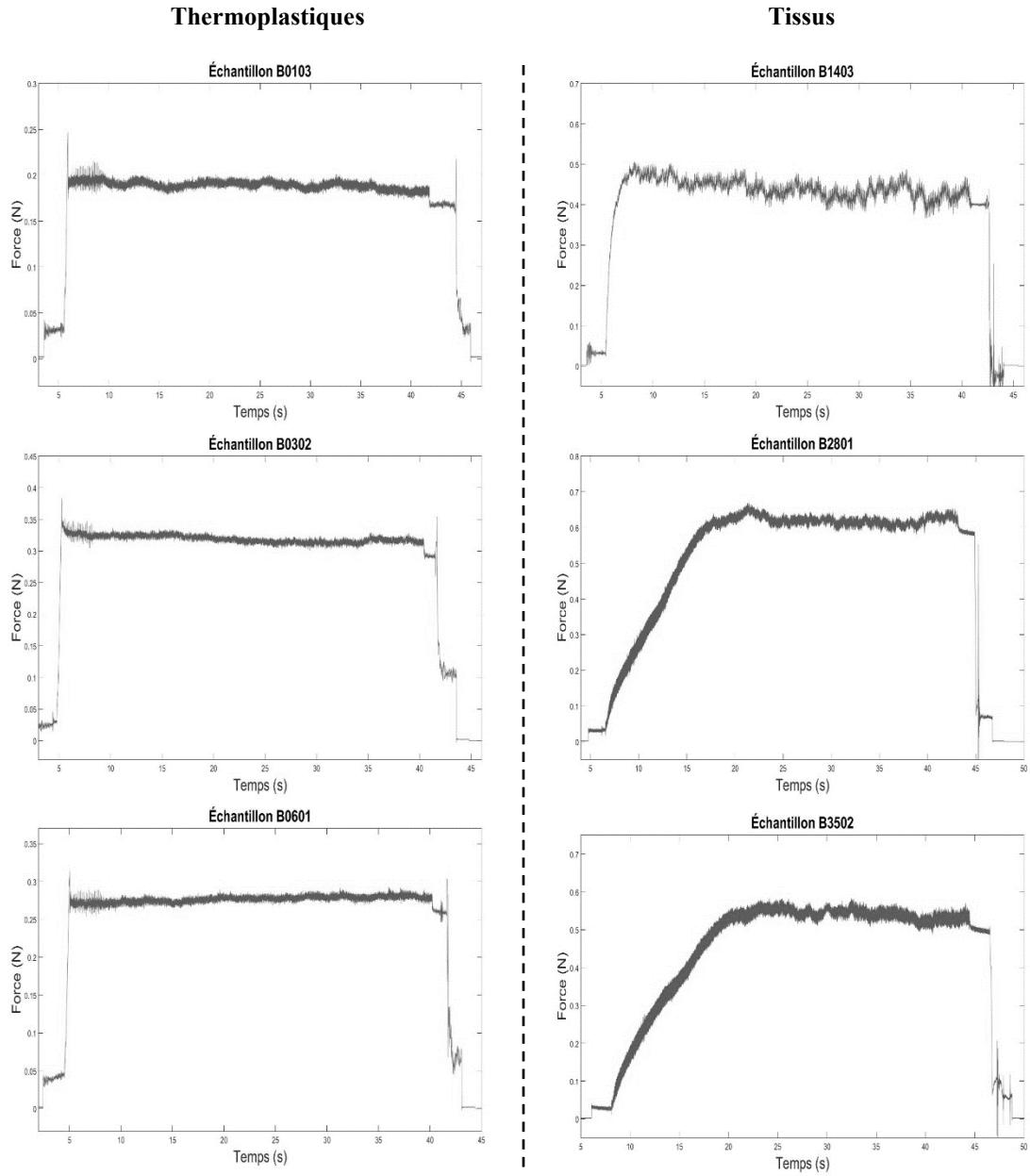


Figure 58 : Comparaison des formes de signaux entre les thermoplastiques (à gauche) et les tissus (à droite)

### 3.3) Discussion et conclusions

La mise en relation entre les données sensorielles et instrumentales n'a pas vraiment donné de corrélations intéressantes, mais il faut relativiser ces résultats en revenant sur les différentes étapes de la méthodologie et la place de cette potentielle instrumentation dans le processus de conception du produit. Dans cette première exploration, il a été observé que l'outil tribologique utilisé permet de différencier les familles de matériaux présents dans le panier d'échantillons (tribographies caractéristiques). Si le tribomètre permet effectivement de distinguer des surfaces présentant des propriétés organoleptiques plutôt différentes (ex. tissus et polymères thermoplastiques), il n'est pas possible avec ce protocole de lier directement les données

tribologiques à des données sensorielles. En effet, ces dernières n'ont pas été obtenues selon une évaluation sensorielle « classique » mais selon un test préliminaire très simplifié. Il s'est avéré que les trois descripteurs n'ont pas été suffisamment pertinents. Pour rappel, l'évaluation sensorielle a pour objectif principal d'objectiver les sensations procurées par des produits. Pour cela, comme il a été vu précédemment, il faut se référer à un espace produits qui va rassembler toutes les variations possibles de la famille d'objets concernée (avec le principe de similarités fonctionnelles, morphologiques et sémantiques), et par là même rassembler toutes les sensations possibles liées à cette famille. Ensuite, le choix des descripteurs, de leurs définitions et des protocoles d'évaluation doit se faire de manière consensuelle avec un panel sensoriel pour que les données sensorielles soient les plus pertinentes et les plus représentatives possibles au sein de l'espace produits considéré. Ici, cela n'a pas été fait dans cette première étude car il s'agissait d'une première exploration visant principalement à valider l'outil tribologique utilisé pour la problématique de la sensation tactile d'accroche, et non d'obtenir les profils sensoriels détaillés des échantillons testés, eux-mêmes restant exploratoires. Par ailleurs, l'instrumentation n'a pas le même objectif : elle souhaite aider à mesurer des propriétés qui vont être difficilement accessibles avec une évaluation sensorielle, que ce soit pour des raisons économiques, des délais trop courts, ou simplement les limites humaines, ce qui est le cas notamment dans la phase de validation de la qualité de production. Dans cette étape, les qualités sensorielles attendues du produit ont déjà été déterminées lors d'un profil sensoriel, par exemple. L'instrumentation ne vient alors pas mesurer sur une grande gamme d'objets (comme peut l'être l'espace produits), mais sur des intervalles plus réduits et précis. Elle doit pouvoir discriminer des différences plus fines liées à la production. Pour approfondir la question de la complémentarité entre tribologie et sensoriel, il va donc falloir restreindre le nombre d'échantillons et revoir la méthode de caractérisation sensorielle en vue d'avoir une meilleure représentativité des données sensorielles.

Pour aller plus loin, les mécanorécepteurs présents dans les différentes couches de la peau ne sont pas spécialisés dans l'évaluation d'une sensation tactile spécifique [LED,97]. La perception du toucher se fait donc de façon globale, d'où la difficulté pour un procédé instrumental de l'évaluer, car lui va au contraire décomposer. Pour être suffisamment représentatif, il est nécessaire de diviser l'évaluation en sensations élémentaires, avec les descripteurs les plus pertinents possibles pour l'espace produits considéré [CRO,02]. Par exemple, dans cette étude, et de façon plus générale, l'évaluation du caractère accrochant pose problème car son protocole d'évaluation est complexe : il faut déplacer le doigt tout en appliquant une certaine pression sur la surface. Il y a donc notion de vibration, due au

mouvement, et de pression, due à l'appui du doigt. D'autres paramètres interviennent alors : la dureté du matériau, le relief, ou encore la texture, voire même la lubrification plus ou moins importante entre le matériau et le doigt liée au sébum, qui est difficilement reproductible en laboratoire. Précisément, le tribomètre ne permet de recueillir que des informations liées à un couple de matériaux mis en contact dans un environnement très spécifique, dont toutes les caractéristiques ne peuvent pas forcément être maîtrisées quand une partie reste liée à la diversité humaine. Il faudrait peut-être alors coupler plusieurs méthodes instrumentales afin de pouvoir tout prendre en compte. C'est en partie le raisonnement derrière la machine de Kawabata, qui cherchait à évaluer instrumentalement les propriétés sensorielles des textiles [KAW,82]. Les résultats n'étaient pas probants, avec là aussi de faibles coefficients de corrélation, provenant d'une instrumentation trop complexe, d'un espace produits trop restreint, et de la difficulté de l'évaluation sensorielle même des textiles. En réalité, cette question de la recherche de corrélations est à rapprocher de la question de la représentativité de la mesure. C'est pour cela, et c'est d'autant plus vrai en tribologie, qu'il faut bien contextualiser les mesures et relativiser par rapport aux procédures mises en place.

Si aujourd'hui il n'existe pas de solution universelle à ce problème, c'est parce qu'il n'y a pas de sensation universelle. Le tribosystème doit alors nécessairement être réfléchi selon les méthodes et outils de l'évaluation sensorielle s'il veut être représentatif dans ses mesures.

## 4) Poursuite de l'étude

Le groupe d'échantillons utilisé précédemment comportait des matériaux de familles différentes : textiles, aciers, thermoplastiques, verre, etc... Des différences ont été détectées via le tribomètre sur ces échantillons et il a même été possible d'observer des regroupements inter-familles, pour les surfaces les plus dissemblables. Pour approfondir l'étude, la question est maintenant de savoir si l'outil tribologique permet de discriminer des surfaces de la même manière qu'un panel, avec des échantillons présentant des différences au toucher moins évidentes. Peut-on observer grâce à une caractérisation instrumentale les mêmes regroupements que par une caractérisation sensorielle ? De nouveau, une confrontation entre les données recueillies par des essais tribologiques et par évaluation sensorielle est effectuée. Pour cela, le tribomètre utilisé dans la première étude a été légèrement modifié et le nombre d'échantillons réduit. De plus, la caractérisation sensorielle a été réalisée grâce à des épreuves de napping, qui permettent de passer outre le problème lié au choix des descripteurs rencontré plus tôt.

## 4.1) Matériel et méthodologie

### 4.1.1) Caractérisation instrumentale

De la même manière que dans l'étude initiale, une caractérisation instrumentale a été menée avec le « tribomètre sensoriel » développé par le laboratoire de tribologie du CETIM. Un nouveau groupe d'échantillons plus restreint a été constitué, différent de la première étude. Un profil de rugosité a également été effectué afin d'inclure des données liées au relief des surfaces.

#### 4.1.1.1) Choix des nouveaux échantillons

Un nouvel ensemble d'échantillons a été constitué avec l'aide du service de tribologie du CETIM, cette fois-ci en prenant des échantillons présentant des propriétés de surfaces assez similaires. Le choix s'est porté sur 3 plaquettes en acier inoxydable, 3 plaques en polyamide PA6.6 et 6 plaquettes en polypropylène chargé en diverses proportions de coquilles d'huîtres. Les 3 plaquettes en acier inoxydable présentent des traitements de surface différents : l'une est polie, l'autre est microbillée (traitement de surface par impacts), et la dernière rectifiée (meulage par balayages successifs). Concernant les 3 plaques en polyamide PA6.6, elles possèdent des rugosités différentes. Ces 6 échantillons ont été fournis par le CETIM. Les 6 plaquettes en polypropylène sont chargées en coquilles d'huîtres à différents pourcentages (40%, 20% et 5%), et présentent des granulométries différentes ( $15\mu\text{m}$  et  $500\mu\text{m}$ ). Elles présentent également chacune trois zones de rugosité différente (lisse – zone 1, peu rugueux – zone 2, très rugueux – zone Ø, non testée), comme montré sur la Figure 59. Cela représente alors 12 surfaces supplémentaires (6 plaquettes x 2 rugosités). Elles ont été fournies par l'entreprise Eurostar Engineering Plastics [EEP]. La liste récapitulative des échantillons est donnée dans l'annexe C. Les profils de rugosité de tous les échantillons sont présentés dans l'annexe D, et les photographies des surfaces au microscope numérique dans l'annexe E.



Figure 59 : Échantillon thermoplastique avec ses trois rugosités

Des essais tribologiques ont été entrepris sur les 12 échantillons, et sur les zones 1 et 2 des thermoplastiques, soit un total de 18 surfaces caractérisées instrumentalement.

#### 4.1.1.2) Essais tribologiques

Quelques modifications ont d'abord été effectuées sur le tribomètre par l'équipe du laboratoire de tribologie du CETIM. Dans la première étude, des vibrations induites par le déplacement de la table micrométrique à moteur pas à pas et par la mauvaise fixation de certaines parties du tribomètre créaient du bruit dans le signal. Pour diminuer ce bruit, une plaque de mousse en polyuréthane a été placée à la jonction entre le bras du tribomètre et la table micrométrique, afin d'absorber les vibrations dues au déplacement. De plus, le moteur pas à pas a été cette fois utilisé dans l'autre sens par rapport à la dernière série d'essais. Au lieu de pousser, il a été employé dans le sens de tirage (à rentrer plutôt qu'à sortir). Ceci permet effectivement de diminuer l'effort imposé au moteur, et ainsi diminuer les vibrations. Enfin, les différentes vis et écrous ont été vérifiés et resserrés. La Figure 60 illustre le nouveau système. L'antagoniste reste le même type de tissu que décrit précédemment, toujours en vue de simuler le toucher du doigt humain.

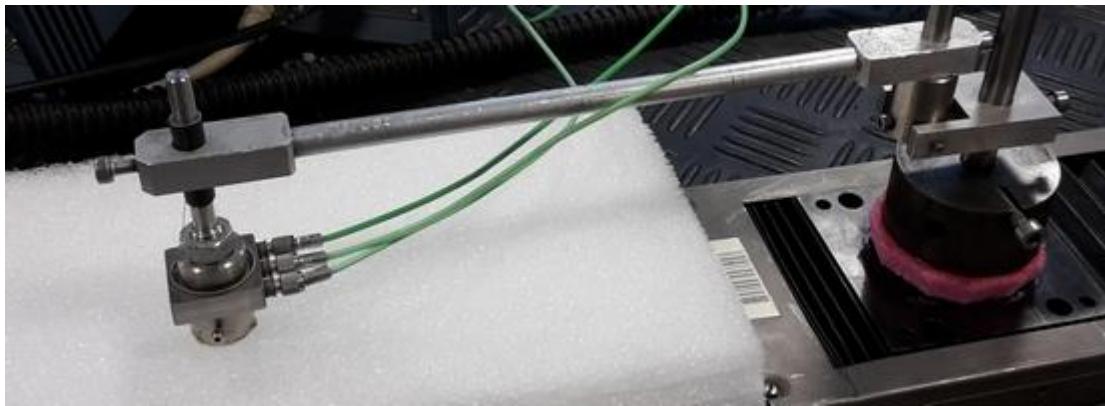


Figure 60 : Tribomètre amélioré par l'équipe du CETIM

De même que précédemment, une série de 3 essais par échantillon est effectuée, cette fois-ci directement par l'équipe de tribologie du CETIM, sous atmosphère contrôlée, au sein du laboratoire de tribologie du CETIM. Le capteur du tribomètre est toujours posé manuellement sur les surfaces, toujours vers leur centre. L'hypothèse a encore une fois été faite que les échantillons présentaient des propriétés de surface globalement homogènes, et donc que le segment testé importait peu par rapport au reste de la surface. Les données retenues sont les mêmes, à savoir : le coefficient de frottement statique, le coefficient de frottement dynamique, l'amplitude des oscillations de relaxation, puis la pente de la courbe en régime statique. Ces quatre paramètres sont moyennés sur les 3 essais. Ils sont extraits des courbes de frottement avec le logiciel Matlab et le même programme que la première étude.

#### 4.1.1.3) Profils de rugosité

Des profils de rugosité viennent compléter les données de frottement afin de prendre en compte le relief des surfaces. Ils ont été obtenus grâce au microscope optique 3D du fabricant Bruker installé au laboratoire de tribologie du CETIM. Il dispose d'un capteur interférométrique à matrice CCD 640x480 pixels, dont la résolution en X est de  $7.134\mu\text{m}$  avec un objectif X2.5 (voir Figure 61). Partant de l'hypothèse que la surface a un relief globalement homogène, la caractérisation de surface s'est effectuée vers leur milieu, sur une aire de 4,558mm par 3,417mm. Les données de rugosité ont été obtenues grâce au logiciel MountainsMap, indiquées dans l'annexe D. Les essais tribologiques ont été réalisés sur un segment de direction l'axe X du profilomètre. Les valeurs de rugosité moyenne quadratique du profil Rq selon l'axe X viennent compléter les données tribologiques (norme ISO 4287).

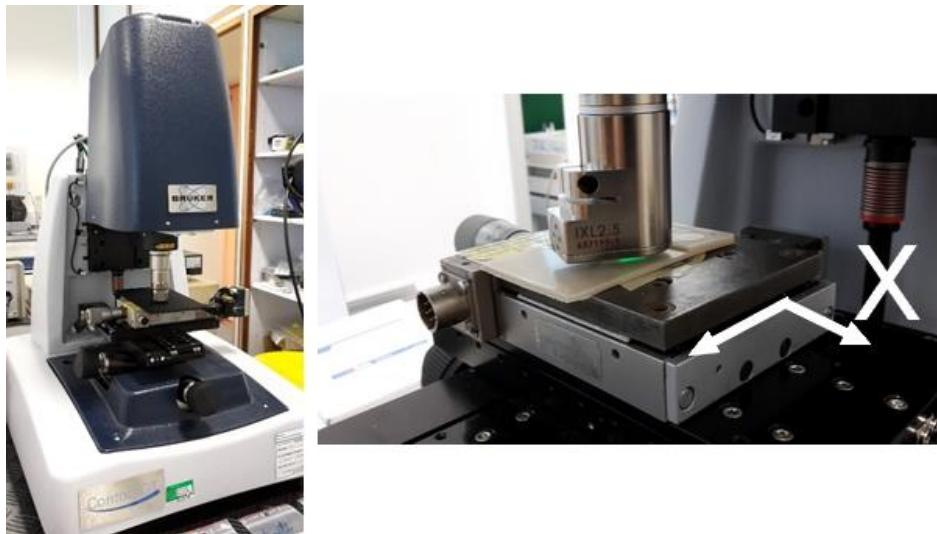


Figure 61 : Profilomètre Bruker et direction de l’axe X

#### 4.1.2) Caractérisation sensorielle

Dans l’étude précédente, trois descripteurs tactiles ont été utilisés arbitrairement pour caractériser les différents échantillons du premier panier d’échantillons : lisse, accrochant et adhérent. Il a été observé à travers les analyses statistiques que ces descripteurs n’étaient pas pertinents par rapport au choix des échantillons précédents. Pour pallier ce problème, qui est finalement la verbalisation des sensations tactiles, le choix de la caractérisation sensorielle s’est porté cette fois-ci sur une épreuve de napping.

##### 4.1.2.1) Présentation du napping

Le terme de napping (mot-valise formé par la fusion de « mapping » – cartographie en anglais – et de « nappe ») apparaît pour la première fois en 2003 dans une publication en français de Pagès [PAG,03] (2005 pour la publication en anglais [PAG,05]) présentant l’évaluation sensorielle de dix vins blancs du Val-de-Loire. Il s’agit d’une méthode d’évaluation holistique recueillant des données relatives à la perception d’un ensemble de stimuli, où chaque sujet doit représenter spatialement les ressemblances ou dissemblances sensorielles qu’il ou elle perçoit dans un espace produits. Cette procédure permet de récupérer directement une configuration euclidienne pour chaque panéliste en une seule session. Le traitement simultané de toutes ces configurations (toutes les nappes recueillies) fournit une représentation graphique des échantillons, dans laquelle deux échantillons sont proches s’ils sont perçus comme similaires par l’ensemble des panélistes, ou éloignés s’ils sont perçus comme différents, chacun des panélistes ayant utilisé leurs propres critères pour disposer les échantillons comme ils le « ressentaient ». Un tel recueil peut mettre en évidence des importances relatives des

dimensions de perception différentes d'un panéliste à l'autre, ou d'un panel à l'autre. Accompagné de mots fournis par les panélistes eux-mêmes, le napping permet d'obtenir au final un profil sommaire mais spontané dans un temps très bref. Un autre intérêt de cette méthodologie est de ne requérir aucun entraînement et donc de pouvoir faire appel à des panels variés, experts comme naïfs [STR,09].

Ainsi, plusieurs variantes de napping existent : choix de faire appel à un panel naïf ou expert, mener en parallèle une évaluation sensorielle descriptive par un même panel, imposer les dimensions au panel, générer plusieurs nappes par panéliste, leur demander de noter les descripteurs qu'ils jugent importants sur la nappe, etc... Il s'agit d'une méthode assez flexible qui peut s'adapter à la problématique sensorielle rencontrée. A noter également qu'elle fonctionne pour toutes les modalités sensorielles, et qu'il est possible de les séparer ou non lors de l'épreuve. L'évaluation des dix vins du Val-de-Loire montrait par exemple un panel positionnant les vins selon des dimensions olfactives et gustatives. Ici, c'est la modalité tactile qui nous intéresse. Enfin, Pagès note une limitation technique pour ce genre d'épreuve : le nombre de produits ne doit pas excéder douze, ce qui a été respecté dans cette étude.

#### 4.1.2.2) Réflexion autour du choix des échantillons caractérisés

Le groupe d'échantillons présenté dans la partie précédente a été construit avec l'équipe du laboratoire de tribologie du CETIM, avant le choix de la mise en place du napping. Une réflexion a eu lieu autour de celui-ci en vue de la caractérisation sensorielle. Il s'avère que les douze échantillons mis à disposition pour les essais tribologiques présentent de grandes similarités « inter-familles » au niveau du toucher : ils sont tous plus ou moins lisses, à part les plaques en polymère qui sont texturées. Le risque à éviter était que les sujets naïfs se retrouvent à faire trois groupes « évidents » pour les trois types de matériaux différents, ce qui n'aurait pas donné de résultats intéressants. Afin de diversifier les sensations rencontrées, seuls huit échantillons provenant du choix initial ont été retenus, et quatre autres sont venus l'étoffer. Ils ont été prêtés par le CERTESENS et correspondent à trois échantillons céramiques et une plaque de résine acrylique sculptée sur un panneau de fibres de bois à densité moyenne. Les échantillons initiaux qui ont été retenus pour le napping sont les quatre plaquettes thermoplastiques nommées EEP515\_1, EEP2015\_1, EEP5500\_1 et EEP40500\_1, les deux plaques en polymère nommées PSA0 et PSA83 et enfin les deux plaquettes en acier nommées RECT et MICRO.

#### 4.1.2.3) Choix des panélistes

Une des forces du Napping réside dans la simplicité de sa mise en œuvre, et notamment dans le fait qu'il n'y ait pas besoin de faire appel à des experts sensoriels pour obtenir des résultats pertinents. Pour cette étude, il a été fait appel à un panel naïf de 22 volontaires, répartis en 10 hommes et 12 femmes, âgés de 21 à 63 ans (médiane à 27 ans), et de profils très différents (étudiants, professeurs, techniciens, ouvriers...). Cela s'est justifié par le fait que les personnes amenées à entrer en contact somesthésique avec le type de surface étudié ici ne sont pas forcément expertes : il s'agit du grand public. De plus, l'objectif n'est pas de valider tel ou tel traitement de surface à travers une expertise sensorielle, mais plutôt de comparer les données obtenues entre les caractérisations sensorielles et instrumentales. Dans l'optique où les échantillons peuvent représenter des surfaces d'appui présentes dans un transport public urbain, il est aussi tout à fait intéressant de constater comment les gens explorent au toucher ou comment ils le verbalisent. Il s'agit d'un exercice qui peut être difficile si on se pose la question « qu'est-ce que je ressens quand je touche ceci » pour la première fois.

#### 4.1.2.4) Déroulement des épreuves

Les épreuves de napping ont été menées au CERTESENS sur plusieurs après-midis entre février et mars 2017 dans une salle à atmosphère contrôlée. Des numéros aléatoires à trois chiffres étaient attribués aux douze échantillons grâce à des étiquettes collées sur la surface à toucher (revoir l'annexe C pour la correspondance libellé/numéro). Ces derniers étaient placés de façon aléatoire à côté de la nappe à chaque début d'épreuve, comme illustré dans la Figure 62. Cette nappe était de forme circulaire, de diamètre environ 90 centimètres. Dans l'épreuve de napping proposée par Pagès, la nappe était de forme rectangulaire, mais rien dans la littérature n'impose une forme particulière. La forme circulaire a été choisie ici pour prévenir les sujets de penser selon deux axes orthogonaux et donc favoriser des configurations plus libres, sans supposer une configuration dans un espace bidimensionnel orthonormé. Il était demandé aux sujets de se laver les mains avant l'épreuve, puis une feuille d'instruction leur était donnée, inspirée de l'étude de Pagès [PAG,05] (voir annexe F). Des serviettes étaient également mises à leur disposition pour se sécher les mains durant l'épreuve. Effectivement, certains sujets avaient tendance à avoir les mains moites à force de manipuler les échantillons, ou simplement à cause du stress (il faut rappeler que les sujets sont naïfs, donc non habitués à ce genre d'épreuve).

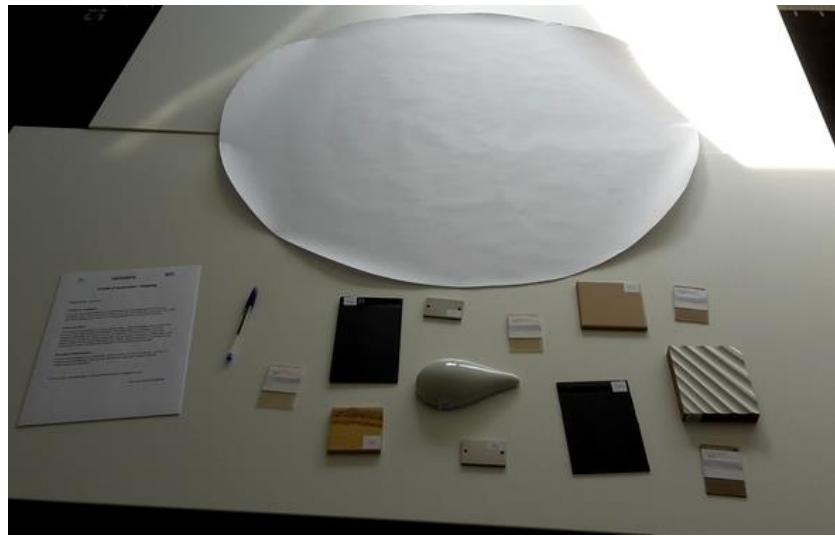


Figure 62: Présentation des échantillons pour l'épreuve de Napping

L'intérêt est ici porté sur le touché des surfaces. Il a été choisi de ne pas bander les yeux des sujets, d'une part pour raison pratique (difficile de positionner des objets sur une nappe en étant aveugle), d'autre part pour prendre en compte indirectement le biais induit par la vue des surfaces, biais qui aura de toute façon lieu en situation écologique. Un protocole permettant le napping en simili-aveugle a été expérimenté dans les travaux de Dacleu portant sur la perception tactile et les vibrations induites lors de l'exploration tactile de surfaces texturées [NDE,16]. Une lampe UV était installée sous une table transparente afin qu'une fois la salle plongée dans le noir, les échantillons posés sur la table apparaissent en noir pour le panéliste, sans texture visible. Cette technique, nommée « NappOmatic » est efficace lorsque les échantillons sont tous de même dimension, ce qui était leur cas. Ici, la taille variée des échantillons trahit leur perception et des groupements par taille peuvent alors être induits. Par conséquent, il a été simplement demandé aux sujets naïfs d'essayer de se concentrer sur leurs sensations tactiles et de ne pas faire de différenciation sur des descripteurs visuels comme la couleur ou l'apparence.

Les sujets ont été invités à explorer librement les surfaces des échantillons qui leur étaient proposés sur la table, puis ont été laissés en autonomie le temps de créer leur configuration (Figure 63).



Figure 63: Panéliste créant sa configuration spatiale

Une fois leur configuration élaborée, les sujets devaient inscrire une croix à l'emplacement de chaque échantillon et écrire à côté de chacune les différents descripteurs structurant leur configuration. Ainsi, chaque échantillon ou groupe d'échantillons se voyait attribuer un certain nombre de mots ou d'expressions le caractérisant, ceci afin d'expliquer la logique de chaque sujet dans leur disposition sur la nappe (Figure 64). Enfin, la dernière étape fut de récupérer la nappe une fois l'épreuve terminée puis de construire un système d'axes orthonormé afin de récupérer les coordonnées des différents échantillons. Un des avantages du napping est que l'origine du repère peut être située n'importe où. Ici, elle a été située arbitrairement vers le centre de la nappe.



Figure 64: Panéliste notant ses propres descripteurs tactiles sur la nappe

#### 4.1.3) Traitement des données

Les premières données obtenues ont été celles des essais tribologiques et des profils de rugosité. Compte tenu du rajout *a posteriori* de quatre échantillons pour le napping, ces derniers n'ont pas été caractérisés instrumentalement. Dans la même logique, seules les données concernant les huit autres échantillons du groupe original seront discutées.

##### 4.1.3.1) Données instrumentales

Les résultats instrumentaux sont sous forme d'un tableau de dimension 18x5 (18 lignes correspondant aux surfaces caractérisées, 4 colonnes pour les données issues des courbes de frottement et 1 colonne pour le paramètre de rugosité moyenne quadratique du profil). De la même manière que l'étude précédente, une analyse en composantes principales est effectuée grâce au logiciel OriginPro 2015. De nouvelles variables quantitatives orthogonales (appelées composantes principales, ou dimensions) sont alors calculées à partir des variables instrumentales plus ou moins corrélées entre elles et permettent d'observer dans un nouveau plan le positionnement des différentes surfaces testées. Ce graphique illustre les différents regroupements de surfaces, suivant leurs similitudes ou différences, et permet une sorte de cartographie instrumentale qui pourra être comparée à celle obtenue suite à l'épreuve de napping.

##### 4.1.3.2) Données sensorielles

Les résultats du napping sont organisés comme indiqués par le Tableau 9 ci-dessous. À chaque configuration  $j$  d'un sujet correspondent deux colonnes : l'abscisse  $X_j$  et l'ordonnée  $Y_j$ , dont le couple  $(X_j, Y_j)(i)$  correspond aux coordonnées de l'échantillon  $i$  relevées sur la nappe  $j$ . De plus, les mots inscrits sur les nappes font l'objet de comptages et d'éventuels regroupements, ceci dans le but de formaliser le verbatim des sujets naïfs. Ainsi, les mots ayant un sens proche ou étant synonymes sont résumés sous un seul terme. Ceux-ci sont choisis conformément au dictionnaire des mots du sensoriel [BAS,11]. Ces termes se retrouvent ensuite dans un tableau de fréquence dont le paramètre général  $f_{ik}$  correspond au nombre de fois que le terme  $k$  a été utilisé pour caractériser l'échantillon  $i$ .

Ce tableau de données est ensuite soumis à une analyse factorielle multiple (AFM) grâce au logiciel R. Dans l'AFM, les coordonnées des échantillons dans chaque configuration constituent un groupe actif de paires de variables non normées. Ceci permet d'équilibrer les sujets entre eux et de respecter les éventuelles disparités entre les variabilités horizontales et verticales. Les termes sont quant à eux introduits dans l'AFM en tant que groupes

supplémentaires. Ils n'interviennent donc pas dans la construction des axes mais leurs coefficients de corrélation avec les facteurs de l'AFM sont calculés et représentés comme dans une ACP usuelle en tant que variables illustratives. Cela permet *in fine* de comprendre à quoi correspondent les nouvelles dimensions calculées (ou composantes principales).

Configurations						
	1	...	j	...	J	Termes
Coordonnées	$X_1 Y_1$	...	$X_j Y_j$	...	$X_J Y_J$	$1 \ k \ K$
	1					
Échantillons	i	...	$X_j(i) Y_j(i)$	...		$f_{ik}$
	n					

Tableau 9 : Organisation des données du napping

Cette analyse fournit plusieurs représentations, dont voici les plus pertinentes pour cette étude :

- une représentation des échantillons telle que deux échantillons y apparaissent proches si globalement ils ont été considérés comme proches par l'ensemble des sujets ; les dimensions de cette représentation sont les dimensions aussi communes que possible à l'ensemble des nappes ;
- une représentation des mots superposée à celle des produits dans laquelle les termes apparaissent du côté des échantillons auxquels ils ont été le plus souvent associés ;
- une représentation des sujets telle qu'une grande proximité entre deux sujets indique une ressemblance entre les configurations qu'ils ont fournies.

Ces différentes représentations fournies par l'AFM seront confrontées à celles fournies par l'ACP des données instrumentales. L'objectif de cette deuxième exploration sera alors de déterminer si des tendances peuvent être observées en rapprochant les données instrumentales et sensorielles.

## 4.2) Résultats et discussion

Les résultats des essais tribologiques et des épreuves de napping mènent à deux analyses statistiques séparées, car effectuées sur deux groupes d'échantillons différents. Celles-ci vont

permettre de positionner dans un plan en deux dimensions chaque échantillon par rapport aux autres de son groupe, ceci de manière relative. Du côté des données instrumentales, correspondant aux données obtenues suite aux essais tribologiques et aux profils de rugosité, ces dimensions correspondent sans trop d'ambiguïté au frottement et au relief des surfaces testées. Du côté des données sensorielles, correspondant aux données obtenues suite aux épreuves de napping, ces dimensions restent à découvrir car la caractérisation tactile était libre. Ici, l'intérêt n'est pas porté sur les valeurs absolues des différents paramètres mesurés, mais plutôt sur les positionnements relatifs des huit échantillons communs à ces deux, sur la base de dimensions équivalentes. Cette sous-partie présente dans un premier temps le traitement statistique des résultats des essais menés au CETIM puis ceux des tests réalisés au CERTESENS. Ces deux études seront ensuite discutées, afin de déterminer si la mise en relation des deux représentations fait ressortir des tendances entre données instrumentales et sensorielles.

#### 4.2.1) Données instrumentales

Les signaux obtenus avec le tribomètre sont évidemment de même nature que ceux de l'étude précédente. Trois essais par échantillon mènent à trois courbes de frottement pour chaque. La Figure 65 illustre par exemple les frictiogrammes relevés pour les surfaces EEP515\_1, EEP40500\_1, MICRO et PSA0. Seules les quinze premières secondes sont représentées pour des raisons de lisibilité. Par ailleurs, au vu de la nature du déplacement et du test, il est considéré que l'ensemble des informations utiles à cette étude se trouvent dans cette période de temps.

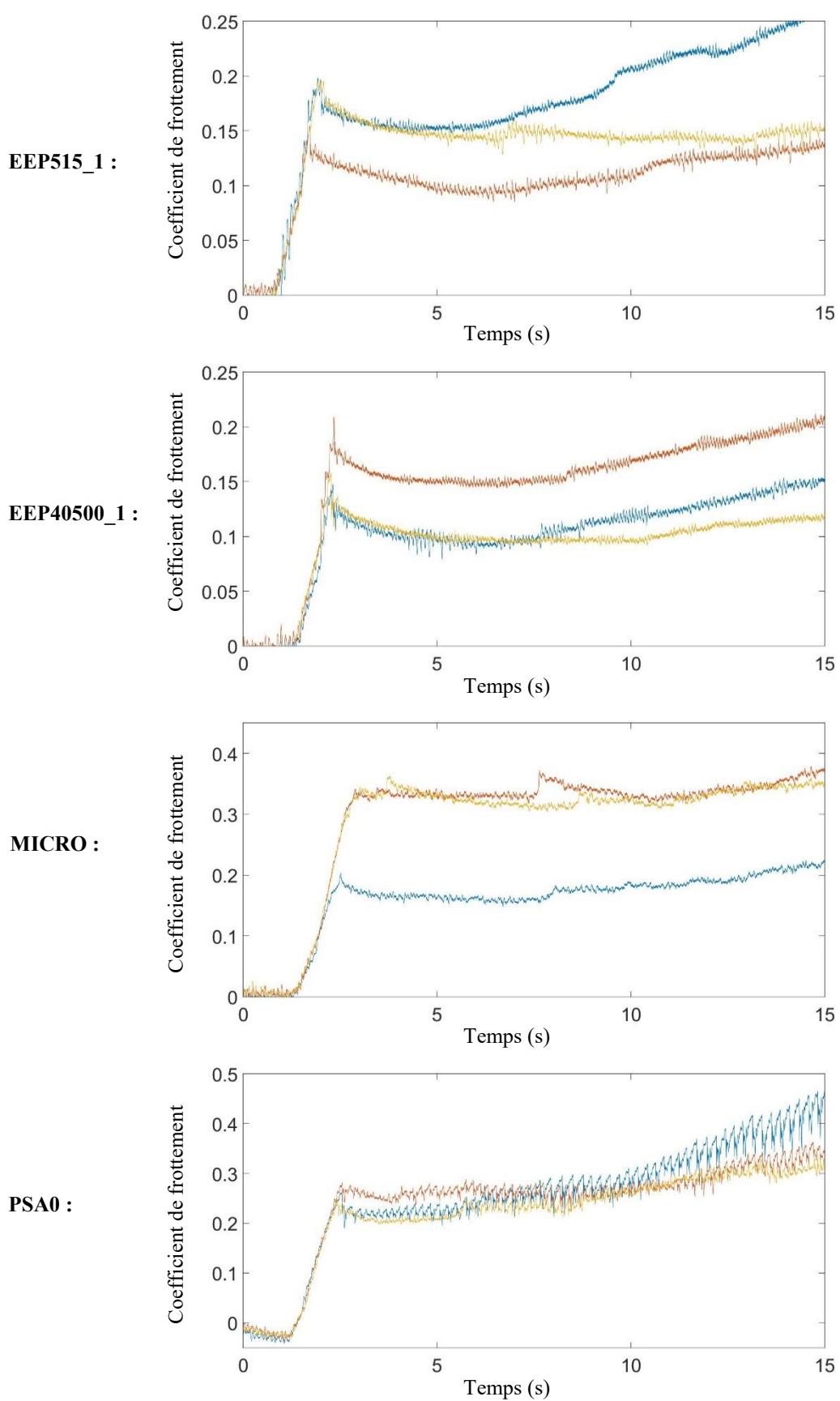


Figure 65 : Frictiogrammes des trois essais pour les surfaces EEP515\_1, EEP40500\_1, MICRO et PSA0

L'ensemble des données instrumentales se retrouve dans l'annexe G. Pour rappel, elles correspondent aux moyennes sur les trois essais des propriétés retenues : le coefficient de frottement statique  $\mu_S$ , le coefficient de frottement dynamique  $\mu_D$ , la pente en régime statique P (en Newton/seconde) ainsi que l'amplitude des oscillations en régime dynamique AO (en Newton). De même que dans l'étude précédente, le graphe comparatif du coefficient de frottement dynamique en fonction des échantillons caractérisés est donné dans la Figure 66. Il permet d'observer que les échantillons en polypropylène (carrés oranges dans le graphe) présentent un coefficient de frottement entre 0,07 et 0,12, avec peu de différence entre les deux rugosités de surface (revoir Figure 59) pour les échantillons de granulométrie 500 $\mu\text{m}$ , et une différence plus marquée pour les échantillons de granulométrie 15 $\mu\text{m}$ . La différenciation au sein des échantillons en polypropylène est bien sûre plus notable dans le graphe comparatif du coefficient de rugosité quadratique  $R_q$  en fonction des surfaces caractérisées (Figure 67). Concernant les plaquettes en acier inoxydable proposant différents traitements de surface, MICRO et RECT présentent un coefficient de frottement similaire (0,21), avec POLI en deçà (0,12). Du point de vue de leur rugosité, POLI est le moins rugueux, proche de RECT avec des  $R_q$  inférieurs à 1 $\mu\text{m}$  et MICRO est le plus rugueux en dépassant 2 $\mu\text{m}$ . Enfin, pour les échantillons en polyamide PA6.6, ils se différencient de la même manière du point de vue de leur coefficient de frottement et de leur  $R_q$ , avec dans l'ordre croissant PSA83, PSA5 et PSA0.

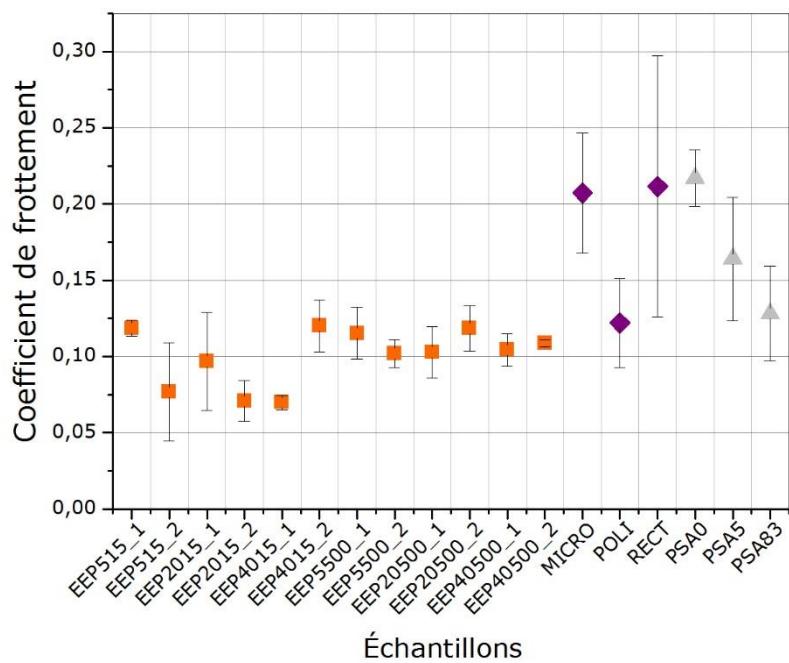


Figure 66 : Graphe comparatif du coefficient de frottement en fonction des échantillons caractérisés

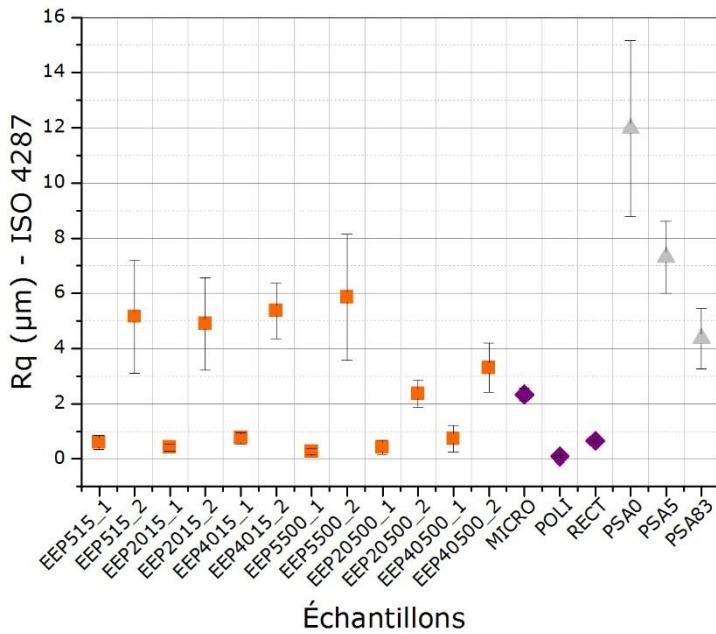


Figure 67 : Graphe comparatif du coefficient Rq en fonction des échantillons caractérisés

#### 4.2.1.1) Remarques préliminaires

Quelques remarques peuvent déjà être émises par rapport aux courbes obtenues. Premièrement, la forme des frictiogrammes reste toujours sensiblement la même pour une surface : similarité dans la pente du régime statique, dans la transition entre régime statique et dynamique (« décrochage ») et dans l'allure du régime dynamique (amplitude des oscillations). Ce résultat présenté dans l'étude précédente est donc toujours présent pour ce nouveau groupe de test. Cela confirme une certaine différenciation des surfaces et un signal caractéristique pour chacune d'elles. Cependant l'amplitude du signal varie d'un essai à l'autre, à plus ou moins grande proportion (coefficient de variation médian pour toutes les surfaces testées : 15%). Cette variation est due à plusieurs facteurs : le faible nombre d'essais, le fait que le capteur ne parcourt pas exactement le même chemin pour les 3 essais (placement manuel sur la surface), et enfin la dérive assez aléatoire du capteur piézoélectrique utilisé, faisant croître ou chuter le signal brut obtenu, qu'il a fallu compenser en post-traitement. Le fait que les coefficients de frottement semblent augmenter vers la fin de la période des quinze secondes sur la Figure 65 est dû à ces chutes dans les signaux bruts de la force normale récupéré par le capteur. L'exemple de la surface EEP515\_1 illustré dans la Figure 68 permet de visualiser le phénomène rencontré. Par conséquent, cette étude reste exploratoire dans le sens qu'elle n'a pas pour ambition de montrer des résultats absolus précis mais plutôt de regarder les tendances relatives qui en découlent. Comme dans le chapitre précédent, les valeurs moyennes sur trois essais de la pente en régime

statique, des coefficients de frottement statique et dynamique ainsi que de l'amplitude des oscillations de relaxation ont été retenues comme les variables liés au frottement pour l'ACP.

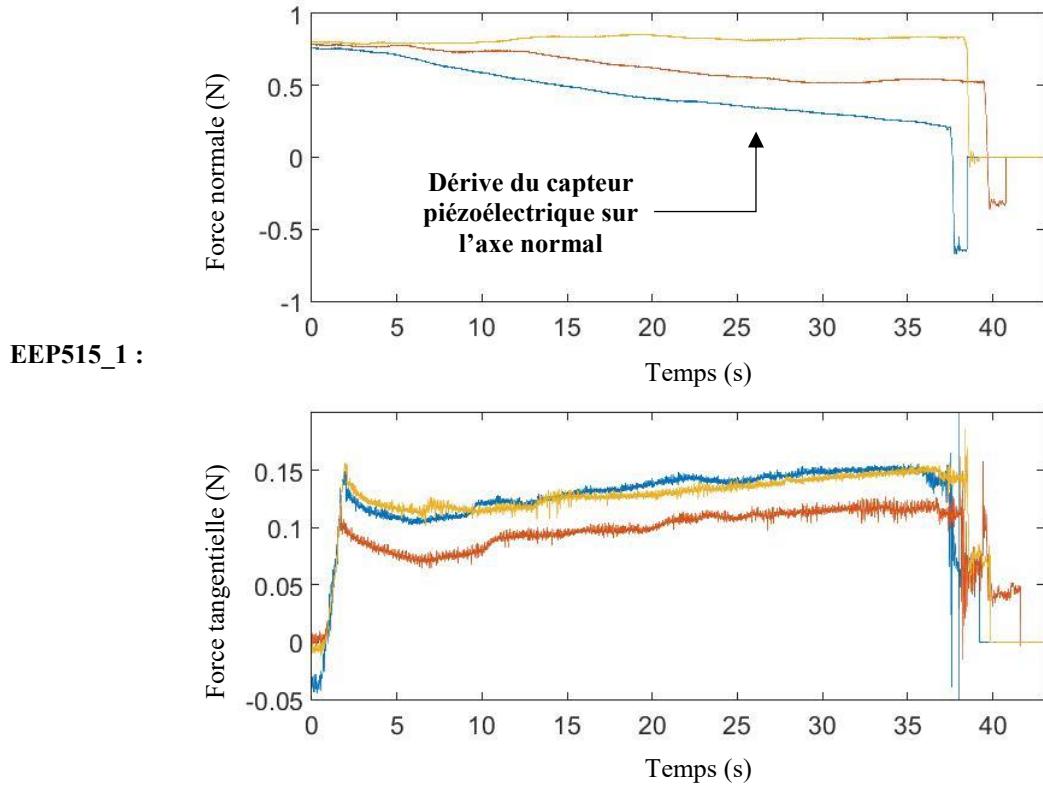


Figure 68 : Illustration de la dérive rencontrée avec le capteur piézoélectrique : exemple avec les forces de frottement obtenues pour la surface EEP515\_1

#### 4.2.1.2) Analyse statistique

L'ACP donne la configuration présentée en Figure 69. Dans le plan des deux premières composantes principales, plusieurs regroupements se distinguent. Le premier comprend l'ensemble des échantillons thermoplastiques du côté gauche de l'axe PC2, avec une séparation entre les deux types de surfaces (pour rappel, les échantillons thermoplastiques présentaient différents types de surfaces, une plutôt lisse, numérotée 1, et une autre légèrement rugueuse, numérotée 2). Il n'y a pas vraiment d'ordre identifiable sur leur position selon l'axe PC1. Pour clarifier, il est possible de lire de gauche à droite : pour  $PC2 > 0$  : EEP515\_2, EEP2015\_2, EEP40500\_2, EEP20500\_2, EEP5500\_2 et EEP4015\_2 ; pour  $PC2 < 0$  : EEP4015\_1, EEP40500\_1, EEP2015\_1, EEP515\_1, EEP20500\_1 et EEP5500\_1.

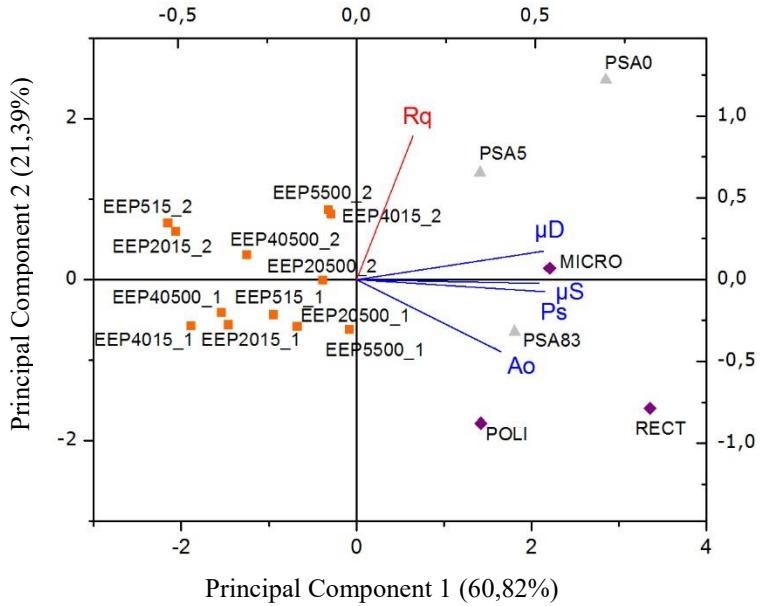


Figure 69 : Répartition des échantillons dans le plan PC1-PC2 de l'ACP

Concernant la signification des axes, le Tableau 10 présente la contribution de chaque variable dans la construction de ces nouvelles dimensions. En toute logique, les variables provenant des essais tribologiques contribuent plutôt à la première dimension, tandis que la variable provenant du profil de rugosité contribue en majorité à la seconde. Le fait que les coefficients ne dépassent pas les 53% vient simplement du fait que les trois premiers paramètres sont assez fortement corrélés entre eux (la proximité des vecteurs se constate sur la Figure 69) et se « partagent » la construction du premier axe. Ainsi, le premier axe catégorise les surfaces allant de celles présentant le moins de frottement à celles en présentant le plus, et le second axe les surfaces allant de la plus lisse à la plus rugueuse. Il est à noter que le coefficient de frottement statique Fs et la valeur de la pente en régime statique Ps semblent plutôt indépendants de la deuxième composante principale, tandis que la valeur d'amplitude des oscillations de relaxation semble liée aux deux composantes principales. Ceci pourrait signifier que cette amplitude dépend en partie du relief de la surface. Effectivement, il est possible que le capteur du tribomètre puisse se heurter à celui-ci pendant le déplacement et créer ainsi des décrochages présents au niveau du signal, de la même manière que le phénomène du « stick-slip » lié au pur glissement saccadé de l'antagoniste sur la surface de l'échantillon.

	Coefficients de PC1	Coefficients de PC2
<b>Fs</b>	0,51009	-0,02412
<b>Fd</b>	0,5233	0,17381
<b>Ps</b>	0,52682	-0,07353
<b>Ao</b>	0,40443	-0,44074
<b>Rq</b>	0,15769	0,87724

Tableau 10 : Contribution des variables instrumentales au calcul des nouvelles dimensions

#### 4.2.2) Données sensorielles

##### 4.2.2.1) Observations liées au déroulement de l'épreuve de napping

Il est intéressant dans un premier temps de revenir sur le déroulement des épreuves de napping. Parmi les 22 sujets soumis au test, la majorité a éprouvé des difficultés à verbaliser leur ressenti tactile, sans pour autant éprouver autant de difficulté à positionner les différents échantillons sur la nappe. Cela reflète d'autant plus l'intérêt de ce test, car l'analyse résultante permet de récupérer ces informations non verbales (voire non conscientes) importantes dans la perception tactile. Dans l'ensemble, les sujets ont su se concentrer sur l'aspect tactile, quitte à fermer les yeux pour certains. Ils ont pris en moyenne moins de dix minutes pour créer leur configuration, tandis que l'étape de verbalisation leur a pris au moins autant de temps. Il a été parfois nécessaire de discuter avec les sujets afin de les aider à expliquer le positionnement des différents échantillons sur la nappe, à travers des interrogations d'ordre général : « Pouvez-vous me dire pourquoi tel échantillon est placé à côté de tel autre échantillon ? », « Pourquoi ces deux échantillons sont-ils aussi éloignés ? », etc. Quatre configurations sont reproduites dans la Figure 70. Elles montrent une utilisation assez complète de l'espace proposé, à l'image des autres configurations qui sont de même nature. Comme indiqué précédemment, la forme circulaire de la nappe ainsi que l'absence d'axes sur le papier ont permis de se détacher d'une configuration à deux dimensions, avec un positionnement des différents échantillons qui est dans l'ensemble assez éclaté. De plus, il est possible d'observer des regroupements quasi systématiques chez les sujets. Par exemple, les échantillons PSA0 et PSA83 (plaques en polyamide PA6.6 noires) ont été perçues comme proches, les échantillons en polypropylène EEP515, EEP5500, EEP2015 et EEP40500 également, ainsi que les deux plaquettes en acier MICRO et RECT (sauf chez le sujet 20 qui les a bien distinguées). Cependant, les positionnements respectifs de ces différents regroupements se retrouvent diffus dans chaque configuration, sans qu'il n'y ait de structure commune apparente. L'analyse statistique est alors

nécessaire pour comprendre quelles ont été les propriétés organoleptiques des surfaces jouant dans la construction de ces configurations.

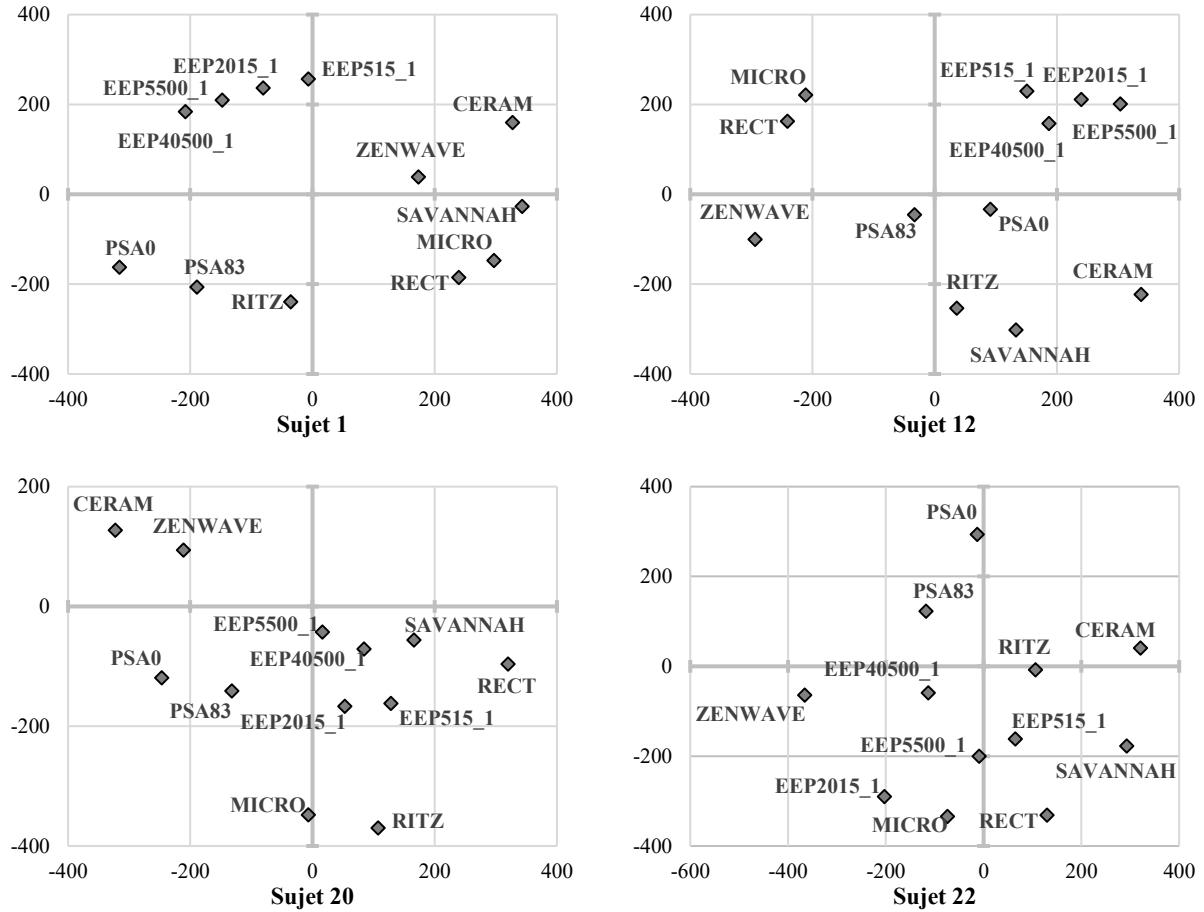


Figure 70 : Quatre configurations individuelles obtenues lors de l'épreuve de napping. Chaque échantillon a été positionné par chaque sujet sur une nappe circulaire de diamètre 90 cm. Les coordonnées des axes correspondent à des millimètres.

L'annexe H présente les coordonnées des échantillons pour chacune des 22 configurations.

#### 4.2.2.2 Représentation des échantillons

Les échantillons sont situés dans une nouvelle représentation construite avec les dimensions calculées par l'AFM. Ces dimensions correspondent à de nouvelles variables orthogonales calculées à partir des variables initiales (ici les coordonnées  $(X_j, Y_j)$  des échantillons) plus ou moins corrélées entre elles. Cela suit le même principe que l'ACP. Dans un premier temps, il convient de savoir combien de composantes sont à considérer. Le Tableau 11 indique les données relatives aux valeurs propres de la matrice de corrélation.

Composante	Valeur propre	Pourcentage de variance	Pourcentage de variance cumulé
Comp 1	10.3372043	27.8169312	27.81693
Comp 2	9.4846495	25.5227463	53.33968
Comp 3	6.0527364	16.2876293	69.62731
Comp 4	4.6230592	12.4404352	82.06774
Comp 5	2.3025996	6.1961872	88.26393
Comp 6	1.5954155	4.2931881	92.55712
Comp 7	1.0090943	2.7154253	95.27254
Comp 8	0.7881577	2.1208954	97.39344
Comp 9	0.473571	1.2743574	98.6678
Comp 10	0.3044059	0.8191419	99.48694
Comp 11	0.1906621	0.5130627	100

Tableau 11 : Valeurs propres de la matrice de corrélation

Les quatre premières composantes couvrent plus de 80% des données, et un peu plus de la moitié est comprise dans les deux premières. Il suffit donc de considérer au maximum les quatre premières composantes pour la suite de l'analyse. La Figure 71, la Figure 72 et la Figure 73 donnent le nouveau positionnement des échantillons dans les plans (Dimension 1, Dimension 2), (Dimension 2, Dimension 3) et (Dimension 3, Dimension 4). Ces nouvelles configurations se lisent de la même façon qu'une configuration d'un sujet, à savoir que deux échantillons sont proches s'ils ont été considérés proches par les panélistes selon la dimension considérée. Il s'agit donc d'une configuration « moyenne » de l'ensemble des sujets.

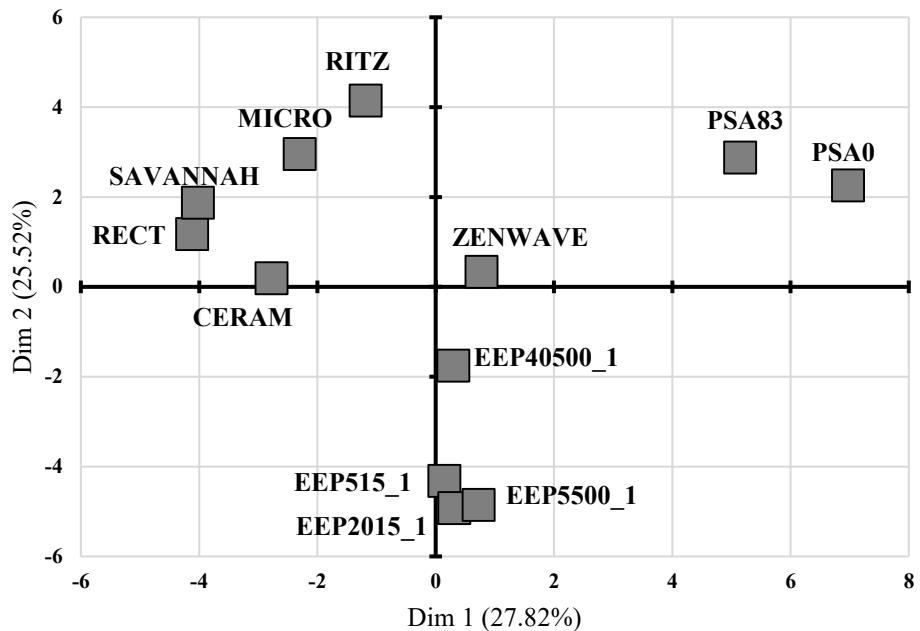


Figure 71 : Représentation des 12 échantillons dans le plan (Dim1,Dim2)

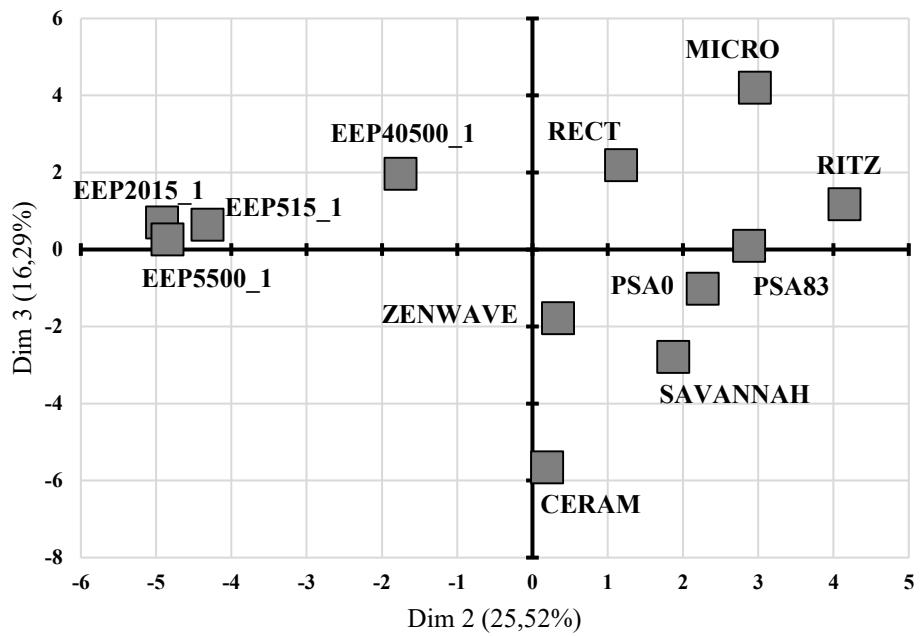


Figure 72 : Représentation des 12 échantillons dans le plan (Dim2,Dim3)

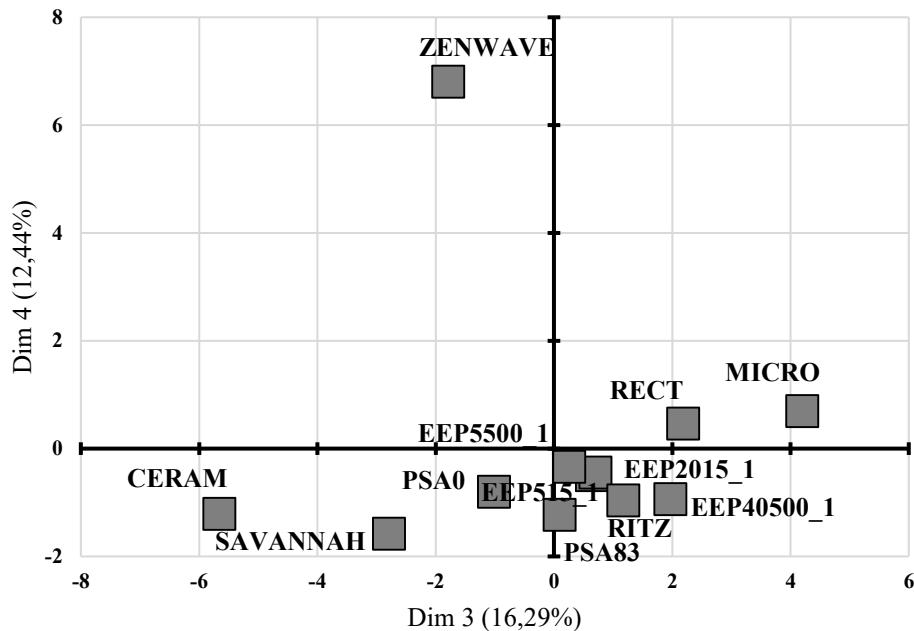


Figure 73 : Représentation des 12 échantillons dans le plan (Dim3,Dim4)

Dans le plan (Dim3,Dim4), l'échantillon ZENWAVE se distingue du reste en étant le plus éloigné sur l'axe Dim4. Cela signifie que cet échantillon contribue en grande partie à la construction de cet axe. Pour rappel, les échantillons CERAM, RITZ, SAVANNAH et ZENWAVE ont été ajoutés au groupe d'échantillons dans le seul but d'étendre le panel de sensations tactiles. Ils n'ont pas fait l'objet d'essais tribologiques, donc la dimension 4 ne semble pas pertinente à prendre en compte pour la suite de l'étude. De plus, il est à noter que l'échantillon ZENWAVE se situe proche de l'origine selon les dimensions 1, 2 et 3 : ceci correspond soit à une position centrale sur toutes les configurations effectuées par les sujets, soit à des positions divergentes d'un sujet à l'autre. Afin de mieux comprendre ce résultat, il est possible de générer des ellipses de confiance autour des échantillons avec le logiciel R en utilisant la fonction *boot* du package *SensomineR*.

#### 4.2.2.3) Représentation des ellipses de confiance

Les ellipses de confiance représentent l'ensemble des positions estimées des échantillons suite à une simulation d'un grand nombre de sujets, basée sur une inférence statistique des données du napping (ici pour un indice de confiance de 0.95). La fonction calcule la configuration moyenne pour ce grand nombre de sujets « virtuels » (ici pris à 200), puis elle la compare à la « vraie » configuration issue des vrais sujets selon une méthode procrustéenne. Les ellipses ainsi créées autour des positions moyennes des échantillons dans cette nouvelle configuration « virtuelle » permet de voir si ces derniers sont placés relativement de la même

façon par les sujets, ou alors s'ils sont placés à chaque fois différemment. Ainsi, plus l'ellipse autour d'un échantillon présente une aire petite, plus l'échantillon est placé de la même façon par l'ensemble des sujets, relativement aux autres échantillons. La Figure 74 représente la simulation dans le plan (Dim1,Dim2) et la Figure 75 dans le plan (Dim2,Dim3).

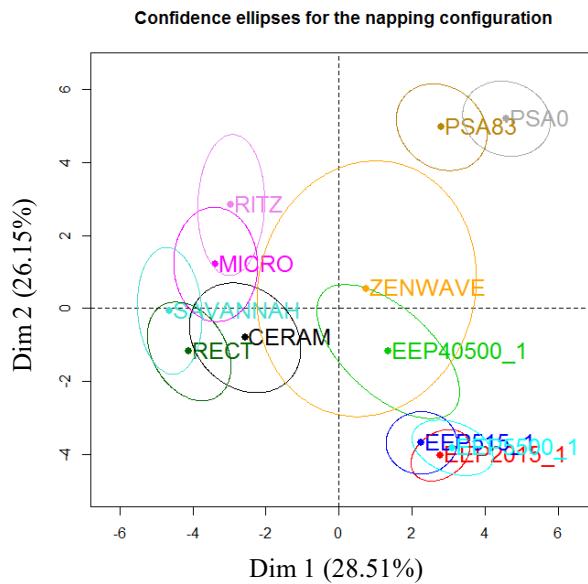


Figure 74 : Ellipses de confiance autour des positions des échantillons dans le plan (Dim1,Dim2)

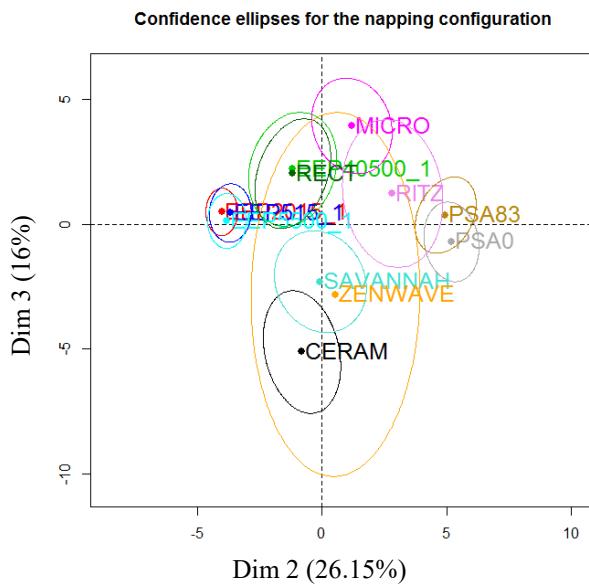


Figure 75 : Ellipses de confiance autour des positions des échantillons dans le plan (Dim2,Dim3)

Premièrement, il faut noter que le pourcentage de variance des dimensions a changé : ceci est évidemment dû au fait que la simulation prend en compte 200 nouveaux sujets virtuels. Cela a renforcé les deux premières dimensions. La dimension 1 initialement expliquant 27.82% des données est passée à 28.51%, et la dimension de 2 initialement à 25.52% est passée à

26.15%. La dimension 3, quant à elle, a diminué de 16.29% à 16%. Il semblerait donc que les deux premières dimensions soient majoritairement utilisées par les sujets pour différencier les échantillons.

Deuxièmement, l'ellipse autour de l'échantillon ZENWAVE est très grande dans les deux plans : cela signifie que cet échantillon a été positionné à chaque fois différemment par les sujets. Cela peut se vérifier dans la Figure 70. Par exemple, ZENWAVE a été perçu comme proche de CERAM ou SAVANNAH pour le premier sujet, mais seulement proche de CERAM pour le sujet 22. Pour les sujets 12 et 22, ZENWAVE est quasiment opposé à ces deux échantillons. Cela est probablement dû à sa grande différence au niveau de sa forme par rapport aux autres échantillons, éclipsant les autres sensations procurées par son toucher.

De même, l'échantillon EEP40500\_1 présente une ellipse très allongée dans le plan (Dim1,Dim2), étirée entre le regroupement des autres thermoplastiques EEP et l'origine. Effectivement, cet échantillon a été quelques fois regroupé avec les autres thermoplastiques, et d'autres fois différencié, principalement pour son aspect plus rugueux.

Pour le reste, les ellipses qui se superposent signifient que les échantillons considérés sont perçus comme équivalents selon la dimension observée. Dans le plan (Dim1,Dim2), trois groupes se différencient. Le premier groupe est composé des échantillons CERAM, MICRO, RECT, RITZ et SAVANNAH : ils ont une valeur négative sur la dimension 1 et dans l'ensemble assez proche de l'origine sur la dimension 2. Le deuxième groupe est composé des échantillons PSA0 et PSA83 : ils ont une valeur positive sur les dimensions 1 et 2. La troisième groupe est composé des échantillons EEP515\_1, EEP2015\_1 et EEP5500\_1 : ils ont une valeur positive sur la dimension 1 et une valeur négative sur la dimension 2. Le plan (Dim2,Dim3) est un peu moins clair. Il y a une opposition entre quatre groupes. Selon la dimension 2, l'opposition se fait entre les échantillons EEP515\_1, EEP2015\_1 et EEP5500\_1 du côté négatif et les échantillons PSA83 et PSA0 du côté positif. Selon la dimension 3, l'opposition se fait entre les échantillons CERAM et SAVANNAH du côté négatif et les échantillons MICRO, RECT et RITZ du côté positif. Afin de comprendre ces regroupements, il faut maintenant s'intéresser aux mots donnés par les sujets lors de la seconde étape de l'épreuve de napping pour caractériser les surfaces.

#### 4.2.2.4) Mots retenus

Chaque sujet a fourni une liste de mots pour caractériser chaque échantillon ou groupe d'échantillons, sans consigne spécifique ni vocabulaire imposé. Afin de faire le tri parmi tous ces mots, ceux ayant un sens proche ou étant synonymes ont été regroupés sous un seul et même

terme, conformément au vocabulaire du dictionnaire des mots du sensoriel [BAS,11]. Une fois ce pré-tri effectué, seuls les termes évoqués par au moins trois sujets pour un échantillon sont retenus. Ce seuil relativement bas a été choisi en raison du faible nombre de sujets. Au final, 18 termes ont été retenus sur les 150 mots utilisés par l'ensemble des participants. L'annexe I répertorie les différents termes selon leur fréquence d'apparition pour chaque échantillon. Le toucher a été caractérisé selon 6 familles de perception : la rugosité ressentie (lisse, rugueux, texturé, relifié), la dureté ressentie (dur, mou), la température ressentie (froid, tiède, chaud), la sensation d'accroche (accrochant, glissant, doux), le type de matériau associé au toucher (plastique, métallique, céramique) et son appréciation hédonique (agréable, neutre, désagréable). Le Tableau 12 indique la fréquence des mots pour chaque famille de perception ainsi que le « poids » de chaque famille, calculé comme la fréquence de chaque famille divisée par le total de mots.

	Rugosité	Dureté	Température	Accroche	Matériau	Hédonique
Fréquence	238	92	254	154	100	96
Pourcentage relatif	25.5%	9.8%	27.2%	16.5%	10.7%	10.3%

Tableau 12 : Fréquence et pourcentage par rapport au total des mots pour chaque famille de perception

Il apparaît dans ce tableau que les sujets ont principalement évoqué de leur propre chef le relief et la chaleur perçue des surfaces. Il semblerait donc que pour ce groupe d'échantillons, ces propriétés aient été les plus importantes. En troisième position, le caractère accrochant des surfaces a été relevé à hauteur de 16.5%. Pour rappel, cette étude cherche à déterminer dans quelle mesure les données instrumentales peuvent prédire les données sensorielles. Ici, les données instrumentales se sont concentrées sur des données de frottement avec le tribomètre et sur des données de rugosité avec le profilomètre. Les données sensorielles en lien avec le frottement se retrouvent dans la famille de perception appelée « accroche » et celles en lien avec la rugosité se retrouvent dans la famille de perception appelée « relief ». Il reste alors à déterminer à quels termes correspondent les dimensions calculées par l'AFM, afin de comprendre le positionnement relatif de chaque échantillon dans cette configuration « moyenne ». Cela permettra *in fine* de comparer le positionnement des échantillons à la fois dans la représentation issue des données instrumentales et à la fois dans celle issue des données sensorielles.

#### 4.2.2.5) Représentation des mots

Afin de comprendre à quoi correspondent les dimensions, les termes retenus sont projetés dans la configuration de l'AFM. Les termes sont placés au barycentre des échantillons, la pondération se faisant selon la fréquence  $f_{ik}$  du terme  $k$  pour les différents échantillons  $i \in [1:n]$ . Les coordonnées barycentriques  $(x_k, y_k)$  du terme  $k$  sont calculées en fonction des coordonnées  $(x_i, y_i)$  des échantillons selon les formules suivantes :

$$x_k = \sum_{i=1}^n \frac{x_i \cdot f_{ik}}{f_{ik}} \quad y_k = \sum_{i=1}^n \frac{y_i \cdot f_{ik}}{f_{ik}}$$

La Figure 76 donne la représentation des mots dans le plan (Dim1,Dim2) et la Figure 77 donne la représentation des mots dans le plan (Dim2,Dim3).

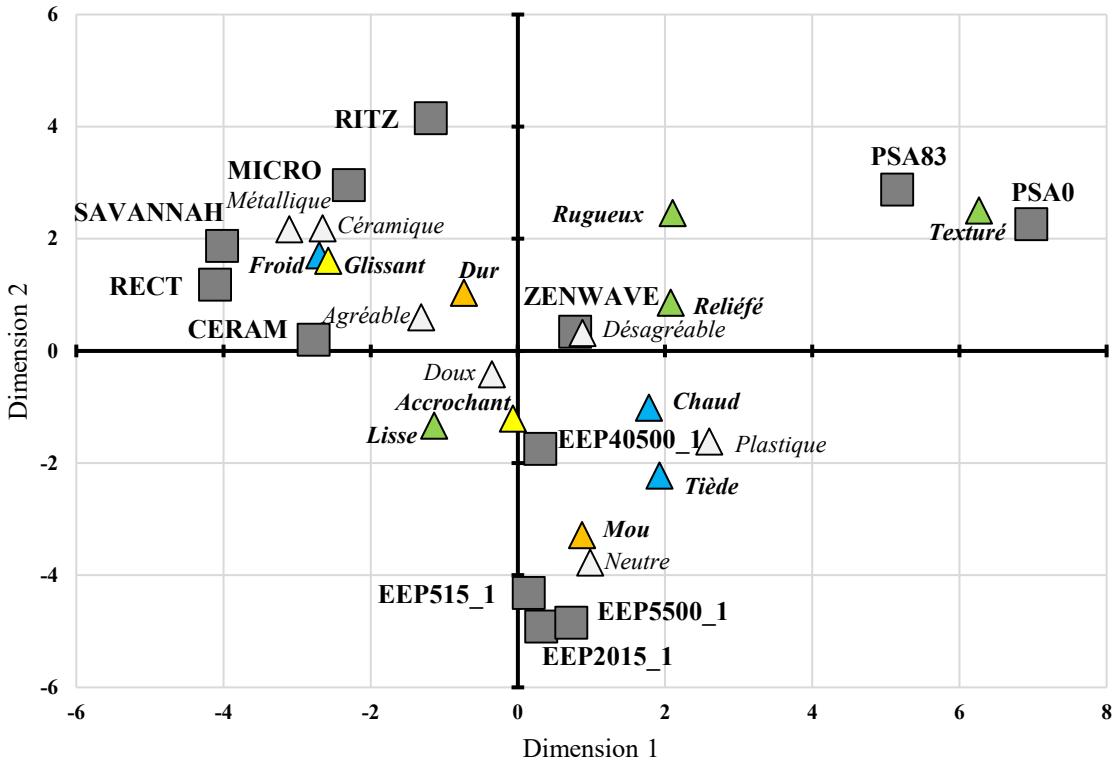


Figure 76 : Représentation des mots dans le plan (Dim1,Dim2)

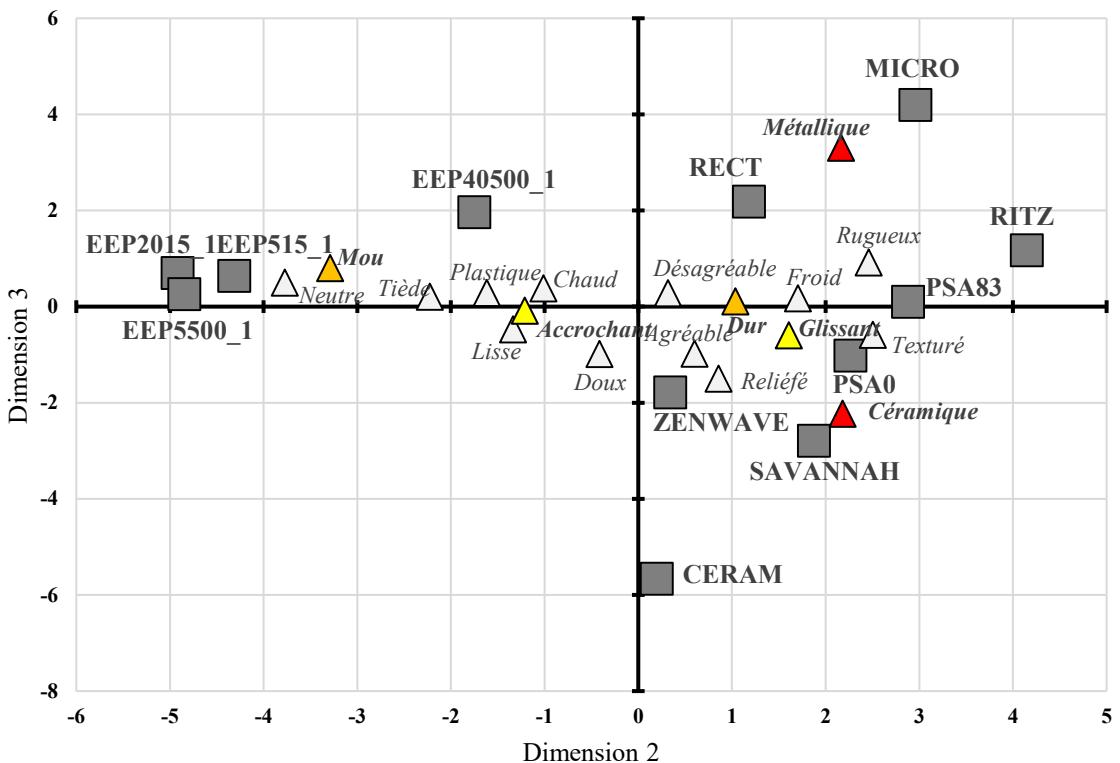


Figure 77 : Représentation des mots dans le plan (Dim2,Dim3)

Les groupes d'échantillons identifiés suite à l'analyse des ellipses de confiance sont maintenant caractérisés avec leurs termes associés. Dans le plan (Dim1,Dim2), l'axe horizontal semble diviser les échantillons selon leurs rugosités et températures ressenties. En effet, il y a une opposition entre d'un côté les valeurs négatives qui correspondent aux descripteurs « Froid » et « Lisse », de l'autre les valeurs positives qui correspondent aux descripteurs « Rugueux », « Texturé », « Relié », « Chaud » et « Tiède ». Sur l'axe vertical, la division se fait au niveau de l'accroche ressentie et de la dureté ressentie des surfaces. Les valeurs positives de la dimension 2 correspondent aux descripteurs « Glissant » et « Dur » tandis que ses valeurs négatives correspondent aux descripteurs « Accrochant » et « Mou ». Finalement, dans le plan (Dim2,Dim3), l'axe vertical semble opposer les échantillons type « Métallique » et ceux type « Céramique ». Ces aspects correspondent à un ensemble de sensations qui renvoient à un type de matériau particulier. La dimension 3 semble donc différencier les échantillons selon les qualités associées aux matériaux.

La Figure 76 permet également d'obtenir des informations sur le caractère hédonique de la perception tactile. En effet, douze sujets ont indiqué de leur propre initiative leur appréciation du toucher pour certains échantillons, allant d' « agréable » à « désagréable » en passant par le mot « neutre », décrit par les sujets comme une absence de sentiment particulier

vis-à-vis de l'échantillon. La position des mots « agréable » et « désagréable » donne des indices sur les préférences des sujets pour le groupe d'échantillons testé. Ici, le mot « agréable » se trouve proche des descripteurs « froid », « glissant », « lisse » et « dur » tandis que le mot « désagréable » est plus proche des descripteurs « chaud », « accrochant », « rugueux / reliéfè » et « mou ». Dans l'ensemble, les échantillons en acier inoxydable et en céramique ont ainsi été perçus plus positivement au niveau du toucher que les échantillons en polymère.

Au vu de ces graphiques, les différentes dimensions n'expliquent pas clairement un seul type de sensation, mais plutôt des paires de sensations. La dimension 1 semble discriminer les échantillons selon des sensations évoquées de rugosité et de température tandis que la dimension 2 selon des sensations évoquées de dureté et d'accroche. Cela montre une des limites de cette étude : la perception tactile se base sur un nombre assez important de caractéristiques propres à chaque couple sujet/terme (rappel que la perception reste très subjective), et demander une configuration sur un plan en deux dimensions constraint le sujet à choisir les caractéristiques qu'il pense être les plus remarquables pour différencier les surfaces. Ainsi, ce genre d'épreuve avec des conditions très libres va donner lieu à des configurations dépendant non seulement des sensations éprouvées par les sujets, mais également de leur capacité d'organisation et de synthèse. Finalement, la dernière représentation fournit des informations sur les critères utilisés par chaque sujet pour construire leur configuration.

#### 4.2.2.6) Représentation des sujets

L'importance des facteurs mis en évidence par la représentation des échantillons varie d'un sujet à l'autre. La Figure 78 s'interprète dans le cadre du modèle INDSCAL (pour *Analysis of Individual Differences in Multidimensional Scaling*), qui permet de décrire une situation où plusieurs personnes décrivent leur perception des proximités d'un ensemble d'objets au moyen d'une matrice de similarités ou de distances [ESC,08]. Dans ce modèle, chaque sujet a pour coordonnées le long d'un axe le poids qu'il accorde à cette dimension dans sa configuration. Ce poids est toujours positif : il vaut au maximum 1, valeur atteinte lorsque la dimension de la configuration « commune » (fournie par l'AFM) coïncide avec la direction d'inertie maximum du sujet [STR,09].

Selon la Figure 78, le premier sujet (P1) se trouve le plus lié aux deux axes, il a donc fourni une nappe proche de la nappe « moyenne » de l'AFM, à une rotation ou une homothétie près. Les sujets 16 et 22 ont accordé beaucoup d'importance au premier axe tandis que le sujet 12 semble s'en être détaché. Cette représentation permet également de mettre en exergue la subjectivité de la tâche demandée : chacun perçoit et organise ses sensations à sa manière. Au

vu de la variabilité rencontrée lors de cette épreuve, il est inutile de raisonner sur des valeurs absolues car l'étude reste exploratoire et recherche plutôt des tendances dans le rapprochement entre données sensorielles et instrumentales. Les paramètres retenus lors des essais instrumentaux vont par la suite être comparés aux dimensions relevées lors du napping afin de voir si l'outil tribologique permet de traduire à une certaine échelle ces données sensorielles.

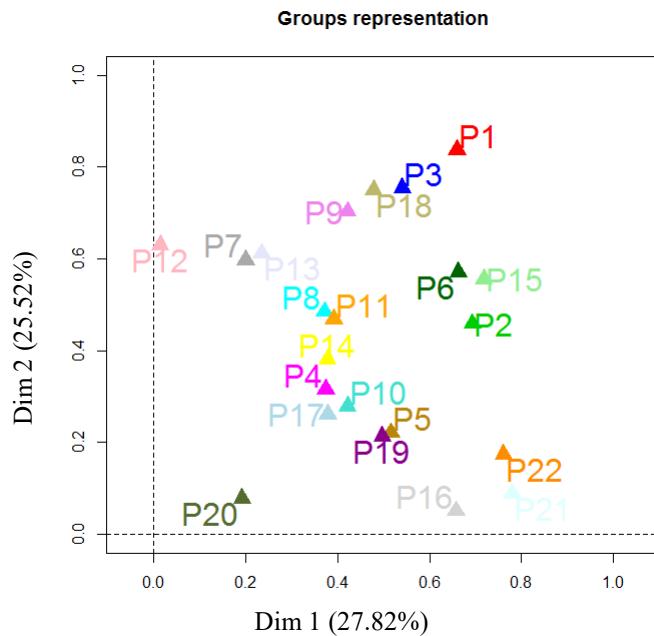


Figure 78 : Représentation des 22 sujets

#### 4.2.3) Discussion autour des résultats des mesures instrumentales et sensorielles

L'objectif de cette seconde étude exploratoire était de déterminer si des données instrumentales issues d'essais tribologiques pouvaient donner des informations sur une partie des sensations tactiles procurées par une surface. Après avoir développé les résultats des essais instrumentaux et ceux du napping, les coefficients de corrélation entre les deux premières dimensions calculées par l'AFM avec les données de l'épreuve de napping et les paramètres mesurés avec le tribomètre et le profilomètre peuvent être déterminés, sur la base des huit échantillons communs aux deux tests : EEP515\_1, EEP5500\_1, EEP2015\_1, EEP40500\_1, PSA0, PSA83, MICRO et RECT.

##### 4.2.3.1) Relations entre les paramètres instrumentaux et les données sensorielles

Le Tableau 13 recense ces coefficients.

	Fs	Fd	Ps	Ao	Rq
Dimension 1	-0.13	-0.05	0.12	0.03	0.78
Dimension 2	0.74	0.75	0.76	0.61	0.58

Tableau 13 : Coefficients de corrélation entre les dimensions calculées par l'AFM et les données instrumentales pour les échantillons communs aux deux tests

Pour rappel, la représentation des mots indiquée en Figure 76 montre que la dimension 1 différencie les échantillons selon les termes « lisse », « reliéfé », « rugueux » et « texturé » et aussi selon les termes « chaud » et « froid ». Ici, cette dimension présente un coefficient de corrélation de 0.78 avec le paramètre Rq mesuré (rugosité quadratique moyenne). Les quatre premiers paramètres ne sont par contre pas corrélés avec elle : le tribomètre ne permet pas d'expliquer cette dimension. La dimension 2 différencie quant à elle les échantillons selon les termes « glissant » et « accrochant » d'une part, puis « dur » et « mou » d'autre part. Elle présente un coefficient de corrélation de 0.74 pour le paramètre Fs (coefficient de frottement statique), 0.75 pour le paramètre Fd (coefficient de frottement dynamique) et 0.76 pour le paramètre Ps (coefficient de la pente en régime statique). Le paramètre Ao (amplitude des oscillations de relaxation) reste faiblement corrélé à la deuxième dimension, à hauteur de 0.61, et le paramètre Rq encore un peu moins, à hauteur de 0.58. Cette dimension ne présente pas une pareille dichotomie dans ses relations avec les paramètres de frottement et de relief. Cela vient très probablement du phénomène soulevé dans la première étude, à savoir que la sensation d'accroche résulte du déplacement de la peau sur la surface du matériau, faisant intervenir une multitude de facteurs : pression exercée, vitesse de glissement, aire de contact... Ces paramètres sont fixés pour le cas de la mesure tribométrique, mais le geste n'a pas été contrôlé (volontairement) lors du napping. De plus, l'évaluation de la perception tactile d'une surface s'effectue grâce à une exploration haptique dynamique où le sujet va modifier ces différents paramètres pour affiner sa perception [SMI,02]. Finalement, le recueil des quatre différents paramètres Fs, Fd, Ps et Ao ne trouve pas de justification suite à ces résultats : il n'est pas possible de déterminer quel paramètre représente quoi, lequel garder, lequel exclure. Le Tableau 14 révèle leur matrice de corrélation. Dès lors il est possible de remarquer que les paramètres Fs et Fd sont quasiment proportionnels et assez bien corrélés avec le paramètre Ps. Cette matrice de corrélation reposant sur huit échantillons plutôt similaires est très différente de celle calculée lors de la pré-étude, illustrée dans le Tableau 8 et reposant sur 38 échantillons très différents.

	<b>Fs</b>	<b>Fd</b>	<b>Ps</b>	<b>Ao</b>
<b>Fs</b>	1	0.94	0.78	0.42
<b>Fd</b>	0.94	1	0.74	0.43
<b>Ps</b>	0.78	0.74	1	0.77
<b>Ao</b>	0.42	0.43	0.77	1

Tableau 14 : Coefficients de corrélations entre les paramètres de frottement pour les huit échantillons communs

Il existerait éventuellement d'autres paramètres pouvant être récupérés sur les courbes de frottement, comme par exemple les harmoniques des oscillations en régime dynamique, grâce à une transformation d'une partie du signal correspondant au régime dynamique « stable » dans le spectre fréquentiel, voire spatial (pour observer les longueurs d'onde). Ce paramètre a essayé d'être relevé grâce à des logiciels de traitement de signal, comme Matlab ou MountainsMap, durant l'étude préliminaire. Hélas, le bruit du aux différentes vibrations du mécanisme ou à l'électronique elle-même empêchait d'isoler des pics d'amplitude remarquables. De plus, faute de savoir dans quelle tranche de fréquences regarder, l'idée a été mise de côté. L'amélioration du tribomètre pour l'étude approfondie est censée avoir réduit ce bruit, mais cette voie n'a pas été suivie faute de temps. Cela reste tout de même un élément potentiellement intéressant à regarder, car il semblerait que les oscillations de relaxation visibles à l'œil nu sur les courbes de frottement soit spécifiques à chaque surface. Pour l'heure, seule l'amplitude de ces oscillations a été retenue, mais son utilité reste peu connue.

Ici, l'objectif lancé par cet axe de recherche était de questionner l'idée qu'une méthodologie instrumentale basée sur la tribologie était possible pour l'évaluation d'une partie de la perception tactile, à savoir la sensation d'accroche (ou inversement de glissement). De nombreux indices récoltés lors de l'étude préliminaire et de cette étude approfondie montrent qu'il existe une tendance dans les données tribologiques à expliquer une partie des résultats issus d'évaluations sensorielles. Maintenant, il n'y a pas eu de lien fort trouvé entre les paramètres physiques de frottement et les réponses sensorielles chez l'humain. Autrement dit, il n'a pas été possible avec le protocole mis en place de déterminer un lien entre les différentes données issues des courbes de frottement et une sensation particulière, comme par exemple le caractère accrochant d'une surface. Cet exemple est naturellement contre-intuitif, car l'un pourrait penser que l'accroche est liée au simple frottement, mais cela montre que le problème de la mesure de la perception est plus complexe que prévu. La littérature présente plusieurs auteurs se heurtant au problème de la mesure du toucher tangentiel, preuve que la solution ne

résidé pas dans la compilation de mesures instrumentales [CRO,02][CRO,04][CHE,09B] [HOL,93].

#### 4.2.3.2) Comparaison avec une autre étude tribologique : le référentiel Sensotact®

Malgré cette absence de résultats probants avec le protocole utilisé, il semble pourtant possible d'utiliser le tribomètre pour une application plus contrôlée et dirigée en lien avec la caractérisation de la perception « glissante », comme indiqué par Crochemore et al. [CRO,04]. En effet, les auteurs révèlent qu'il existerait une fonction de transfert polynomiale entre le coefficient de frottement et l'intensité du descripteur « glissant », illustrée en Figure 79. Dans leur étude, ils utilisent un tribomètre développé spécialement pour la caractérisation tribologique de matériaux divers, mais cette fois-ci directement en contact avec la peau (sans faire appel à un antagoniste textile, comme ici). Ils mesurent donc directement les forces de frottement orthogonales et tangentielle lors du toucher de l'échantillon avec la pulpe du doigt. Leurs tests se sont effectués sur les matériaux du référentiel Sensotact®, et les mesures de frottement ont été comparées avec les mesures sensorielles respectives de ce référentiel. Il semble que les panélistes aient différencié les surfaces comprises entre les notes 30 à 70 alors que le coefficient de frottement leur est similaire. Ainsi, l'humain perçoit des différences au niveau de la sensation d'accroche quand l'instrument de mesure indique des valeurs équivalentes, signifiant que d'autres paramètres psychophysiques rentrent en jeu, comme éventuellement la topographie de la surface. Cela corrobore les résultats obtenus dans ce chapitre.

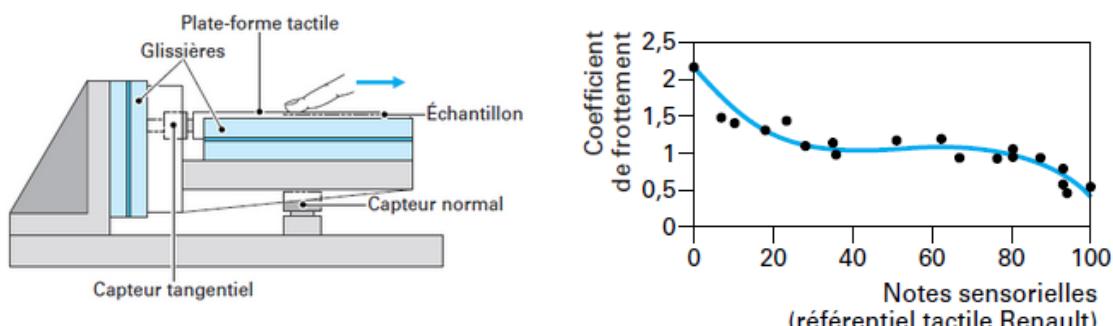


Figure 79 : Tribomètre Renault SAS utilisé pour la recherche de corrélation entre coefficient de frottement et la perception glissante [CRO,04]

#### 4.2.3.3) Perspective de développement pour le « tribomètre sensoriel »

Au vu de ces éléments, il apparaît qu'un développement du « tribomètre sensoriel » est possible. Alors que les études présentées dans ce chapitre étaient plutôt à visée exploratoire, il est possible de travailler cette fois-ci dans un but de validation de la qualité de production d'une

surface. Dans la même idée qu'un profil de rugosité est utilisé pour vérifier l'état de surface d'un matériau suite à sa production, il serait possible, pour un groupe d'échantillons spécifique et contrôlé, d'utiliser les mesures tribologiques pour vérifier la « bonne sensation » en toucher tangentiel d'une surface. L'utilisation d'un référentiel élaboré en collaboration avec un panel sensoriel expert permettrait de graduer différents niveaux pour le descripteur « accrochant », selon la méthode du profil sensoriel analogique par exemple [BA2,09]. L'objectif sera alors de « calibrer » le tribomètre suivant les données sensorielles, soit d'orienter la mesure instrumentale selon les mesures sensorielles. Il n'a pas été possible durant cette recherche de collecter suffisamment d'échantillons de même nature (mêmes dimensions mais avec un « gradient d'accroche ») pour faire véritablement appel à un panel expert et donc créer ce référentiel. Pour l'heure, il a été vérifié que les mesures effectuées avec le « tribomètre sensoriel » étaient reproductibles et répétables, puis étaient spécifiques et caractéristiques de chaque déplacement de l'antagoniste utilisé sur les surfaces testées.

#### 4.2.3.4) Réflexion épistémologique sur la mesure de la perception

Ces mesures instrumentales restent au niveau d'une quantification d'un phénomène mécanique intervenant lors de la mise en interaction de deux objets dans un environnement bien spécifié. Dans le cas où au moins l'un de ces deux objets est un sujet humain, la question de ce qui est réellement mesuré se pose. Dans le chapitre développant les bases de l'évaluation sensorielle (partie 1.2.3) Aspects méthodologiques de l'évaluation sensorielle), il a été vu qu'il était possible pour les sujets suffisamment préparés et entraînés de qualifier (qualité) et de quantifier (intensité) de façon répétable et reproductible certaines sensations pour un référentiel déterminé (pour rappel, toute sensation est relative). Lorsqu'il s'agit de donner leur ressenti affectif (la valeur hédonique de l'expérience sensorielle vécue), l'entraînement est inutile : tout le monde sait dire s'il apprécie ou non telle ou telle expérience. Il est alors convenable d'affirmer que l'instrument de mesure, la machine, et l'humain, ou l'organisme vivant et sentant en général, opèrent sur deux registres différents. L'instrument de mesure appartient au registre absolu, physique, réductionniste, dans le sens où il ne prélève qu'une partie isolée de l'information du phénomène. L'organisme vivant et percevant, d'un autre côté, appartient au registre relatif, « psycho-bio-physiologique », il est complexe dans le sens donné par Morin [MOR,77]. Il est composé d'une « extrême quantité d'interactions et d'interférences entre un très grand nombre d'unités », comprenant « des incertitudes, des indéterminations, des phénomènes aléatoires » [MOR,05]. Morin parle du principe de la boîte noire (*black box*) lorsque l'observateur essaie de contourner cette complexité en la mettant en parenthèse : « on

considère les entrées dans le système (*inputs*) et les sorties (*outputs*), ce qui permet d'étudier les résultats du fonctionnement d'un système [...] sans entrer toutefois dans le mystère de la boîte noire. Or, le problème théorique de la complexité, c'est celui de la possibilité d'entrer dans les boîtes noires. C'est considérer la complexité organisationnelle et la complexité logique ».

Pour ramener cette vision du monde à cette recherche, le protocole expérimental utilisant une machine comme instrument de mesure et mise en place dans un laboratoire isolant le phénomène du toucher d'une surface va en quelque sorte essayer de remplacer la « boîte noire humaine » pour essayer d'expliquer ses *outputs* en fonction d'*inputs* réduits. L'observation s'assimile alors à une opération réductrice, ramenant un problème complexe (qu'est la perception) à un mécanisme « simplifié ». Il a été vu précédemment que la perception était effectivement un mécanisme complexe organisé selon une très grande quantité d'interactions psychophysiologiques et dépendant de très nombreux facteurs subjectifs. De ce point de vue, il est donc clair qu'essayer de mesurer directement la perception est une impasse, car il y a une énorme perte d'informations dans le processus d'observation. Cependant, les sensations, elles, se situent à un niveau de complexité plus faible (s'il est possible de graduer la complexité) car situées plus en aval dans le processus perceptif. Les mesures instrumentales, lorsqu'elles sont effectuées pour essayer d'expliquer le « senti », doivent alors rester au niveau de la mesure de propriétés organoleptiques de l'objet (qui vont produire les sensations), et non de la perception, qui elle est plus globale et nécessite de prendre plus de recul, et de faire appel à d'autres méthodes et d'autres disciplines. L'étude devient ainsi transverse, transdisciplinaire, et en appelle à des méthodes qualitatives, propres aux sciences humaines. A la différence des méthodes quantitatives, qui utilisent des outils d'analyse mathématiques ou statistiques en vue de décrire, d'expliquer et de prédire des phénomènes au moyen de variables mesurables (approche réductionniste), les méthodes qualitatives recherchent, explicitent et analysent des phénomènes visibles ou cachés qui ne sont par essence pas mesurables. Ces phénomènes ont les caractéristiques spécifiques des « faits humains » [MUC,91]. L'étude de ces faits humains est réalisée avec des techniques de recueil et d'analyse qui, échappant à toute codification et programmation systématique, reposent essentiellement sur la présence humaine et la capacité d'empathie, d'une part, et sur l'intelligence inductive et généralisante, d'autre part. Conjointement utilisées, les méthodes quantitatives et qualitatives se renforcent l'une et l'autre, la première permettant d'exprimer avec précision et de rendre vérifiables des idées qualitatives, et inversement la deuxième permettant d'interpréter les nombres fournis par la première.

Ici, la « tribologie sensorielle » reste une hypothèse qui a pour but un arbitrage quantitatif sur certaines propriétés organoleptiques des matériaux, dont l'importance sera déterminée en amont grâce une identification des besoins sensoriels pour l'objet à concevoir (selon la méthode ZOES par exemple, [BA2,09], p. 273). La littérature atteste le fait que le frottement superficiel a un rôle distinct dans la perception du confort et de l'inconfort lors de l'utilisation d'un produit [VAN,13], mais il ne peut y avoir de pont direct entre la mesure instrumentale et cette perception. Des mesures tribologiques ne pourront donc avoir la prétention de déterminer des propriétés de confort, appartenant au registre qualitatif, lorsqu'elles-mêmes appartiennent au registre quantitatif. Ces dernières, faisant intervenir la dimension hédonique de la perception, englobent une multitude de paramètres dépassant naturellement le champ même de la tribologie, voire, pour aller plus loin, de la métrologie en général (qui s'insère dans une approche réductionniste). Le napping a pu donner quelques indications sur le caractère hédonique de certains touchers, avec la position des descripteurs « agréable » ou « désagréable » dans la configuration calculée par l'AFM, mais ces données ne peuvent être généralisées. En effet, l'expérience en laboratoire ne représente pas les conditions réelles d'utilisation ou d'interaction avec l'objet. Ce qui peut seulement être dit est que les sujets ont eu tendance à plus apprécier tel toucher qu'un autre dans les conditions de l'expérience.

Cette expérience exploratoire montre toute la complexité d'une recherche de complémentarité entre une approche instrumentale et une approche sensorielle. Cependant, lorsqu'un produit est conçu et que son profil sensoriel a été établi, les résultats de cette étude indiquent qu'une traduction des données tribologiques en propriétés tactiles attendues peut se trouver. Il faudra néanmoins travailler sur une différenciation maîtrisée car il n'existe pas de corrélation générale. De plus, il est tout à fait vain de chercher une approche instrumentale pour évaluer les perceptions des sujets (et par conséquent des utilisateurs), car ces dernières ne dépendent pas que des propriétés organoleptiques des objets. Pour trouver la solution, il faut chercher plus loin qu'en laboratoire, et compléter la réflexion en abordant une approche « holistique », permettant d'avoir une vue d'ensemble sur l'interaction. Cela amène à la deuxième partie de la problématique de recherche, à savoir l'identification des attentes des passagers en termes de confort, pouvant possiblement donner des informations sur les propriétés de confort éventuellement recherchées pour les matériaux composant les appuis et maintiens dans l'habitacle. Le chapitre suivant proposera de prendre du recul sur le contexte du transport public urbain. Il faudra revenir à la notion de confort même et comprendre comment des études transdisciplinaires, aujourd'hui notamment menées en ergonomie, permettent de l'évaluer et de l'améliorer.

## Conclusion du chapitre 2

L'objectif de ce chapitre était d'étudier la pertinence d'un outil instrumental pour la mesure de sensations tactiles en toucher tangentiel, appelé « tribomètre sensoriel ». Pour répondre à cette problématique, trois séries d'essais ont été effectuées.

La première a consisté à valider dans un premier temps la reproductibilité et la répétabilité du tribomètre utilisé (fidélité du mesurage), à travers la mesure du frottement de surface de plusieurs avant-bras. Les premiers résultats ont montré que le tribomètre permettait d'obtenir des courbes de frottement caractéristiques pour chaque individu, ce de façon relativement fidèle.

Suite à cette validation, un panier de 43 échantillons a été constitué pour tâcher de regrouper les différents types de matériaux pouvant se retrouver dans l'aménagement intérieur des matériels roulants urbains (textile, plastique, métal...). Une nouvelle série d'essais tribologiques a été effectuée sur ces échantillons. A côté de celle-ci, une épreuve simple de tri a permis de classer les différents échantillons selon des ordres d'intensité pour trois descripteurs tactiles : accrochant, adhérent et lisse. Le tribomètre a permis de différencier d'une certaine façon les différents types de matériaux testés, chacun d'eux présentant des propriétés tactiles spécifiques. Afin d'investiguer plus en détail cette différenciation, le nombre d'échantillons a été réduit et la méthodologie pour l'obtention de données sensorielles a été revue.

Le dernier groupe testé comportait 12 échantillons. Un profil de rugosité a été effectué pour compléter les données tribologiques. Du côté des données sensorielles, le choix s'est porté sur une épreuve qualifiée d'holistique nommée « napping », en vue de mettre de côté la difficulté liée au choix des descripteurs tactiles à évaluer mais également de comprendre comment des personnes « naïves » percevaient tactilement les surfaces. Dans les conditions de cette dernière étude, il a été vu que les sensations tactiles les plus flagrantes pour elles étaient le relief, la chaleur, l'accroche et la dureté du matériau. Un coefficient de corrélation plus important que dans l'étude précédente (à hauteur de 0.75) a été calculé entre les paramètres physiques mesurés par le tribomètre et le paramètre sensoriel associé au terme « accrochant » indiqué par les sujets. Cela semble montrer qu'une partie de l'information sensorielle peut effectivement être obtenue grâce à cette instrumentation. Ainsi, il est possible d'envisager une suite pour l'utilisation du « tribomètre sensoriel » pour la caractérisation de surfaces, pour des conditions très spécifiques qui devront être revues relativement aux produits testés.

Il apparaît finalement qu'une méthode instrumentale peut éventuellement permettre la mesure de certaines propriétés organoleptiques d'un produit (associées à des sensations

monodimensionnelles), mais ne pourra jamais caractériser sa perception. En effet, la perception est très complexe et prend en compte une multitude de sensations, mais également des caractéristiques propres à chaque individu, qui sortent complètement du champ de la métrologie. La métrologie, par son essence réductionniste, fractionne l'objet de mesure en éléments plus fins, monodimensionnels, et ne permet pas de rendre compte de l'entièvre complexité d'un phénomène comme le toucher. Il faut alors coupler cette démarche à des méthodes qualitatives (voire « holistiques » dans le cas du napping) pour aller chercher ces données manquantes, à la limite entre conscient et inconscient, verbalisable et non-verbalisable.

# Chapitre 3 : Vers une nouvelle représentation du confort pour le domaine des transports publics urbains

## Introduction

Le confort est devenu d'une certaine façon le St Graal de l'époque moderne. Il est mystérieux, changeant, il n'a pas de véritable forme, pas de définition précise, au mieux il ne peut être qu'approché, pour finalement s'enfuir passé un certain temps en sa présence. Pour les concepteurs, la quête du confort est l'assurance d'un produit qui se vendra, elle mène à une corne d'abondance où les consommateurs iront puiser. L'ingénierie anthropocentrale fait le pari que mettre l'humain au cœur du processus de conception permet entre autres de mieux appréhender le confort d'usage du produit.

Aujourd'hui, le confort reste un concept mal défini et peu maîtrisé. Il ne s'agit pas d'un paramètre pouvant être mesuré directement, car c'est une réponse complexe, personnelle et subjective, à une situation donnée. Cependant, le confort peut être étudié et évalué jusqu'à un certain point, à travers des « modèles de confort ». Pendant longtemps, le confort n'était pas une priorité dans les transports publics urbains (TPU). Les passagers y passent généralement peu de temps, comparé aux transports à plus longue distance comme les trains à grande vitesse ou les avions, et ils n'y ont pas forcément de place assise qui leur est attribuée personnellement. Dans ce contexte, le confort est alors plutôt considéré comme lié à la fréquence de passage, au niveau de fréquentation ou à l'accessibilité des véhicules, ou encore (et surtout) à la disponibilité de places assises à l'intérieur. Maintenant, la question qui se pose est : comment le design intérieur du matériel roulant peut-il améliorer le confort des passagers ? Actuellement, l'effort se porte en grande majorité sur l'étude de formes d'assises confortables (les sièges), laissant souvent de côté les autres formes d'appui, comme les barres ou autres supports. La littérature scientifique s'intéresse principalement à la position assise, à une échelle individuelle et quasiment isolée (l'utilisateur seul sur le siège), mais il existe très peu d'études concernant ce qu'il se passe réellement dans les TPU. Des observations menées par Stéphanie H. Gosset dans diverses villes du monde ont montré que chaque voyageur développe en effet une stratégie pour être assis dans un TPU, mais dans la plus « inconfortable » des situations, la majorité des passagers reste tout de même debout, ou au moins non assise sur un siège. La réflexion

entreprise dans cette recherche va chercher à prendre en compte cette majorité non assise, de manière à s'interroger sur la possibilité de fournir un « confort debout ».

Ce dernier chapitre proposera une approche holistique pour aborder cette problématique spécifique aux TPU. Le confort est un concept qui sera vu comme principalement étudié dans le domaine de l'ergonomie, mais ce travail basé sur une approche sensorielle essaiera d'aller plus loin que le cadre ergonomique et d'interroger d'autres disciplines. Compte tenu de l'immensité du problème qui demanderait plusieurs thèses pour en explorer tous les recoins (et encore !), le travail présenté ici ne prétend qu'introduire une base de connaissances à l'attention des concepteurs de transport public pour approcher la problématique du confort d'une façon globale à l'intérieur du matériel roulant urbain, centrée sur l'objet « appui ».

L'objectif de ce chapitre est dans un premier temps de comprendre d'où vient ce terme « confort » et ce qu'il signifie aujourd'hui. Une première partie concernera la mise en place d'un paradigme du confort, à travers l'évolution de cette notion et sa définition actuelle. La suite s'intéressera à la construction de représentations modernes du confort pour la conception de produits, à travers une présentation chronologique des modèles tirées d'études ergonomiques. Finalement, la dernière partie montrera que le contexte particulier des TPU pousse à élaborer de nouvelles représentations qui permettront d'appréhender de façon structurée la question du confort sur deux niveaux : un niveau local, centré sur l'interaction même entre l'usager et le support, puis un niveau global, situant l'interaction dans le contexte d'un déplacement en milieu urbain. Ces deux propositions reprennent l'idée d'un confort du corps individuel, sensoriel, et du corps social, lié à une suite d'actions.

## 5) Mise en place d'un paradigme du confort

De nos jours, le confort est un véritable argument de vente, qu'il est possible de retrouver sur quasiment tous les types de produits. Il se décline dans un nombre incalculable de situations et de contextes, au point qu'il se trouve partout. Seulement, comme le disait Sénèque : « *Nusquam est qui ubique est.* » (« N'est nulle part celui qui est partout »). Qu'en est-il réellement du confort dans la société moderne ? À quoi fait-il référence ? Au début des années 90, Le Goff démontrait comment la vague du confort s'était emparée de l'espace public, incluant les TPU [GOF,94]. Aujourd'hui, ce concept est devenu clé pour le design intérieur des matériels roulants, car il impacte la qualité des interactions entre les passagers et le service de transport, pour la plupart de façon quotidienne. La littérature traitant du confort pour le domaine des TPU est plutôt rare, car la majorité des publications concerne principalement la notion de

confort pour la position assise dans des environnements de travail ou les transports à longue distance. Cependant, il apparaît que certains aspects du confort peuvent être généralisés, permettant une base théorique commune pouvant être par la suite adaptée à chaque situation, jusqu'à un certain point.

Dans cette partie, une première revue historique du confort sera effectuée, afin de montrer que ce concept est très ancré dans le temps et la société. Des définitions globales lui ont été données, explicitant le fait que le confort résulte d'une interaction entre trois entités : le sujet, l'objet et le contexte d'interaction. Ce fameux triptyque est le marqueur de la complexité du confort, chacun de ses piliers possédant ses propres caractéristiques, et leurs interrelations étant parfois difficiles à identifier clairement. Cependant, grâce à ce « noyau dur », certains chercheurs en ergonomie ont su s'approprier ce concept et l'appliquer à un contexte spécifique : le confort d'assise. En travaillant sur l'interaction entre l'individu et le siège sur lequel il va s'asseoir pour accomplir une certaine tâche, ils ont proposé des représentations pour la perception du confort et de l'inconfort, appelées alors « modèles de confort ». Ceux-ci permettent de mettre en lumière les différents facteurs influençant l'une ou l'autre perception, donnant alors des outils pour savoir où porter l'effort de conception en vue d'améliorer le confort d'usage du produit.

## 5.1) A la poursuite du confort

Le terme « confort » est un mot ancien, mais sa signification a évolué avec le temps, il se trouve profondément lié aux sociétés observées. Sa première trace écrite date du XI<sup>ème</sup> siècle, dans le poème épique « La chanson de Roland », sous le terme en vieux français « *cunfort* » (laisse 146, verset 1941), venant du verbe latin « *confortare* » (« *cum fortis* », avec force), signifiant à cette époque : encourager, consoler, aider, renforcer. Tombé en désuétude à partir du XVII<sup>ème</sup> siècle en France, le terme « *comfort* » refait surface du côté de la bourgeoisie anglaise pendant le XVIII<sup>ème</sup> siècle, signifiant alors « bien-être matériel ». Il s'agit du premier sens moderne du mot confort. De nos jours, il s'agit de plus qu'un mot, c'est un concept qui a su évoluer et suivre le développement de la société moderne. Afin de mieux comprendre cette notion, il faut dans un premier temps s'intéresser à son évolution sémantique, qui emmènera vers sa définition globale.

### 5.1.1) Évolution sémantique du confort : une brève histoire de la France moderne

Le confort tel qu'il est connu aujourd'hui n'a pas toujours été ainsi. Le Goff a su offrir une excellente généalogie du confort basé sur l'histoire de la société moderne en France

[GOF,94]. L'histoire remonte aussi loin que la Révolution Industrielle, au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle. À l'époque, l'hygiène était une problématique pour les classes sociales basses : les épidémies de choléra en 1832 et 1849 en sont les effets les plus marquants. En 1840, le médecin français Louis René Villermé, pionnier de la médecine du travail, dénonçait notamment l'étendue du mal et le prix de l'inconfort pour les classes défavorisées dans son œuvre « *Tableaux de l'état physique et moral des salariés en France* ». Ces événements désastreux ont renforcé la préoccupation hygiénique et ont mené à une loi sur les logements insalubres en 1850. L'État français était dorénavant en charge de la protection de la santé publique. Le besoin de prendre soin des « laissés pour compte » était devenu de plus en plus important pour éviter une rupture de la croissance économique et un effondrement du marché du travail. Le confort était alors un élément de régulation sociale, prenant en compte l'expression « la résistance d'une chaîne ne dépend que de son maillon le plus faible ». De 1850 à 1930, la mise en place d'un « confort minimum » a permis de fournir l'eau courante et le chauffage à un grand nombre de logements. Par la suite, à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, le taylorisme (organisation scientifique du travail) marqua le début de l'ère de la société de consommation et une mécanisation du confort. Il était dans ce cas synonyme de gain de temps, de moindre effort. Entre les années 1945 et 1973, période appelée les « Trente Glorieuses », la prospérité de l'après-guerre offrait la base pour une normalisation du confort. Il n'était alors plus question de luxe, mais de performance, comment faire les choses plus vite et plus facilement. Au final, les gens ne répondaient plus vraiment à leurs besoins primaires, car ceux-ci étaient devenus un problème social principalement résolu par l'État. Un nouveau seuil avait été franchi : les gens devaient répondre à des besoins secondaires, devenir meilleurs, avoir une vie facilitée par l'achat de prothèses techniques. Comme l'énonçait Le Goff : « le besoin n'exprime plus le cri du manque mais le désir de nouveau ». Cette rupture, symbole de la modernité, implique que le confort était devenu une nouvelle nécessité individuelle. Ensuite, le développement du capitalisme a mené à une crise majeure après 1973. Les dégâts sociaux engendrés par le fort développement industriel, le « tout-voiture » et cette nouvelle société industrielle ne pouvaient plus être négligés. La congestion automobile, la pollution, le bruit, les « cadences infernales », les inégalités sociales, la destruction environnementale ont été le prix du progrès. Cette société du confort quantitatif, retournant vers le luxe, ne pouvait plus continuer ainsi. Il s'avère que plus une société gagne en confort, plus l'inconfort devient insupportable. Hegel avait noté cette tendance dès 1820 quand il écrivit dans « *Elements of the Philosophy of Right* » : « Ce que les Anglais appellent « *comfortable* » est quelque chose d'interminable et d'inépuisable. Chaque confort atteint finit à son tour par faire la preuve de son inconfort, si bien que ces inventions n'ont pas de fin. C'est

pourquoi le besoin est produit non pas tant par ceux qui l'éprouvent de manière immédiate, mais plutôt par ceux qui cherchent à réaliser un gain en le faisant naître » (§191). L'inconfort rencontré dans l'espace public est entré en conflit avec le confort de l'espace privé. Ainsi, le confort, qui était surtout restreint à la sphère privée et intime, au foyer, s'est étendu à la vie collective et à la sphère publique, menant au développement de « l'être ensemble ». En fait, il s'avère que la société moderne occidentale repose sur un paradoxe fondateur, celui de la contradiction entre le confort matériel individuel et le « confort collectif d'harmonie » (qualité de vie). Cela a donné lieu à de nouveaux territoires pour le confort : outre l'espace privé (le logement), il a atteint l'espace semi-public (la voiture) et l'espace public (hôpitaux, administration, transports en commun).

De nos jours, le confort est utilisé comme une valeur ajoutée aux produits, il devient un enjeu en lui-même. Le confort vend. Dans le cas de produits « privés », c'est évident, mais pour les biens publics, cela l'est beaucoup moins. Les TPU ne sont pas une exception : comme l'accès à la ville est devenu une problématique politique et économique, une solution était nécessaire pour réduire les embouteillages et la pollution automobile dans les centres-villes, tout en améliorant la mobilité. Comme Le Goff l'avait remarqué, les TPU demeuraient encore un territoire vierge en matière de confort. Ce n'était pas leur objectif premier, considéré le peu de temps que les passagers y passent : leur fonction première est le déplacement pur et simple. En effet, y enlève-t-on simplement son manteau durant un trajet ? L'enjeu en matière de confort y est différent que dans l'automobile, car la thématique du « chez-soi » ne tient plus. Depuis environ deux décennies, une nouvelle façon de penser a émergé pour le design des réseaux ferroviaires et des matériels roulants. Les enjeux d'aujourd'hui sont d'attirer plus de passagers en leur proposant une meilleure « expérience passager », qui passe inévitablement par une meilleure compréhension du confort de la part des constructeurs et opérateurs ferroviaires.

### 5.1.2) Vers une définition moderne du confort

La partie précédente a montré que le confort pouvait adopter des formes et significations variées. Le Goff lui donne la définition globale suivante : « le confort est le rapport qui s'instaure entre l'homme et son environnement, que celui-ci soit matériel ou spirituel » ([GOF,94], p. 196). Ce rapport peut être de deux sortes. Premièrement, il mentionne l'idée d'un « confort de l'éphémère » ou « confort instantané », relié à l'hédonisme, au corps individuel. Il s'agit fondamentalement d'une recherche de satisfaction immédiate ou de bien-être psychophysique : le confort est ici une finalité en soi. Cette relation est la plus ancienne, car cette « quête du confortable » est quelque peu commune à toutes les cultures, chacun

développant ses propres « besoins ». Le second rapport est plus récent, il se rattache à la modernité. Il peut être nommé le « confort du corps social », relié à ce que Le Goff appelle un certain « néo-taylorisme ». Il réfère à une rationalisation du plaisir, à une « chaîne confortable ». Ce n'est plus un but à atteindre, mais un moyen d'accomplir d'autres tâches « plus facilement ». La Figure 80 schématise ces relations, introduisant le triptyque Sujet – Objet – Contexte.

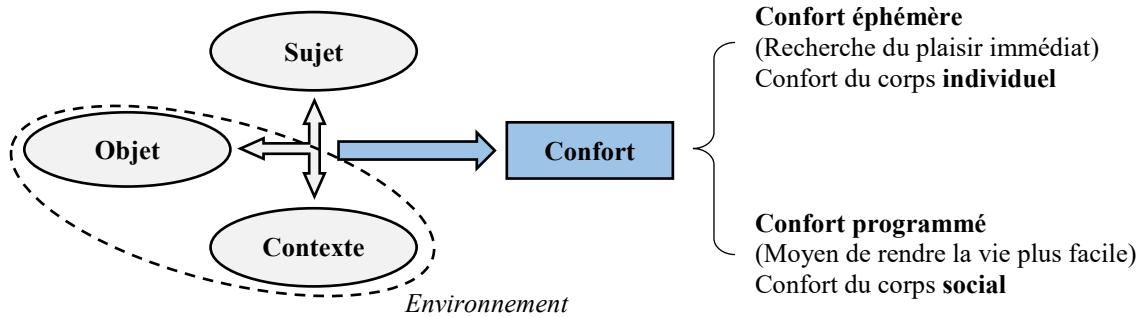


Figure 80 : Définition globale du confort selon [GOF,94]. L'objet n'est pas à prendre au sens de chose matérielle, mais plutôt comme ce qui est opposé au sujet, ce qui peut être perçu, pensé ou voulu, qu'il soit matériel ou spirituel. Il peut s'agir donc d'un événement, d'un agent ou d'un objet, pour faire un lien avec la théorie cognitiviste des émotions vue dans la partie 2.2.2) Notion d'émotion.

Ces deux faces inhérentes au confort montrent qu'il n'est pas seulement lié au corps de l'individu, mais aussi à ses pratiques. Il se construit à travers l'expérience, dans un contexte particulier. Pour résumer, comme l'indique Sèze, le confort est relatif à l'histoire et à une période de temps donnée, au sujet le ressentant, à sa propre culture, ou encore aux circonstances de l'interaction [SEZ,94]. Ainsi, il s'agit d'un sentiment profondément subjectif et individuel, en plus d'être contextuel. Il est alors aisément de constater que c'est loin d'être une quantité physique qui peut se mesurer directement, cela est bien plus complexe à appréhender. Il est également important de garder en tête que lorsqu'il s'agit de penser au confort ou de l'étudier, cela est fait selon un point de vue involontairement égocentré : chacun possède naturellement sa propre vision du confort. Un effort doit donc être fait pour penser selon la culture du sujet, son histoire, sa localisation géographique, ou encore sa situation. Finalement, il ne peut pas y avoir une définition précise et universelle du confort, seulement une définition contextuelle.

## 5.2) Représentations de la perception du confort

D'une manière générale, pour toutes les raisons évoquées précédemment, le confort n'est pas ce qui est réellement étudié aujourd'hui. Ce qui est étudié est en réalité l'inconfort, car il s'agit d'une notion plus objective. La distinction entre confort et inconfort n'étant pas si évidente qu'elle puisse paraître, il convient de développer ce qui les différencie, et de

comprendre pourquoi ils ne doivent pas être considérés comme deux extrémités d'une même échelle.

### 5.2.1) Les multiples dimensions du confort

Après en avoir donné une définition globale, il convient maintenant de chercher à caractériser plus précisément le confort. Depuis les années 1970, l'ergonomie est la discipline qui est spécialisée sur son étude. Elle provient de la synthèse de deux courants nés au XIX<sup>ème</sup> siècle : un courant hygiéniste, dont le représentant le plus connu est le médecin français Louis René Villermé (1782-1863), visant la préservation de la santé, et un courant productiviste, représenté par l'ingénieur américain Frederick Winslow Taylor (1856-1915). Il s'agit d'une discipline scientifique s'appuyant sur différentes disciplines (psychologie cognitive, psychophysiologie, physiologie, biomécanique...) et visant à expliquer les processus résultants de l'interaction entre l'être humain et les autres composantes d'un système. Issue du monde du travail (ergonomie du travail), l'ergonomie touche depuis quelques années de plus en plus de domaines liés aux produits (ergonomie d'usage). Jean-Charles Dodeman, consultant ergonome, indique : « faire de l'ergonomie consiste à caractériser la relation entre l'être humain, qu'il soit opérateur, usager, client... et un outil ou un produit dans un contexte, un environnement, un lieu de vie, en vue de concevoir les outils et systèmes les plus appropriés à l'usage qui peut en être fait (facile à utiliser, sans risque pour la santé) et à la finalité pour lesquels ils sont conçus (efficacité, efficience) » [ERG,B]. Les notions de confort du corps individuel (santé) et de corps social (performance) vues précédemment s'y retrouvent. De ce fait, ce sont donc principalement des ergonomes qui se sont intéressés à cette question, utilisant des méthodes à la fois quantitatives (ex. mesures physiologiques) et qualitatives (ex. questionnaires).

Par exemple, concernant le confort d'assise, De Looze *et al.* notaient : « la combinaison de mesures objectives valides avec des évaluations subjectives du confort et de l'inconfort pourraient aider les concepteurs de sièges. La question est, cependant, de savoir quelles sont les mesures objectives liées à ces notions. Cela nécessite dans un premier temps une définition claire du confort et de l'inconfort » [LOO,03]. Les auteurs, dans leur recherche de corrélations entre mesures objectives (plutôt quantitatives) et subjectives (plutôt qualitatives) du confort et de l'inconfort pour la posture assise, ont montré qu'il existait trois visions chronologiques sur la différence entre ces deux concepts. Chacune d'elles possède des similitudes : elles s'accordent sur le fait que confort et inconfort sont une construction de nature personnelle et subjective, qu'ils sont affectés par des facteurs de natures diverses (physique, physiologique et

psychologique), et qu'ils sont une réaction à l'environnement. Leurs différences proviennent surtout de leur dimensionnalité.

Avant les années 1960, confort et inconfort étaient considérés comme deux états discrets : présence de confort et absence de confort. Ce modèle très simpliste définit le confort comme absence d'inconfort et vice versa. Il ne prévoyait pas d'entre-deux (Figure 81). Il implique que le confort n'est pas nécessairement rattaché à un affect positif, et que l'objectif ultime des concepteurs était d'atteindre un état d'absence d'inconfort.

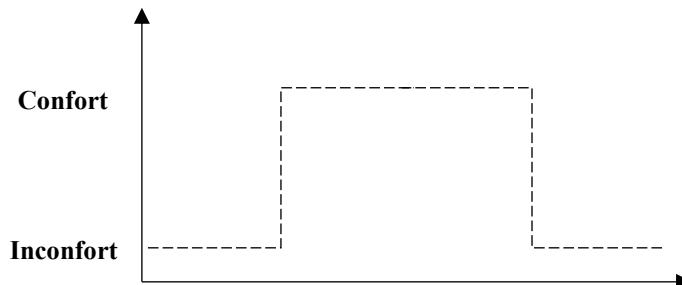


Figure 81 : Confort et inconfort comme deux états discrets

La vision la plus « naturelle » est apparue vers 1970. Dans le langage commun, il faut remarquer que « confort » peut signifier à la fois confort et inconfort. De même, de nombreux chercheurs et praticiens ont considéré le confort et l'inconfort comme deux opposés sur une échelle continue, partant d'un inconfort extrême et allant jusqu'à un état de confort extrême (Figure 82). Elle vient du fait que les gens distinguent souvent et naturellement plusieurs niveaux d'appréciation dans leurs réponses subjectives, à travers un continuum allant d'une réaction très négative à très positive. Ce principe a été repris dans de nombreuses études cherchant à évaluer le confort d'assise, que ce soit pour des chaises [SHA,69] ou des sièges de voiture [HAB,77]. Des échelles graduées, type échelle de Likert, ont ainsi été utilisées, donnant des résultats convaincants car permettant de différencier les produits testés.

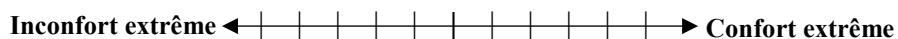


Figure 82 : Confort et inconfort comme deux extrêmes d'un continuum unidimensionnel

Cette échelle unidimensionnelle, malgré son apparence efficacité, a cependant été remise en question par Zhang *et al.* [ZHA,96]. Les auteurs ont souhaité démontrer que le confort et l'inconfort étaient en fait des entités différentes, faisant intervenir des facteurs de différentes natures, et donc ne pouvant se résumer à une échelle à une seule dimension. Afin de collecter des descripteurs liés d'un côté au confort et de l'autre à l'inconfort, ils ont envoyé deux

questionnaires différents à deux groupes d'employés de bureau différents. La première partie des questionnaires était volontairement vague, et ne mentionnait pas le confort ou l'inconfort : ils étaient interrogés sur leurs opinions et leurs impressions concernant le poste de travail qu'ils utilisaient, et il leur était demandé de classer ces impressions par ordre d'importance. Ensuite, considérant qu'il pouvait être difficile pour les gens de fournir des définitions formelles du confort et de l'inconfort, la deuxième partie leur demandait de décrire des sentiments associés d'un côté au confort (questionnaire A) et de l'autre à l'inconfort (questionnaire B) lors d'un travail en position assise. Cette distinction permettait notamment d'éviter le biais naturel de décrire le confort et l'inconfort comme deux opposés. La dernière partie des questionnaires fournissait une liste de descripteurs préétablie (collectée à travers une revue de littérature), dont l'objectif était de donner aux personnes sondées autant de termes supplémentaires que possibles pour ne pas omettre d'éventuelles dimensions pour l'analyse. Les personnes devaient alors évaluer ces descripteurs donnés en fonction de leurs propres descripteurs, soit relatifs au confort (questionnaire A), soit relatifs à l'inconfort (questionnaire B). Par la suite, les auteurs ont conduit plusieurs séries d'analyses statistiques afin d'affiner le nombre de descripteurs retenus, utilisant un positionnement multidimensionnel (« *Multidimensional scaling* » ou *MDS* en anglais), une analyse factorielle et un partitionnement de données (« *Cluster analysis* »). Au final, deux groupes de facteurs indépendants ont émergé, interprétés comme correspondant au confort et à l'inconfort. Le premier *cluster* (ou première dimension), correspondant supposément à l'inconfort, regroupait des facteurs plutôt physiologiques et biomécaniques : s'y trouvaient des descripteurs liés au champ sémantique de la fatigue, de la nervosité, du stress, ou encore de la circulation du sang. Le second groupe, correspondant supposément au confort, regroupait des facteurs plutôt psychologiques et esthétiques : s'y trouvaient des descripteurs liés au champ sémantique du bien-être, de la relaxation, de l'impression visuelle et tactile, ou de la vigueur. Ainsi, un nouveau modèle de perception du confort a été élaboré, proposant une représentation multidimensionnelle (Figure 83). Pour compléter ce modèle, il existe une relation complémentaire dans le temps entre les deux aspects : l'inconfort va toujours augmenter avec la durée de la tâche et la fatigue [SHA,69], tandis que le confort va diminuer dans les mêmes conditions [VIN,14], ce qui n'est pas sans rappeler le phénomène d'habituat ou d'accoutumance vu dans la partie 2.2.3) Traitement des émotions : système limbique et amygdale. À cela s'ajoute le fait qu'une augmentation de l'inconfort diminuera toujours le confort ressenti : la présence de facteurs physiques adverses vont « briser » l'harmonie physique et diriger l'attention sur l'inconfort. Cependant, à l'inverse, l'élimination de contraintes physiques impliquant un inconfort ne produira pas nécessairement du confort. Il

existe donc une certaine domination de l'inconfort, conduisant à une certaine asymétrie dans la perception.

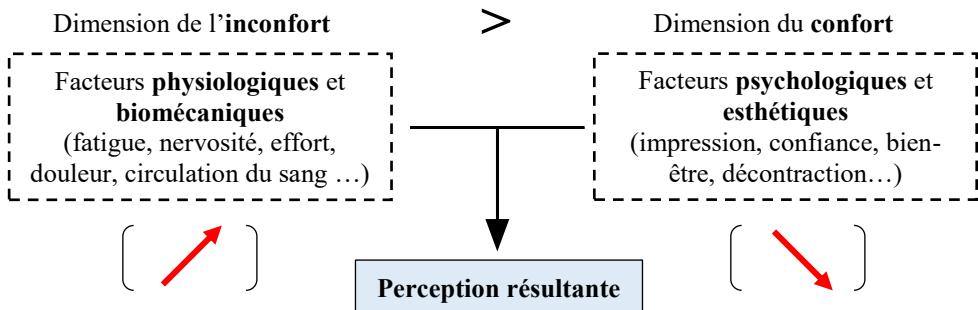


Figure 83 : Confort et inconfort comme deux dimensions distinctes

Finalement, il apparaît que l'inconfort est lié à des facteurs qui semblent plus objectifs car pouvant être mesurés jusqu'à un certain point grâce à des capteurs physiologiques. Il paraît donc plus facile à évaluer, ce qui est la raison pourquoi, d'une manière générale, les études ergonomiques vont plutôt chercher à réduire l'inconfort qu'augmenter le confort. D'un autre côté, l'étude de Zhang *et al.* n'ont pas permis de mettre en lumière tous les facteurs intervenant dans la perception du confort, car elle reste appliquée à un contexte bien particulier : l'employé travaillant sur son poste de travail individuel. Il semblerait également que la réalité soit un peu plus complexe, notamment du côté des facteurs influençant l'inconfort. En effet, des facteurs psychologiques peuvent très bien altérer l'état physiologique de l'individu, amenant alors à un inconfort d'origine psychologique. L'exemple le plus simple restant le cas des émotions négatives, provoquant potentiellement du stress, une augmentation du rythme cardiaque, etc. Pour aller plus loin, il est possible de considérer la symbolique des objets, pouvant se ranger dans la catégorie « facteur psychologique » : par exemple, une arme à feu va pouvoir rendre son potentiel utilisateur inconfortable car il pourra se sentir indigné par ce que l'objet représente pour lui. Desmet et Hekkert appellent cela la « louabilité » de l'objet (« *praiseworthiness* ») [DES,02]. Dans la même idée, pour revenir au thème des transports publics urbains, l'inconfort peut venir aussi d'une situation ressentie comme oppressante pour l'individu, lorsque sa « sphère intime » est violée par la présence d'inconnus, ce qui arrive fréquemment lors des heures de grande affluence. Ce phénomène sera vu plus loin.

Suite à cette étude, Zhang *et al.* ont proposé le premier modèle conceptuel du confort d'assise (Figure 84). Ils ont schématisé leur hypothèse sous la forme d'un graphique : les transitions du sentiment d'inconfort au sentiment de confort et inversement sont possibles dans l'intersection des axes (zone de transition). Cela représente le fait que si l'inconfort est réduit, le confort peut être perçu. Par contre, plus l'inconfort augmente, plus le confort diminue. La

nuance avec la vision unidimensionnelle vue précédemment est qu'il est *a priori* possible ici de ressentir à la fois du confort et de l'inconfort.

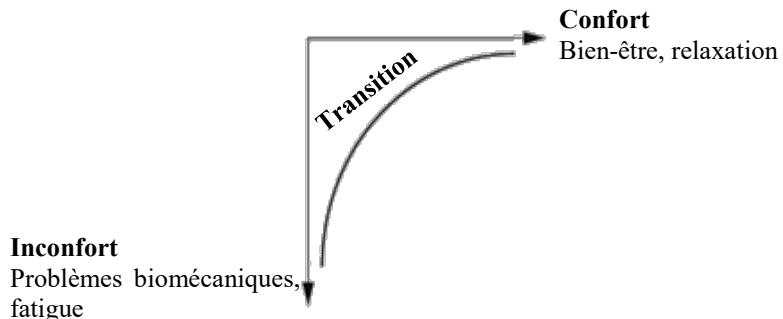


Figure 84 : Modèle hypothétique du confort d'assise de Zhang *et al.*, repris de [ZHA,96]

### 5.2.2) Modèles de confort

Ce premier « modèle de confort » a servi de base pour de nombreuses études traitant du confort, et a été l'initiateur d'une série d'autres modèles principalement proposés par des ergonomes et chercheurs néerlandais qui ont cherché à le compléter. Comme évoqué précédemment, il n'existe pas vraiment de définition précise du confort, le débat étant toujours ouvert à l'heure actuelle [NAD,17]. Cependant, ces représentations de la perception du confort sont intéressantes à prendre en compte car elles peuvent permettre à des concepteurs, des opérateurs ou même à des managers de comprendre comment l'interaction entre un individu et son environnement forge sa perception, et ainsi avoir des outils pour l'améliorer. Il faut cependant garder à l'esprit que les modèles présentés par la suite se basent sur le confort d'assise, ils restent donc spécifiques à un contexte bien défini. Un travail devra être fait par la suite pour tenter d'adapter ces représentations au contexte des transports publics urbains, où les passagers n'ont pas forcément accès à un siège. Pour l'instant, il s'agit de comprendre comment ces modèles ont été construits et quelle est leur portée.

#### 5.2.2.1) Modèle théorique de confort et d'inconfort d'assise par De Looze *et al.* (2003)

Quelques années après le modèle de Zhang *et al.*, De Looze *et al.* ont proposé un modèle pouvant être considéré comme « pionnier » dans ce domaine, plus explicite, basé sur une revue de la littérature (Figure 85) [LOO,03]. Les auteurs ont approfondi les résultats décrits précédemment en proposant une représentation des relations hypothétiques entre confort, inconfort et leurs facteurs sous-jacents. En proposant ce nouveau cadre théorique, ils ont cherché à mettre en lumière les différents facteurs pouvant faire l'objet de mesures, mais

également à déterminer les relations entre mesures objectives et perception du confort ou de l'inconfort.

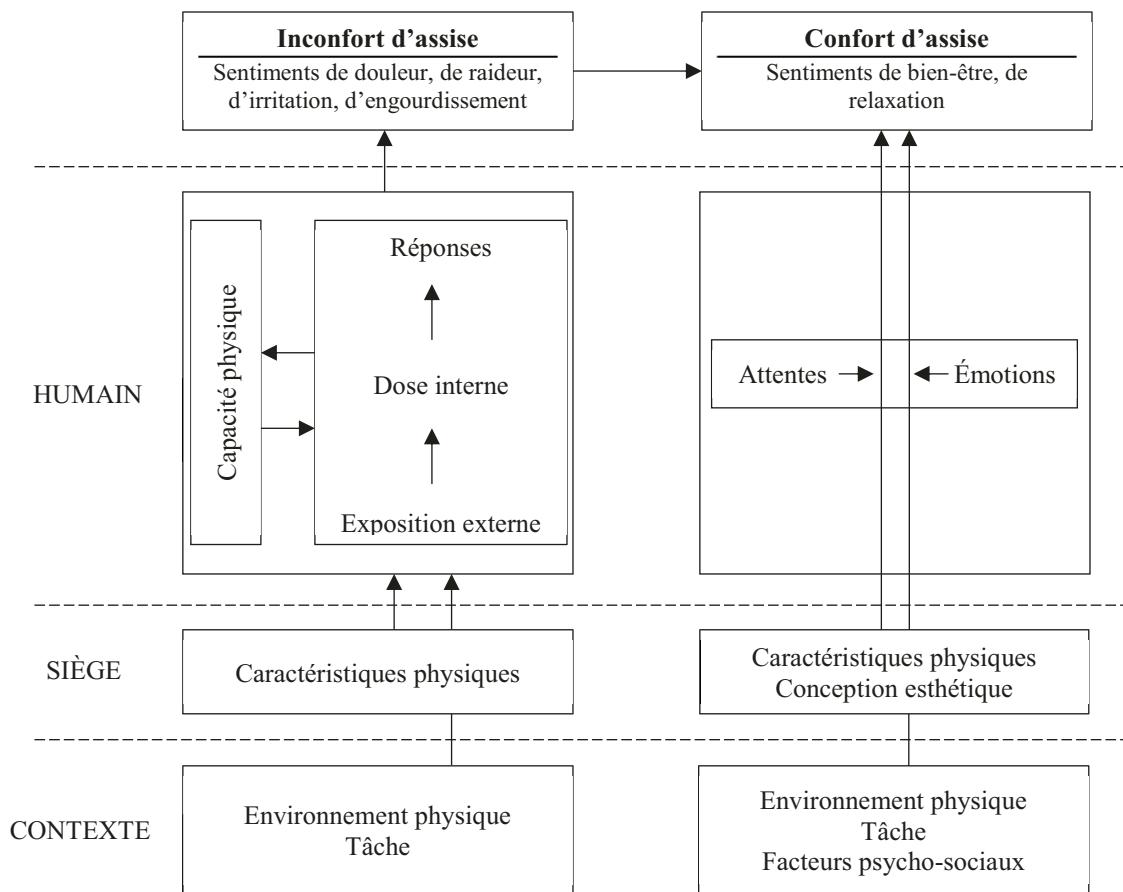


Figure 85 : Modèle théorique de confort et d'inconfort d'assise, repris de [LOO,03]

Ce modèle mérite une explication plus approfondie. Pour la partie sur le confort, les auteurs se sont inspirés des travaux de Zhang *et al.* et pour la partie sur l'inconfort, ils se sont inspirés de modèles sur l'étiologie<sup>8</sup> de problèmes physiques liés au travail. Trois niveaux, scindés entre une partie gauche (inconfort) et une partie droite (confort), sont présentés : l'humain, le siège et le contexte. Cela reprend le trio Sujet – Objet – Contexte vu précédemment, mais appliqué au contexte d'interaction.

Au niveau de l'inconfort, les auteurs déclarent que les caractéristiques physiques du siège (ex. sa forme, sa douceur), l'environnement physique (ex. hauteur de la table) et la tâche à accomplir (ex. travail sur ordinateur) exposent l'individu assis à un certain taux de charge biomécanique, pouvant concerner les forces et la pression exercée par le siège sur le corps et les articulations. Ces charges externes peuvent produire une « dose interne » en termes d'activation musculaire, de force interne, de pression intra-discale, ou encore de hausse de la

<sup>8</sup> Étude des causes de faits biologiques, spécialement des maladies

température cutanée ou corporelle, provoquant des réponses chimiques, physiologiques et biomécaniques. La capacité physique de l'individu (son poids, son endurance) va réguler cette cascade de mécanismes physiologiques. Ensuite, la perception de l'inconfort sera établie grâce aux différents systèmes sensoriels, comme l'extéroception, la proprioception, l'intéroception et la nociception.

De l'autre côté, pour la perception du confort, les auteurs indiquent qu'au niveau du contexte, ce ne sont pas seulement les caractéristiques physiques de l'environnement qui vont jouer un rôle, mais également des facteurs psycho-sociaux comme la satisfaction au travail et le soutien social. Au niveau du siège, son esthétique peut jouer sur la perception du confort, en plus de ses caractéristiques physiques. Enfin, au niveau de l'humain, les facteurs influents sont supposément les attentes individuelles et autres émotions ou sentiments.

Dans la suite de leur étude, les auteurs montrent, grâce à une revue de littérature extensive, qu'il n'existe pas vraiment de mesure instrumentale permettant d'évaluer de façon sûre la perception du confort ou de l'inconfort. Cette conclusion rejoint celle du deuxième chapitre. Il semblerait en effet que la complexité de la mise en place des conditions d'étude et que l'absence d'une méthodologie commune pour l'étude du confort empêche une certaine uniformisation des résultats obtenus dans les diverses études. Malgré ce défi méthodologique, il existe tout de même des facteurs mesurables instrumentalement présentant de fortes corrélations avec des évaluations subjectives. Dans le contexte d'une position assise dans un siège de voiture, la mesure de la distribution de pression semble la plus démonstrative : une distribution uniforme au niveau des fesses et un maintien suffisant dans le bas du dos au niveau des lombaires apparaissent importants pour réduire l'inconfort local. Cependant, la même association n'a pas pu être confirmée pour d'autres types de siège (de bureau par exemple). Concernant les autres variables « objectives » (posture, mouvement, activité musculaire, charge vertébrale), leur mesure ne semble à l'heure actuelle toujours pas claire vis-à-vis du confort. Hiemstra-van Mastrigt, dans une revue de littérature plus récente, ajoute que les variables anthropométriques (i.e. dimensions du siège) semblent liées à la distribution de pression suivant la posture de l'individu [HIE,15].

### 5.2.2.2 Modèle de confort simplifié de Vink *et al.* (2005)

Une troisième réaction semble manquer dans le modèle précédent : l'état neutre. En effet, le confort peut se manifester de trois façons : soit il y a inconfort, lorsque l'individu ressent une gêne due à l'environnement ; soit il n'y a pas d'inconfort ressenti, lorsqu'il n'a pas conscience d'un état d'inconfort ou de confort, il se trouve dans un état neutre ; soit il y a

confort, lorsqu'il ressent plus de confort que ce qu'il attendait et qu'il se sent confortable [VIN,05]. Vink *et al.* ont proposé une simplification du modèle précédent, centrant la perception autour de l'individu (Figure 86).

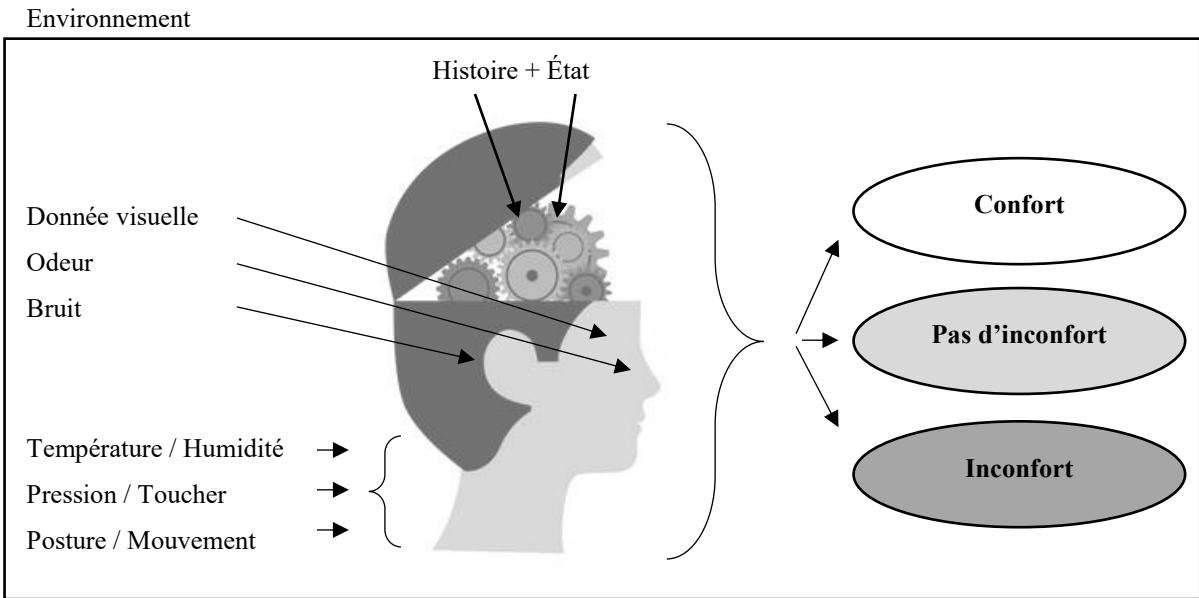


Figure 86 : Modèle de confort simplifié, repris de [VIN,05]

Ce nouveau modèle fait apparaître le troisième état de confort et clarifie les différents facteurs intervenant dans la perception. Celui-ci ne se veut plus rattaché spécifiquement au contexte du sujet assis sur un siège, mais souhaite être plus général. Il indique d'une part que de nombreuses informations sensorielles jouent un rôle dans la perception du confort, si ce n'est que tous les sens y participent, d'autre part qu'il y également une dimension cognitive qui intervient : l'histoire, la mémoire de l'individu (forgeant notamment ses attentes), puis son état, qu'il soit physique (fatigue) ou émotionnel (humeur).

Dans l'optique de conception de produits, Vink ajoute que ces derniers devraient présenter au minimum le niveau de confort auquel les gens sont habitués : tout le monde compare l'apparence et le style d'un produit avec ce qu'il a déjà vécu par le passé. Ce point précis montre l'importance considérable de la connaissance de l'histoire du produit, et revient à la notion de « référent » vu au premier chapitre. Effectivement, toute perception est indissociable d'une mémoire qui va constituer un référentiel nécessaire à la comparaison relative de la chose perçue [BA1,09]. Une éventuelle étude des lignées généalogiques de l'objet (au sens large) permet de prendre en considération cette « mémoire collective » relative à ce dernier. : « percevoir, c'est comparer » [BAS,95]. D'un autre côté, il convient également de considérer les habitudes et le comportement social du futur utilisateur pour répondre au mieux

à ses attentes. Cette vision correspond finalement à une démarche anthropocentrale, dans le sens où il y a une volonté d'analyse des perceptions et des comportements du futur utilisateur.

### 5.2.2.3) Revue de littérature sur les causes de l'inconfort : modèle de Moes (2005)

Un autre type de modèle a été proposé par Moes, dans l'optique d'expliquer le processus de perception de l'inconfort, de nouveau dans le contexte du confort d'assise [MOE,05]. L'auteur a continué le travail entamé par Vink *et al.* afin de proposer un schéma de raisonnement pour interpréter les données de confort mesurées et développer un algorithme permettant d'optimiser les paramètres liés au siège (notamment sa forme et ses dimensions). Il y présente un processus composé de cinq étapes, commençant par l'interaction entre l'individu et le siège et terminant par l'expérience de l'inconfort (Figure 87).

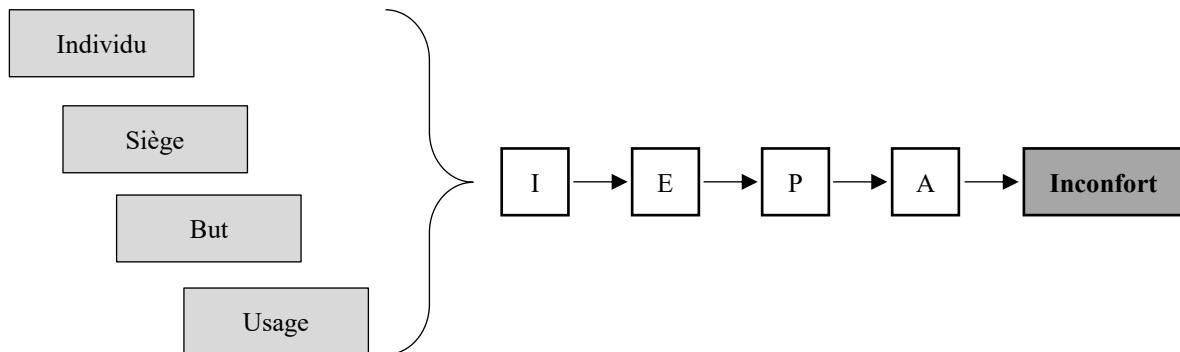


Figure 87 : Description des relations causales et fonctionnelles de l'inconfort, repris de [MOE,05]

L'auteur propose un raisonnement causal : « si un individu utilise un siège dans un but précis, une interaction (I) va avoir lieu. Cette interaction va consister par exemple en une distribution de pression dans l'aire de contact entre la personne et le siège. Des effets à l'intérieur du corps (E) vont alors résulter de celle-ci, comme la déformation de tissus ou la compression de nerfs et de vaisseaux sanguins. Ces effets vont être perçus (P) et interprétés, par exemple en une douleur. La phase suivante est l'appréciation (A) de la perception. Si celle-ci est négative, elle mène à des sentiments d'inconfort » ([MOE,05], p. 203). Ce raisonnement intègre en quelque sorte les différentes étapes de perception vues dans la partie 2.2) Le mécanisme de la perception. Moes propose également de formuler l'inconfort comme la fonction :

$$Inconfort = f(A(P(E(I(individu, siège, but, usage)))))$$

Cette représentation a l'avantage d'être simple et linéaire et explique le processus plus clairement que ses prédecesseurs. Néanmoins, elle ne prend pas explicitement en compte les variables issues de l'environnement, et ne s'attache qu'à déterminer les causes de l'inconfort, omettant l'issue confortable. De plus, l'absence de résultats concluants dans la littérature

concernant d'éventuelles relations mathématiques entre données instrumentales et données subjectives ne permet pas la mise en place d'un algorithme prédictif du confort d'assise, invalidant pour le moment cette formule de l'inconfort.

#### 5.2.2.4) Le rôle des attentes : nouveau modèle de Vink et Hallbeck (2012)

Jusqu'ici, les modèles étaient plutôt portés sur la compréhension des causes provoquant l'inconfort d'assise ou de potentielles maladies professionnelles. Cependant, quand il s'agit de développer des produits innovants, le confort se pose comme un objectif à atteindre. Vink et Hallbeck, s'inspirant des modèles précédents, propose finalement un nouveau modèle de confort, plus complet et global (Figure 88) [VIN,12].

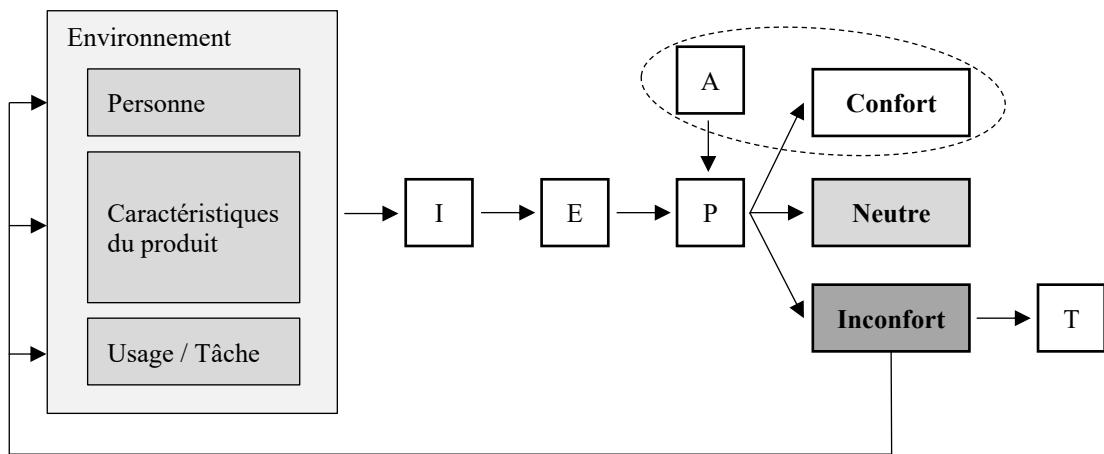


Figure 88 : Nouveau modèle de confort de Vink et Hallbeck (2012)

Les auteurs proposent le même type de raisonnement que précédemment : « L'interaction (I) avec un environnement est causée par le contact (physique ou non) entre l'humain et le produit selon un usage. Ceci peut donner lieu à des effets internes dans le corps humain (E), comme des sensations tactiles, un changement de posture corporelle et une activation musculaire. Les effets perçus (P) sont influencés par les effets sur le corps humain, mais aussi par les attentes (A). Ceux-ci sont interprétés comme confortables ou neutres, ou ils peuvent mener à des sentiments d'inconfort. [...] L'inconfort peut être à l'origine de troubles musculo-squelettiques (T). Le cercle entourant les attentes et le confort illustre le fait que les attentes sont souvent considérées comme liées au confort. Si l'inconfort est trop important ou si le confort n'est pas assez bon, il y a une boucle de rétroaction vers la personne qui pourrait faire quelque chose, comme changer de position sur le siège, adapter le produit ou changer de tâche ou d'usage » ([VIN,12], p.275).

Ce modèle met l'accent sur un élément évoqué par De Looze *et al.* mais mis de côté jusqu'ici : le rôle des attentes. Selon Vink, « le confort sera ressenti quand le vécu surpassera

l'attendu » [VIN,14]. Ce point précis est directement assimilable à « l'effet wow » recherché en marketing, où l'objectif est d' « enchanter » le consommateur grâce à un produit dépassant ses attentes [GAR,14]. Le nouveau projet « inOui » de la SNCF en est le parfait exemple. À travers cette nouvelle campagne, la SNCF souhaite proposer une nouvelle « expérience de voyage ». Cette recherche d'enchantement, pour reprendre le terme, passe dans cet exemple par une amélioration des services. Rachel Picard, directrice de Voyages SNCF, parle de « train connecté », d'« enrichissement de la relation avec le personnel », ou encore d'amélioration du confort à travers une « rénovation des rames » [SNC,17]. De la même façon que le confort en demande toujours plus, comme le suggérait Hegel (partie 5.1.1) Évolution sémantique du confort : une brève histoire de la France moderne), satisfaire les clients ne suffit plus : il faut les ravir, les enchanter. Claude Garcia-Zunino rapporte : « Avec les années 2010, nous passons de la société de la relation client à l'enchantement du client via l'expérience client. Désormais, c'est l'expérience qui nourrit la réputation. Pour assurer la fidélité du client, la satisfaction ne suffit plus, il est temps de passer à l'enchantement du client, autrement dit de dépasser la satisfaction attendue, pour atteindre la divine surprise » [GAR,14].

#### 5.2.2.5) Autre regard : les attentes d'un point de vue marketing, selon le modèle de Kano

En marge des modèles de confort provenant de l'ergonomie, il existe également des modèles de satisfaction en marketing, comme le modèle de Kano, développé en 1984 [KAN,84]. En partant de l'hypothèse générale qu'un usager est satisfait s'il ressent du confort et insatisfait s'il ressent de l'inconfort, il semble intéressant de faire un parallèle entre ces deux approches : déterminer les propriétés de confort d'un objet (au sens large) pourrait passer par une recherche de ses « attributs qualitatifs ». Brièvement, le modèle de Kano est utilisé pour catégoriser, classer et dimensionner les besoins de l'usager, dans le but de concevoir et développer une offre de produit ou de service adaptée aux attentes et perceptions de l'utilisateur. Il se présente sous la forme d'un graphe à deux dimensions : l'axe vertical représente le niveau de satisfaction (du moins satisfait au plus satisfait) et l'axe horizontal représente la prise en compte des exigences (exigence non respectée à exigence respectée pour différentes propriétés du produit) (Figure 89).

Il existerait plusieurs types d'attributs pour un produit/service correspondant aux différentes attentes de l'usager. Les attributs de base (« *must-be* »), souvent implicites car considérés essentiels, doivent nécessairement être présents et fonctionnels car ils sont perçus comme « normaux » pour le produit. S'ils remplissent leur rôle, la situation est perçue comme normale. Par contre, leur absence ou leur dysfonctionnement provoquera toujours une

insatisfaction, ressentie comme légitime. Par exemple, un bus se doit de comporter des sièges : c'est évident. Ensuite, les attributs linéaires (« *one-dimensional* ») augmentent la satisfaction proportionnellement à la performance constatée par rapport à la performance annoncée ou suggérée. Le non-respect d'une promesse donnée mène à une insatisfaction, tandis qu'une promesse tenue mène à une satisfaction. Par exemple, plus un bus aura du retard, plus le voyageur se trouvera insatisfait. L'inverse ne se vérifie pas : si un bus arrive en avance, il se peut que le voyageur le rate ! La meilleure performance reste alors un bus qui arrive juste à l'heure. Finalement, les attributs attractifs (« *bonus* ») correspondent à l' « heureuse surprise », voire au « *wow* » tant convoité : il s'agit souvent d'innovations, d'éléments que l'usager n'attendait pas forcément mais qui répondent à un besoin latent. Leur absence ne diminue pas la satisfaction, mais leur présence peut provoquer une conséquence positive très forte sur celle-ci. Typiquement, il pourrait s'agir en ce moment de la présence de wifi à bord du bus, ou de prises USB pour recharger ses équipements électroniques.

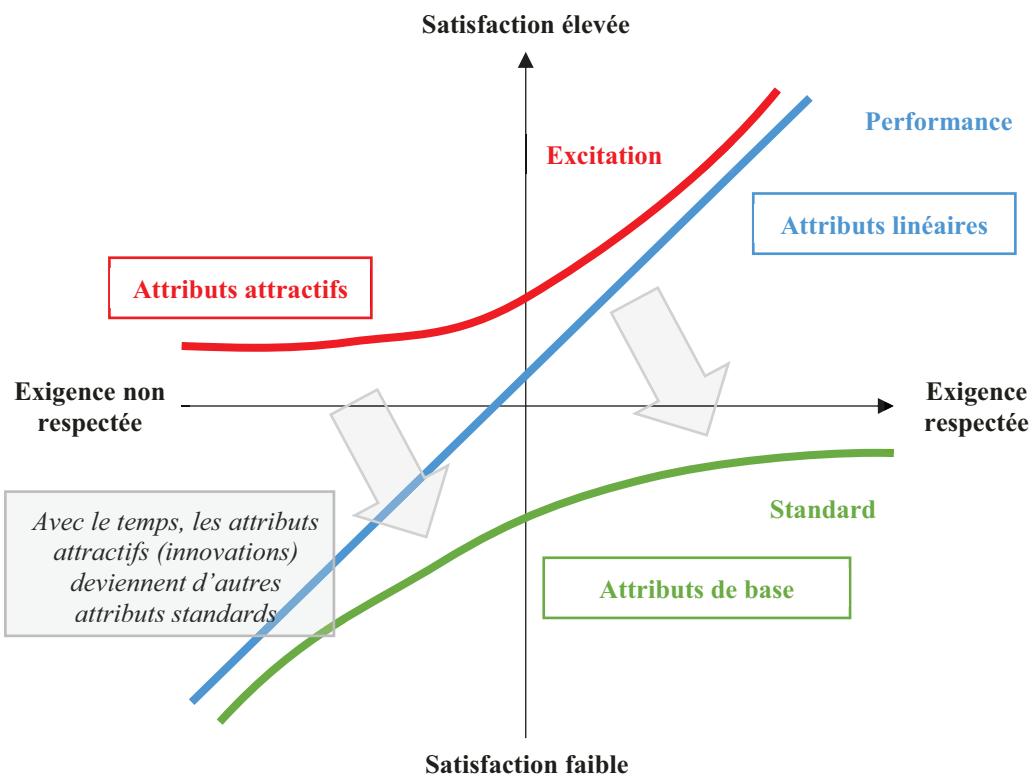


Figure 89 : Modèle de Kano

La variable temps a son importance : un attribut peut passer d'une zone à une autre plus ou moins vite. C'est le cas pour des attributs considérés innovants dans le passé mais nécessaires aujourd'hui. Par exemple, les transports à plancher bas étaient considérés très innovants lors de leur première implantation, mais aujourd'hui, il s'agit d'un « *must-be* » et même d'une norme,

ne serait-ce qu'en matière d'accessibilité, qui est pour rappel un des enjeux primordiaux de la mobilité. Pour conclure sur ce modèle, il se complète par un questionnaire à l'attention de potentiels utilisateurs. Ces derniers sont interrogés sur ce qu'ils penseraient de l'éventuelle présence ou absence de fonctionnalités ou d'éléments en lien avec l'objet à concevoir ou développer, à travers une échelle à 5 points : « J'aime ça comme tel », « J'attends que ça soit comme tel », « Je suis neutre », « Je peux vivre avec ça comme tel » à « Je n'aime pas ça comme tel » [COH,06]. Il s'agit ensuite de croiser les différentes propositions afin de pouvoir les catégoriser selon les différents types d'attributs. Il existe trois derniers types d'attributs non représentés dans le graphique : les attributs indifférents, discutables (« *questionable* ») et à double tranchant (« *reverse* »). Les premiers correspondent simplement à des éléments auquel l'utilisateur n'accorde pas vraiment d'importance. Pour donner un exemple, il pourrait s'agir du type de technologie utilisée pour la motorisation du bus : l'enjeu est critique pour le constructeur, mais les voyageurs peuvent ne même pas être conscients des différences. Les deuxièmes interviennent uniquement lorsque les personnes interrogées indiquent qu'ils apprécient ou non si un attribut est présent ou absent : l'enquêteur ne peut pas interpréter cette réponse. Enfin, les derniers correspondent à des éléments considérés par les uns comme un avantage (satisfaction) et par les autres comme un inconvénient (insatisfaction). Ils reflètent la diversité des opinions et des usages de chacun. Cela peut par exemple s'illustrer par le choix des couleurs pour l'aménagement intérieur, déjà évoqué dans l'introduction générale [SLA,14].

#### 5.2.2.6) Conclusion sur la conceptualisation du confort

A travers cet aperçu issu du marketing, il faut remarquer que différentes disciplines peuvent s'atteler à conceptualiser des notions potentiellement associées (satisfaction client, confort utilisateur). Il s'agissait dans cette parenthèse de constater qu'il existe déjà un bon nombre de modèles ou méthodes pouvant aider ou inspirer les chercheurs ou concepteurs pour le développement de produits innovants prenant en compte les perceptions de l'utilisateur [PAG,01]. Le confort, par sa complexité, amène le chercheur/concepteur à interroger un champ de connaissances très large, à explorer diverses disciplines et à rassembler des données issues d'une réflexion nécessairement transverse.

Les modèles de confort ont permis de clarifier les différents éléments intervenant dans la perception du confort lors de l'interaction entre un sujet et son environnement. Ils ont pour objectif de centraliser les connaissances sur le sujet, de fournir un cadre d'étude pour une problématique profondément complexe. Les facteurs influençant le confort ou l'inconfort se situent sur des plans souvent distincts : un inconfort peut être dû à un mauvais dimensionnement

de l'objet, à de mauvaises fonctionnalités, un confort peut survenir d'un objet évoquant des souvenirs pour son utilisateur (la fameuse « madeleine de Proust »), etc. La multiplicité des facteurs à maîtriser amène à une multiplicité de méthodes, de termes, ou encore de dispositifs expérimentaux pour évaluer le confort. Cela mène malencontreusement à un manque de cohérence entre les études, ce qui montre aussi que ce domaine de recherche en est encore à ses débuts [ULH,17].

Il faut revenir également sur le fait que le confort doit toujours s'étudier dans un contexte spécifique. Les différents modèles présentés dans cette partie s'inscrivent dans le contexte d'un sujet en position assise, en environnement principalement isolé. Pour le cas des transports publics urbains, le contexte d'interaction doit être revu. L'intérêt de cette recherche porte sur l'interaction entre le passager et les appuis et maintiens présents à l'intérieur des véhicules, présentant des particularités non prises en considération dans les modèles ergonomiques.

## 6) La notion de confort dans les transports publics urbains

Les différentes représentations du confort évoquées dans la partie précédente permettent de mettre à plat les différents éléments intervenant lors de l'interaction entre le sujet et l'objet dans un contexte donné. Cependant, elles peinent à représenter la situation d'un passager empruntant un transport public urbain car elles sont focalisées sur le confort d'assise dans un environnement isolé. Il faut donc porter un nouveau regard sur ces représentations, construire un nouveau système Sujet – Objet – Contexte représentatif de cette situation. Le point de vue anthropocentré aide dans cette optique en proposant de s'intéresser aux sensations et aux perceptions du sujet, le passager, par rapport à l'objet, les formes d'appui, dans le contexte du transport en milieu urbain.

Cette partie propose un nouveau modèle pour le confort passager et présente deux niveaux, rappelant les deux relations évoquées par Le Goff (partie 5.1.2) Vers une définition moderne du confort). Le premier niveau est « local » et garde le même esprit que les modèles de confort actuels. Il se concentre sur le rapport au confort du corps individuel, et peut être nommé « modèle d'interaction sensorielle ». Néanmoins, il semble manquer dans celui-ci certains facteurs pouvant être à l'origine d'une altération de la perception du confort pour le passager. Les transports publics urbains constituent un système complexe, dynamique, changeant, dont les conditions évoluent sans cesse du fait notamment des interactions sociales avec les autres passagers, mais également d'autres facteurs liés à l'utilisation même du transport, au déroulement du voyage. Il semble alors incomplet de se concentrer uniquement

sur cet aspect de l'interaction, il faut également s'intéresser aux différentes étapes que va traverser le passager, les conditions de son voyage. A cet effet, cinq étapes majeures ont été retenues, regroupées sous le terme « 5 A » : avant, accueil, activités, ancrage, après. Brièvement, l'hypothèse est faite que chaque étape du parcours du passager, de la planification de son voyage jusqu'à l'arrivée à sa destination, va jouer dans le conditionnement de la perception de l'appui. Il s'agit du deuxième niveau, global, qui portera ainsi sur le rapport au confort du corps social : l'« approche 5 A ». La combinaison de ces deux niveaux permettrait alors *in fine* d'obtenir un « spectre holistique » des différents paramètres influençant la perception du confort par le passager, donnant au concepteur le moyen de déterminer où porter l'effort de conception. Cela l'assisterait également à distinguer les paramètres sur lesquels il ne pourra pas jouer, car indépendants du matériel roulant lui-même. Cette dernière relation va permettre de mettre l'accent sur les éléments qui font défaut aux modèles actuels et qui semblent pourtant d'une importance majeure dans le contexte du transport public urbain, comme par exemple la notion de service ou le contact avec autrui.

## 6.1) Le contexte des transports publics urbains

Concevoir des véhicules ferroviaires urbains confortables est un réel défi pour les constructeurs, puisqu'ils sont extrêmement contraints par des normes techniques et de sécurité. De plus, le nombre de passagers est impossible à contrôler, à la différence des transports à longue distance où chacun a sa place assise attribuée. Ainsi, les concepteurs doivent chercher l'équilibre entre des éléments contradictoires, comme offrir plus de confort ou plus de capacité, en vue de satisfaire l'objectif visé par les opérateurs ferroviaires. Comment transporter un maximum de voyageurs en un minimum de temps, tout en proposant un maximum de confort individuel ? Plusieurs études ont montré que les passagers n'étaient pas tant intéressés spécifiquement par le confort des sièges en eux-mêmes, mais plutôt par la possibilité de s'asseoir à l'intérieur du transport, par le temps d'attente à quai, ou encore par la densité de passagers [KOG,79][KRO,14][HAY,14]. En outre, comme chaque passager ne peut pas forcément avoir accès à un siège et se trouve contraint d'interagir avec des inconnus, des stratégies émergent pour « faire place », « marquer son territoire personnel », le temps du trajet. Cette partie se fonde sur les observations et recherches de Stéphanie H. Gosset qui propose une lecture d'une portion de ses résultats orientée sur le confort passager. Le détail de ses observations ne sera pas évoqué ici. Les points développés par la suite sont le facteur « densité », primordial dans la perception du confort dans les TPU, ainsi qu'une des stratégies adoptées par les passagers lors du déplacement du véhicule, « l'ancrage ». Ceux-ci ne seront

pas discutés en détail dans ce manuscrit car ces concepts sont approfondis et développés dans la thèse de Stéphanie H. Gosset.

### 6.1.1) Le facteur « densité »

Comme Le Goff le notait, la promiscuité rencontrée dans les TPU est vite insupportable et entre en contradiction avec le « bonheur individuel » ([GOF,94], p.160). Malheureusement, c'est le lot des voyageurs urbains que de faire face à la foule. Cette situation propre à ce type de transport mérite un approfondissement.

Pour reprendre depuis le début, une foule peut se décrire selon deux aspects principaux : sa structure sociale (organisée ou non organisée [MOS,81]) et sa densité. Dans les TPU, la foule n'est pas organisée, car chacun y a son propre intérêt et sa propre destination. Mais qu'en est-il de la densité ? Il s'agit globalement du rapport entre le nombre « d'unités sociales » par « unités spatiales » [DIO,99]. Cependant, cette définition est problématique car elle implique de définir les unités en question. La difficulté que cela pose a été illustrée par la revue de littérature de Li et Henscher [ZLI,13]. En effet, ils ont démontré qu'il y a une variété importante de façons de définir la densité dans les TPU ainsi qu'une variété de seuils de densité tolérée. Cette complexité provient du fait qu'il y a des zones « assis » et des zones « debout » dans la plupart des intérieurs des véhicules et que le ratio de places proposées entre ces deux aires peut varier selon les modèles de matériels roulants. À cela s'ajoute le fait qu'une personne assise prend plus de place qu'une personne debout : en toute logique, les espaces dédiés aux places assises permettent d'accueillir moins de voyageurs que les espaces dédiés aux places debout (ou au sens plus large, non-assises). Parfois, il y a aussi un facteur temporel qui vient s'ajouter à la définition de la densité.

Ce concept est souvent utilisé comme outil de mesure objectif pour l'évaluation de la perception de cette même densité, ce qui semble être une erreur. Il se décrit sous la forme d'un pourcentage d'occupation du véhicule, en relation avec un taux d'occupation standard (arbitrairement fixé à 4 personnes au mètre carré). Seulement, du fait de la nature subjective de la perception de cette densité, appelée « *crowding* » (relatif au sentiment d'oppression lié à l'entassement), celle-ci ne peut pas simplement s'expliquer à travers un critère mathématique (cela relève de la même réflexion soulevée dans la partie 4.2.3.4) Réflexion épistémologique sur la mesure de la perception). Éventuellement, les distances interpersonnelles peuvent être mesurées et interprétées en rapport à la proxémie (Figure 90) [HAL,71]. Celle-ci engage à considérer l'humain non pas uniquement par son enveloppe corporelle, mais par une série de « bulles invisibles » qui viennent l'entourer. De même que pour le confort, l'importance et la

taille des enveloppes successives dépendent de la culture de l'individu, ce qui suggère qu'il existe des seuils de tolérance à l'entassement différents. Par exemple, il s'avère que les peuples arabes et japonais sont très tolérants à l'entassement dans les lieux publics et les moyens de transport, au contraire des peuples nord-européens et nord-américains qui se sentiront moins à l'aise dans une foule. Cette mise à distance inconsciente d'autrui pourrait être une des raisons pour lesquelles les passagers laissent un siège vide entre eux si cela leur est possible. La largeur des sièges joue alors un rôle spécial dans cette attitude spontanée.

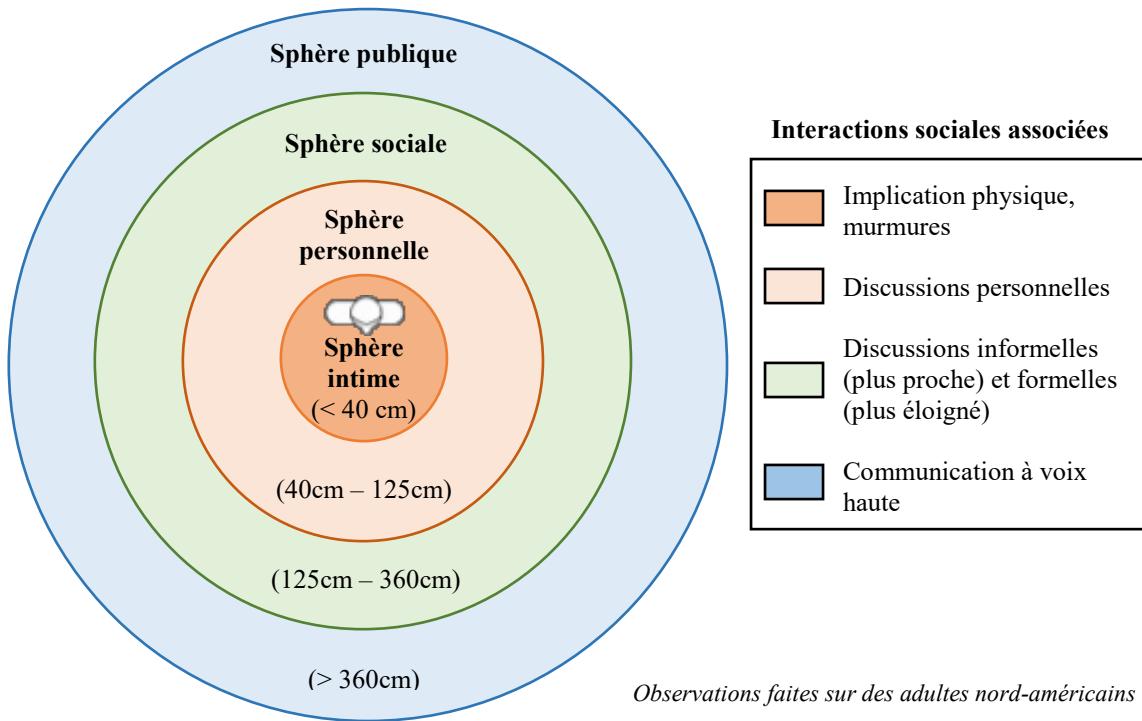


Figure 90: Distances sociales chez l'humain (sphères proxémiques), selon [HAL,71]

Le « *crowding* » est défini comme « un état psychologique créé par le fait de se retrouver dans un espace avec un nombre de personnes considéré comme trop élevé par rapport à ce qui est attendu ou recherché dans ce lieu » [DIO,99]. Il est lié à deux types de facteurs : l'un relève de la dimension spatiale, l'autre de la dimension sociale. Effectivement, si l'espace peut être source de gêne, soit du fait de sa taille, soit du fait de son aménagement qui gêne alors les mouvements et la mobilité, les conditions sociales générées par la densité peuvent imposer des contacts visuels et verbaux non désirés initialement. Or, les individus ont besoin de garder un certain contrôle sur leur mobilité ainsi que sur leurs interactions sociales. Par conséquent, ils vont essayer de s'ignorer tout en prenant compte de la présence physique des autres [ARA,13]. Goffman a théorisé cette attitude par le concept « d'inattention civile » [GOF,71]. Finalement, comme le souligne Morval : « la densité est une condition nécessaire, mais pas toujours suffisante pour créer cette sensation » [MOR,81]. Il s'agit donc de tenir compte d'autres

facteurs, comme la structure plus ou moins importante de la foule ou des groupes, la taille même de l'espace, le fait de connaître ou non les personnes environnantes, l'âge de l'individu et des individus qui l'entourent, la culture, les attentes, le caractère plus ou moins chronique de la situation et du contexte lui-même, etc. Ainsi, les voyageurs urbains peuvent se retrouver face à un espace peu engageant, les amenant à adopter des stratégies spécifiques.

#### 6.1.2) Le besoin de « s'ancrer »

Cette recherche portée sur les comportements des voyageurs à l'intérieur des TPU a conduit à s'intéresser aux interactions entre deux formes spatiales : l'habitacle et le corps humain. Elle s'est appuyée dans un premier temps sur une approche inductive. L'expérience personnelle des transports en commun et des observations exploratoires ont permis de construire une grille d'observation qui a été alors appliquée à 12 villes dans 7 pays différents (France, Suisse, Allemagne, Estonie, Maroc, Hong Kong et Émirats Arabes Unis). Les comportements spatiaux des passagers ont été observés dans des tramways, des métros, des bus, un trolley-bus et un monorail. L'analyse des données était basée sur une démarche combinant le paradigme systémique de Le Moigne [MOI,94] et une approche géographique de l'espace, résultant en plusieurs échelles d'observation (du corps à l'environnement) et plusieurs axes (d'un bord à l'autre bord ou du nez à la queue du véhicule).

Le résultat général est assez évident : les gens préfèrent s'asseoir que de rester debout, ce qui se retrouve également dans la littérature [DUB,15]. Le pourcentage de sièges occupés est toujours supérieur au pourcentage d'occupation des places debout tant que tous les sièges ne sont pas occupés. Le taux d'occupation des places debout n'augmente que lorsque la quasi-totalité des sièges est occupée. Il est important de noter que le pourcentage de sièges occupés ne peut pas excéder 100% : les passagers ne montent généralement pas sur les genoux des autres ! Par contre, le pourcentage d'occupation des places debout le peut, suivant le critère de densité initialement considéré. En général, 100% d'occupation représente environ 4 personnes au mètre carré, mais en heure de pointe ce nombre peut monter à 6 ou plus. Accessoirement, ceci est un autre exemple pourquoi définir la densité est une tâche ardue. Il s'avère par ailleurs que les passagers seuls tendent à se placer sur les bords du véhicule, plus que ceux voyageant en groupe. En moyenne, plus de 60% des passagers sont assis : cela dépend des sièges disponibles, mais également de la fréquentation du transport. Or, la densité change suivant les heures de la journée, ce qui amène à observer plus de voyageurs assis. Néanmoins, durant les heures de pointe, plus de personnes sont debout dans les véhicules proposant moins de places assises (Figure 91). Si un autre élément du mobilier le permet, les gens vont chercher à s'asseoir

dessus (Figure 92). Les passagers debout essaient toujours de s'adosser contre quelque chose, principalement en restant sur les bords du véhicule pour prendre appui sur une surface pleine, mais si ce n'est pas possible, ils vont prendre appui contre des surfaces plus fines, comme les barres de maintien verticales situées plutôt vers le centre du véhicule (dans le « couloir »).



Figure 91 : Différentes affluences et stratégies associées (à gauche : métro classe C de Munich ; à droite : classe « Silver » du métro de Dubaï) (crédit photos : S. H. Gosset)



Figure 92 : Enfant assise sur un élément du mobilier dans un tramway à Berlin (crédit photo : S. H. Gosset)

En fait, chaque élément du mobilier finit par faire office d'appui : tout dépend de l'affluence. Chaque voyageur debout se tient au moins à une barre, que ce soit pour se stabiliser, prendre position pour « marquer son territoire », ou pour circuler à travers le véhicule. Les passagers qui ne se tiennent à rien sont rares. Finalement, le fait que les personnes tendent à s'appuyer contre quelque chose semble indiquer qu'elles essaient de stabiliser le haut de leur corps (quand elles sont assises, la plupart sont adossées *de facto*). La stabilité offerte en s'agrippant uniquement à une barre n'apparaît pas suffisante. Seule une exception a été observée : le monorail de Palm Jumeirah à Dubaï. Dans ce véhicule, les gens se déplacent

beaucoup, ce qui a perturbé les observations. En effet, la grille d'observation était construite pour étudier un espace relativement statique : en général, les passagers restent plutôt immobiles une fois installés dans le transport et ne bougent que pour en sortir. Ici, cette agitation est probablement due au fait que le monorail est principalement utilisé par des touristes regardant tout autour. Une autre explication peut être que le véhicule est très stable : les accélérations et décélérations sont très douces, donc les passagers n'ont pas vraiment besoin de se maintenir à quelque chose. À vrai dire, il y a une relative absence de supports dans le monorail, tandis que les véhicules secouant beaucoup, comme les bus, en offrent amplement.

Toutes ces observations aident à comprendre deux choses différentes, reliées entre elles. Premièrement, le besoin de stabilité est notable par la façon dont les passagers s'organisent dans le véhicule. S'agripper à une barre est le plus petit lien entre le corps et l'habitacle. La plupart des gens essaient de trouver un soutien du dos et si possible de s'asseoir. C'est pourquoi il est envisageable de considérer qu'il y a un besoin de « s'ancrez » dans le transport. La majorité des passagers ont besoin de plus que juste se tenir debout et éventuellement se tenir à quelque chose. Ainsi, la notion d'« ancrage » est proposée pour définir la tendance qu'ont les voyageurs de chercher un appui au moins pour leur pelvis, au mieux pour leur torse. Chercher un « point d'ancrage » peut être interprété comme l'expression d'une quête de sécurité, peut-être aussi de confort, spécialement pour les personnes debout durant les heures de pointe. Secondement, le cas du monorail, allant à l'encontre du reste des observations, montre que la dynamique du véhicule influence le besoin d'ancrage (ses accélérations, décélérations, vibrations, etc.). Plus un transport est stable, moins il y a besoin d'appuis. Finalement, il est acceptable de dire que cet ancrage du corps est le lien entre le confort et la sécurité, car l'ancrage permet aux passagers de sécuriser leur position, physiquement mais aussi psychologiquement, par la création d'un « espace personnel ». En conclusion, prendre place dans un TPU relève de deux activités : l'ancrage, via l'utilisation des supports pour garder l'équilibre, et la proxémie, en fixant des distances sociales envers les autres. A la lumière de tout ceci, une proposition pour une nouvelle représentation du confort passager dans les TPU est donnée dans la dernière partie de cette étude, afin de résumer tous les résultats obtenus.

## 6.2) Proposition pour une représentation à deux niveaux de la perception du confort pour le contexte des transports publics urbains

Deux niveaux de représentations sont proposés pour illustrer les deux rapports au confort définis par Le Goff dans le contexte des TPU. De même que pour les modèles de confort, leur objectif premier n'est pas de donner « la » réponse pour l'évaluation du confort,

mais plutôt de conceptualiser et de synthétiser les connaissances actuelles sur les facteurs influençant la perception du confort ou de l'inconfort dans ce contexte spécifique. Le premier niveau s'intéresse au confort « local », sensoriel, en relation au corps individuel. Il s'inspire des modèles de confort vus en partie 5.2.2) Modèles de confort ainsi que du processus de perception vu en partie 2.2) Le mécanisme de la perception. Le second niveau souhaite d'un autre côté prendre du recul sur l'interaction et l'intégrer dans une suite d'actions, celle du trajet urbain. Il réfère au confort « global », contextuel, en rapport au corps social. Il s'inspire notamment de l'analyse micropsychologique développée par Moles et Rohmer [MOL,76].

### 6.2.1) Confort du corps individuel : modèle d'interaction sensorielle

Le processus de perception décrit en neurosciences donne des étapes finalement assez similaires à celles proposées par Moes [MOE,05] (revoir Figure 28). Le modèle d'interaction sensorielle est illustré en Figure 93. Pour reprendre depuis le début, d'une façon simplifiée, une fois que les récepteurs sensoriels de l'organisme sont stimulés par une forme d'énergie provenant de l'environnement (début de l'interaction), ils vont émettre un potentiel d'action qui se diffusera à travers les fibres sensorielles jusqu'au système nerveux central. Ensuite, l'information sensorielle sera traitée dans les aires corticales et sous-corticales, résultant en une sensation. De là, plusieurs données entrantes peuvent altérer la perception de cette sensation : les émotions (ou l'humeur de l'individu), l'attention portée à la sensation et la mémoire de l'individu. Par la suite, l'appréciation de cette perception, portant une valence positive, négative ou neutre, pourra mener à un sentiment de confort, d'inconfort ou à un sentiment neutre, respectivement. Comme les attentes résultent de la mémoire d'événements passés, ils ont un impact certain sur l'appréciation de la perception.

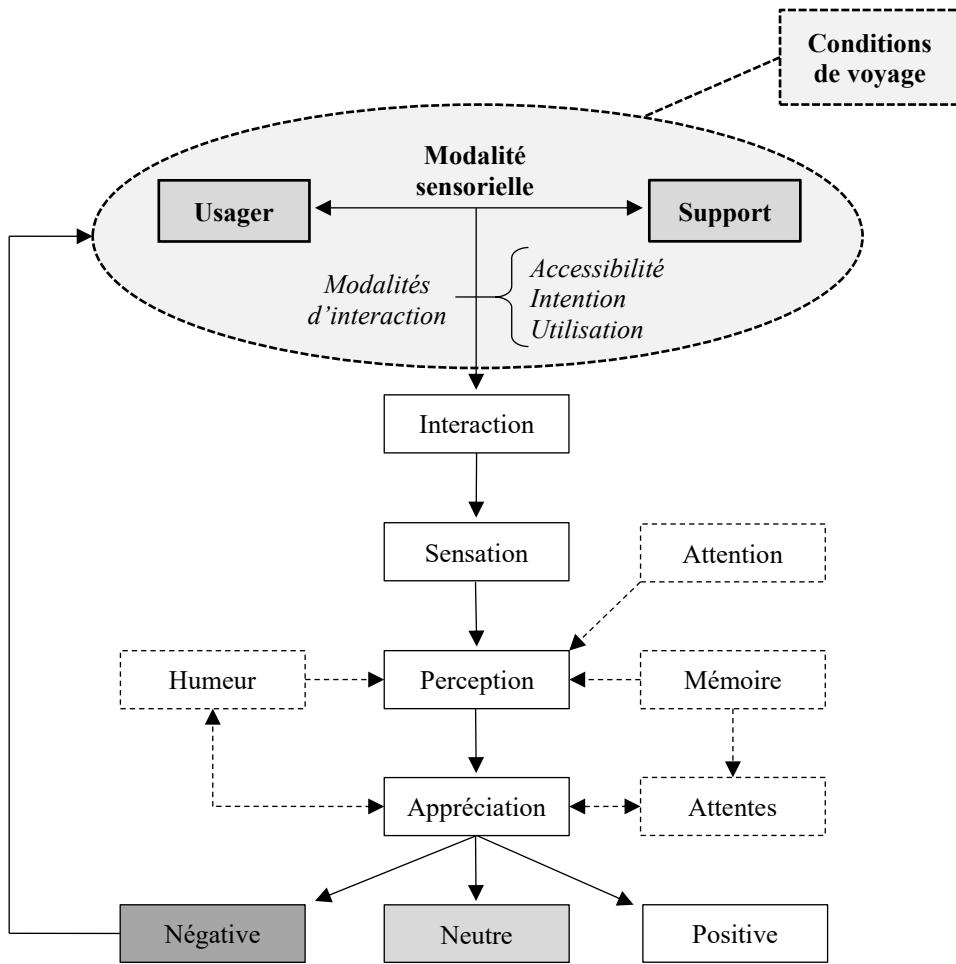


Figure 93 : Confort du corps individuel : modèle d'interaction sensorielle pour le contexte du voyageur urbain

De façon plus précise, pour le contexte des transports publics et pour l'intérêt de cette recherche, l'interaction mise en avant est celle de l'usager avec le support, comprenant globalement tout élément du mobilier sur lequel le passager pourra prendre appui lors du déplacement du véhicule. Le passager possède ses propres caractéristiques, qu'elles soient physiques, physiologiques ou psychologiques. De même, l'objet « support » a ses propres caractéristiques (type de matériau, esthétique, forme, etc...). Le contexte d'interaction correspond ici aux conditions de voyage, qui ne peuvent souvent pas être maîtrisées par le design même du matériel roulant et de l'aménagement intérieur. Comme vu précédemment, la densité de passagers est un exemple parmi d'autres qui influencent la perception du confort. Ensuite, l'interaction elle-même peut passer par plusieurs modalités sensorielles : le premier contact avec un support est généralement visuel, lorsqu'il s'agit d'identifier où se tenir dans l'habitacle, mais la suite implique les autres sens, comme le toucher lors de l'appui, dont un des aspects a été étudié dans le Chapitre 2 : Exploration pour la mesure de la perception tactile : évaluation du toucher tangentiel d'une surface. En fait, le processus de perception « met en jeu

l'ensemble des modalités sensorielles dans des relations temporelles différentes mais dans un espace combinatoire fini » [BA2,09]. En d'autres termes, cela signifie que les différentes modalités sensorielles peuvent intervenir simultanément ou à tour de rôle le temps d'une activité. L'identification de ces « apparitions » et « disparitions » permet notamment un meilleur ciblage des sensations à étudier lors d'une évaluation sensorielle, par exemple. Il est également intéressant de revenir sur la notion de routine, principalement pour distinguer les voyageurs réguliers et les voyageurs occasionnels. Effectivement, l'apparition d'une routine pour les personnes empruntant quotidiennement les TPU peut mener à un certain « non-voir », comme décrit par Levitte [LEV,10], leur permettant de se guider plus rapidement dans le véhicule (compétence acquise par l'expérience pour un certain contrôle de l'attention), ou encore à un certain « train-train » pouvant mener à un ennui profond et pénible (cf. la fameuse expression « métro, boulot, dodo ») [LEF,14]. La répétition de l'utilisation d'un transport mènera également à une certaine accoutumance, déjà évoquée à plusieurs reprises dans ce document, réduisant inexorablement au fil du temps tout « effet wow » éventuellement recherché avec le design du véhicule. Il apparaît donc évident que ce genre d'effet doit être continuellement entretenue, en variant l'environnement de transport de temps en temps.

Le dernier élément présent dans ce modèle traite des modalités d'interaction. Elles englobent trois aspects : l'accessibilité, l'intention et l'utilisation. L'accessibilité fait écho à l'idée d'ancrage. Suivant les conditions du voyage, l'accès à un support peut devenir compliqué, en heures de pointe par exemple où plusieurs personnes vont devoir se tenir à la même barre, obligeant celles-ci à faire quelques gymnastiques. Il faut donc veiller à offrir suffisamment de supports à des emplacements stratégiques pour réduire ces exercices inconfortables et peu sécurisants. Les deux derniers aspects, l'intention et l'utilisation, rappellent les conditions d'interaction évoquées dans les différents modèles de confort, avec la tâche à effectuer et l'usage. En effet, les voyageurs peuvent se servir du support comme d'un simple maintien, mais également (et surtout) comme un moyen de se stabiliser pour effectuer une autre activité, comme écrire un sms tout en restant debout. Cette condition détermine par exemple si l'activité souhaitée est réalisable, si elle nécessite de l'espace, une ou deux mains libres, ou encore la posture à adopter pour l'effectuer [DUB,15]. Pour finir, la boucle de retour partant de l'appréciation négative de la perception vers le début de l'interaction illustre le fait que le sentiment d'inconfort va souvent mener à un changement chez le sujet, lequel va chercher à atteindre un état plus confortable.

### 6.2.2) Confort du corps social : l'approche « 5 A »

Arrivé à ce stade de la réflexion, il faut prendre un peu de recul : le modèle d'interaction sensorielle illustre la rencontre entre le passager et le support à un niveau local, sensoriel, pris dans un contexte particulier. Une autre représentation du confort peut être dépeinte : le confort du corps social. Elle s'appuie sur le fait que le transport est seulement un moyen d'aller quelque part, il n'est pas la destination en elle-même (excepté le rare cas où il est utilisé en tant qu'attraction touristique, comme peut l'être le monorail de Palm Jumeirah). Le déplacement en TPU est simplement une étape dans le voyage de l'individu, plus ou moins préparé et ordinaire, rempli d'événements mémorables ou insignifiants. Comme les attentes jouent un rôle dans la perception du confort ou de l'inconfort (qu'est-ce que le passager attend de ce transport et que veut-il y faire ?), il est intéressant de considérer la vue d'ensemble. La perception du confort se produit dans une situation globale et peut se décliner en une multitude de facteurs plus ou moins complexes et dynamiques de diverses sortes, physiologiques ou psychologiques, parfois totalement hors de contrôle. Cependant, les éléments non-maîtrisables par les designers de l'aménagement intérieur peuvent parfois être contrôlés par d'autres acteurs du service de transport : les opérateurs ferroviaires, mais également les concepteurs des infrastructures ferroviaires. La nouvelle approche proposée dans cette dernière partie souhaite décomposer l'itinéraire du voyageur urbain selon ses cinq grandes étapes : Avant le trajet, Accueil dans le véhicule, Anchorage dans le véhicule, Activités exercées pendant le trajet, et Après la destination atteinte (voir Figure 94). Elle est appelée simplement « approche 5 A » et a pour but de mener à un design « holistique » des matériels roulants et de leur intérieur, ouvrant le dialogue entre les différents acteurs du transport de voyageurs et tâchant d'unifier les différentes problématiques rencontrées. La démarche s'inspire de l'approche micropsychologique développée par Moles et Rohmer [MOL,76].

Le principe de l'analyse micropsychologique consiste à décomposer une situation en actions élémentaires, à la limite des mouvements inconscients, afin d'établir une liste la plus complète et la plus fine possible de tous les scénarios possibles lors de l'exécution de l'action analysée. Cette méthode permet d'identifier les étapes et modalités sensorielles associées, mais aussi d'établir une liste préliminaire des éléments importants à étudier (éléments en contact, interfaces humain/objet, fréquence d'apparition, etc.), ainsi qu'évaluer leurs « coûts ». Ces derniers peuvent se décliner en plusieurs catégories : coût financier (prix monétaire de l'opération), coût énergétique (énergie physique consommée pour l'accomplissement de tel acte), temporel (temps passé à la réalisation de l'acte), cognitif (charge mentale associée à tel acte) et psychologique (ou aussi appelé coût de risque, correspondant à l'imprévisibilité du

déroulement de l'acte pour cause de méconnaissance de la situation ou de l'absence de contrôle sur celle-ci, provoquant une certaine angoisse ou un certain stress) [MOL,76][ING,97]. Ainsi, il est possible de distinguer différentes « micro-étapes » composant les « macro-étapes » identifiées par les « 5 A » du déplacement en TPU et de leur associer différents coûts, estimés de façon introspective à travers une approche phénoménologique [BA2,09][PIL,03].

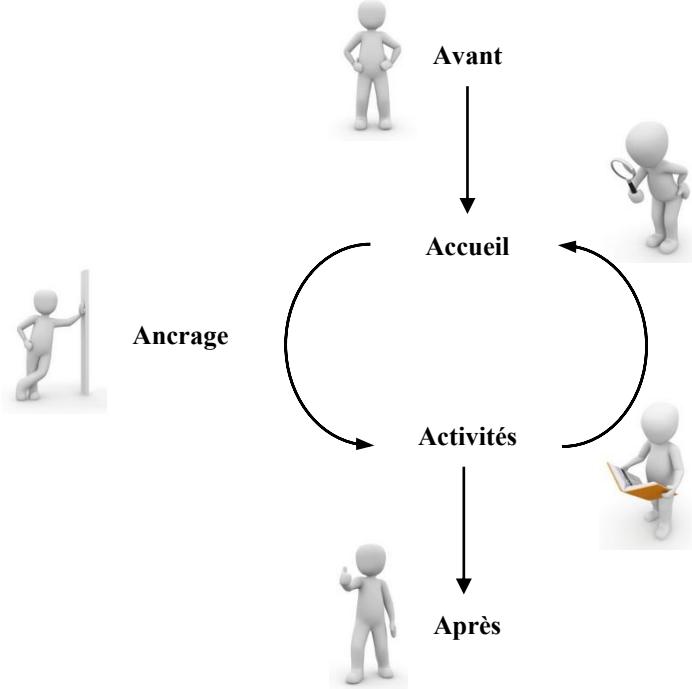


Figure 94 : Confort du corps social : l'approche globale « 5 A »

Les cinq « macro-étapes » retenues pour le contexte des TPU résument en fait simplement les grandes phases du parcours du voyageur lorsqu'il emprunte un transport en commun, lesquelles se déclinent en actions plus élémentaires. En voici une déclinaison sommaire et volontairement générale, qui méritera un affinement pour le projet considéré. Premièrement, la phase « Avant » inclue la préparation du voyage, jusqu'au moment où le voyageur s'apprête à entrer dans le véhicule. Les questions qu'il se pose peuvent être : le transport est-il payant ou gratuit ? Est-il accessible ? Y a-t-il beaucoup de monde sur le quai ? Le transport est-il en retard, etc ? Cette première étape, ne mettant pas encore en scène l'objet « support », traite plutôt de la question du service de transport dans lequel le passager va s'engager, de son infrastructure, de la qualité des informations auxquelles il a accès [RAZ,13], ou encore de son accessibilité. Elle construit des attentes primaires vis-à-vis du véhicule, en comparant le déplacement à venir avec les déplacements vécus, ou en l'insérant dans un « plan de voyage », comme être à l'heure à telle destination ou simplement se promener [KOG,79]. Ensuite vient l'étape d' « Accueil », où le voyageur entre dans le véhicule : y a-t-il beaucoup

de monde à l'intérieur ? Y a-t-il des sièges disponibles ? C'est à ce moment-là que le passager se trouve confronté aux conditions du voyage, où ses attentes se trouvent confirmées ou infirmées. Il va rencontrer son environnement, l'identifier, et ainsi pouvoir agir de façon adaptée (premiers contacts sensoriels). Au niveau de la conception d'appuis, c'est cette étape qu'il faut principalement soigner. Comme il a été vu précédemment, ce qui est perçu en premier doit être conçu en premier, sous peine de proposer un produit qui ne sera pas « justement perçu ». Dans un transport public urbain, cela va pouvoir se retrouver par exemple dans l'impression de propreté. Effectivement, il existe dans l'imaginaire collectif une croyance forte que les systèmes d'appuis sont le foyer de nombreuses bactéries, dû au fait qu'ils entrent en contact quotidiennement avec un très grand nombre de personnes dont l'hygiène n'est pas connue. Cette croyance populaire a même donné lieu à une étude new-yorkaise, où des microbiologistes ont cherché à identifier les germes présents dans le métro de New-York [LEE,15]. Il s'avère en fait que des centaines de types de bactéries ont été identifiées et sont pour la grande majorité sans danger. Par ailleurs, comme le notait Hall, les usagers ont tendance à avoir horreur de passer après un autre lorsqu'ils touchent une surface (fait observé pour les peuples sans-contact à travers son exemple de « l'assise chaude »). Cette aversion survient notamment suite à un toucher chaud, collant ou poisseux, dû à une utilisation précédente du support par un autre usager. Dans ce cadre, il est alors intéressant de se pencher sur la question de la « résilience » du matériau, soit de sa capacité à retourner rapidement à son état d'origine suite à une utilisation (retour à la température ambiante, surface ne permettant pas la présence de résidu de graisse ou d'humidité, propriétés antibactériennes, etc.). Dans ce sens, l'étape d'accueil représente un potentiel prérequis à confirmer en vue d'accéder à une forme de confort. Si une barre d'appui est perçue comme sale, l'usager ne voudra pas s'y accrocher, ou à défaut optera pour une stratégie d'ancre différente, comme utiliser ses vêtements ou un autre objet en tant qu'intermédiaire. Cela mène à la troisième étape. Après avoir pris connaissance de l'intérieur du véhicule, la personne va chercher un point d'« Ancre », comme évoqué précédemment. Par la suite, si celle-ci est suffisamment bien installée, « ancrée », elle peut s'adonner à des « Activités » variées : lire un livre, écouter de la musique sur son téléphone, rêvasser en regardant par la fenêtre, discuter avec son ou ses voisins, etc. Les activités pratiquées par les voyageurs ont été relevées dans de nombreuses études, et montrent bien que le temps passé dans le transport n'est quasiment jamais perdu. C'est encore plus vrai aujourd'hui avec l'évolution des pratiques (utilisation de smartphones, tablettes, liseuses...) : les voyageurs ont appris à occuper ce temps « vide », peu importe sa durée [RIC,12][DAU,15]. Pour aller plus loin, le choix d'un appui par le passager « n'est pas uniquement basé sur son confort tel qu'il

est exprimé par les places assises mais aussi sur la posture induite, le degré d'intimité (physique, visuel et sonore) vis-à-vis des autres passagers, la fermeture de l'espace, le repère dédié, etc » ([DAU,15], p. 39). Encore une fois, la densité de la foule va avoir une importance dans ce choix d'appui. Par ailleurs, il existe une « boucle » entre les étapes « Accueil », « Ancrage » et « Activités ». Celle-ci fait référence au fait que le passager peut vouloir changer sa situation dans le véhicule, que celle-ci soit liée à un inconfort, à un changement d'activité, ou encore qu'il cherche à se déplacer vers un autre support à un moment donné, si un siège s'est libéré et qu'il a envie de s'asseoir, par exemple. Enfin, la phase « Après » fait référence à la facilité avec laquelle le passager va pouvoir continuer son déplacement. Celle-ci peut être prise au sens large : de quoi le passager a-t-il besoin pour continuer son déplacement ? Cela va comprendre le système d'information à bord du véhicule (lui indiquant quand il doit sortir, lui permettant de s'organiser), mais également la facilité avec laquelle il pourra sortir du véhicule et se guider une fois sorti. Le voyageur, préparant déjà la suite de son déplacement, va pouvoir adopter des stratégies spécifiques pour sa sortie : s'approcher des portes avant l'arrivée à destination, s'installer plutôt à l'avant ou à l'arrière, etc. Cette idée reflète en partie le concept de « fluidité » si important aux yeux des constructeurs ferroviaires aujourd'hui (cf. le slogan d'Alstom : « concevoir la fluidité ») [ALS,14]. Le voyageur doit pouvoir s'engager dans un transport dans lequel il saura s'installer, s'orienter et se déplacer convenablement.

Le but cherché par l'identification et l'évaluation de tous les coûts est *in fine* de proposer un produit ou un service ayant un coût proche de zéro, considéré alors comme optimal [ING,97]. Dans ce cas, l'utilisation est totalement spontanée et n'est obérée par aucun facteur négatif (utilisation optimale). La « fluidité » serait atteinte lors de cet optimum du « coût zéro », surtout pour les coûts temporels, physiques et psychologiques. Cette recherche du moindre effort pour l'usager ne doit surtout pas être négligée, car dans un monde où le confort est roi, chaque contrainte sera perçue de façon négative et constituera un obstacle dans l'utilisation.

Cette revue assez globale des différentes étapes que traversent de nombreux individus tous les jours lorsqu'ils empruntent des transports publics urbains a pour intérêt de mettre à plat les différents contextes d'interaction entre le passager et le support et de montrer que, d'une manière générale, il est impératif de considérer l'objet ou le service en le plaçant en situation réelle d'usage. Dans une étude plus approfondie et plus centrée, il sera alors intéressant d'évaluer les différents « micro-coûts » intervenant tout au long des étapes considérées afin d'identifier les zones problématiques ou celles qui méritent le plus d'intérêt. De futures études seraient nécessaires afin d'évaluer l'importance de chaque micro-étape dans la perception du

confort, mais cela montre qu'un matériel roulant gagne à être conçu en prenant en compte l'intégralité du service de transport, à travers un dialogue entre ses différents acteurs.

### 6.2.3) Conclusion de la proposition

Il existe autant de façons de représenter le confort qu'il y a de situations. Il est toujours nécessaire de le redéfinir et d'adapter l'étude au contexte d'interaction en le confrontant à l'expérience. En fait, le confort est perçu à travers une pratique et diffère d'un individu à l'autre, d'une culture à une autre, d'une société à une autre, etc. Aussi difficile que cela semble être de l'évaluer, il est cependant possible d'étudier les paramètres qui rentrent en jeu dans sa perception. L'objectif de cette représentation à deux niveaux est d'aider les designers à mieux comprendre la notion de confort (et d'inconfort) et leur donner les outils avec lesquels le faire. Pour l'instant, ce ne sont que des recommandations pour des projets au cas par cas.

Pour le contexte spécifique des transports publics urbains, le confort peut se résumer par la « facilité de prendre place », ou de trouver « sa place à soi ». La dimension sociale imposée par la densité de la foule voyageuse ne peut pas vraiment être contrôlée par le seul design des matériels roulants, car il s'agit d'un paramètre très fluctuant et aléatoire. Des premières recommandations pourraient être de concevoir le transport urbain selon une approche holistique, globale, grâce à un véritable dialogue entre les différents départements attachés à la conception et au développement du matériel. Une autre perspective serait d'étudier en situation écologique comment les passagers perçoivent le mouvement du véhicule en rapport à leurs caractéristiques psychologiques, physiologiques et physiques (ex. leur âge, s'ils voyagent avec des bagages, etc.), en vue d'évaluer l'importance du comportement dynamique du véhicule sur les individus et sur les foules.

## Conclusion du chapitre 3

L'objectif de ce chapitre était dans un premier temps de mieux comprendre la notion de confort et d'inconfort d'une manière générale, afin d'ensuite chercher les différents facteurs influant sur la perception des passagers par rapport aux systèmes d'appui présents dans l'habitacle des véhicules de transport public urbain. Cette identification permettrait potentiellement de déterminer des propriétés de confort pour les supports.

Comme disait Le Goff : « le confort, c'est le monde dans lequel on vit » ([GOF,94], p. 203). Il correspond à un nouveau rapport au monde, dû à un changement sociétal majeur pour l'humanité, prenant son origine dans l'apparition des machines et de l'automatisation. Globalement, la perception du confort (ou de l'inconfort) naît d'une interaction entre un sujet

sentant/percevant et un objet senti/perçu, dans un contexte situé et situant. Ce rapport peut être de deux sortes. Le premier est dit « éphémère », où l'objet lui-même doit fournir un plaisir immédiat, sensoriel : il s'agit du « confort du corps individuel ». Le second est plutôt « programmé », rationalisé, où l'objet en question devient un moyen de rendre la vie du sujet plus facile, il s'insère dans une chaîne d'actions programmée : il s'agit du « confort du corps social ». La notion de confort est par essence très complexe et subjective, elle dépend du sujet, de sa culture, de son histoire, de la société, des circonstances, etc. Il est donc très difficile de l'évaluer directement, à la différence de l'inconfort qui semble plus objectivable. En effet, il apparaît que confort et inconfort possèdent leurs propres dimensions et leurs propres facteurs : le premier serait plutôt lié à des paramètres esthétiques et psychologiques tandis que l'autre à des paramètres biomécaniques et physiologiques.

Afin de conceptualiser la notion de confort et d'inconfort, des modèles sont apparus dans le secteur de l'ergonomie, afin de mettre en lumière les différents paramètres influant sur la perception du confort ou de l'inconfort et de déterminer lesquels étaient possibles de mesurer ou d'évaluer, que ce soit par des méthodes quantitatives ou qualitatives. Ces modèles ont principalement été orientés pour le confort d'assise sur un siège, ce qui ne permet pas de représenter le contexte des transports publics urbains, où les passagers peuvent se retrouver debout. Afin d'adapter les modèles actuels à cette situation, il a fallu dans un premier temps revoir les différents éléments du système sujet/objet/contexte et dans un deuxième temps se confronter aux pratiques pour déterminer les facteurs influençant la perception des passagers.

Grâce à des observations en situation écologique, il a été possible de distinguer de nouveaux paramètres propres à ce contexte. Dans un transport, le passager se retrouve souvent dans une foule d'inconnus, de densité plus ou moins importante, laquelle peut lui imposer différentes stratégies lors de son déplacement. De ces stratégies se distingue le besoin d'« ancrage », indépendant de la densité, exprimant le fait que le passager a besoin de se tenir voire de s'adosser contre un appui, qu'il s'agisse d'un siège (dans le meilleur des scénarios) ou d'une simple barre de maintien. Cet appui s'effectue non seulement pour maintenir son équilibre lors du déplacement du véhicule, mais également pour « prendre sa place », dans un lieu qui ne lui est pas directement attribué.

A la lumière de ces résultats, une proposition a été faite pour conceptualiser le confort à bord d'un transport en commun, à travers un modèle à deux niveaux. Le premier niveau représente l'interaction entre le passager et l'appui auquel il va « s'ancre ». Il s'inspire des modèles de confort provenant de l'ergonomie ainsi que du processus de perception décrit en neurosciences. Il s'agit du niveau « local », représentant finalement le premier rapport au

confort, celui du corps individuel. Le second niveau va quant à lui situer cette interaction et l'intégrer dans une suite d'étapes, celles que le passager va traverser tout au long de son parcours. Ce niveau « global » va tâcher de représenter le second rapport au confort, celui du corps social. En effet, il est considéré que chaque étape entourant l'interaction même entre le passager et le support va être consistante dans sa perception. Cette représentation s'inspire de l'analyse micropsychologique, et souhaite décomposer le voyage urbain en une série de « micro-étapes », chacune portant des coûts spécifiques (que ce soit en énergie physique, en temps, en charge mentale, en argent, ou encore en matière de risque). L'estimation de ces différents coûts permettra finalement d'évaluer le service de transport d'une façon globale et de déterminer sa cohérence, ou encore sa « fluidité », impactant directement son confort. Comme le notait Lefrançois : « le confort dans les transports en commun tiendrait à la capacité que les gens ont à s'y mouvoir aisément » ([LEF,14], p. 17), ce à quoi s'ajouteraient également leur capacité à y prendre place.

Pour conclure, l'étude du confort doit se faire selon une démarche transverse, interdisciplinaire, en faisant appel aux sciences humaines et sociales pour compléter les connaissances de l'ergonomie. Elle doit engager tous les acteurs du service de transport à unir leurs connaissances en vue de concevoir un objet qui soit cohérent et au service des usagers.

# Conclusion générale et perspectives de recherche

Le travail entrepris dans cette thèse visait à mener une réflexion pluridisciplinaire sur la question de la place du passager dans la conception du matériel roulant. Deux axes de recherche ont été explorés : le premier portait sur la mesure de propriétés tactiles d'une surface en toucher tangentiel grâce à la tribologie ; le deuxième interrogeait la notion de confort dans le contexte du transport public urbain, afin de potentiellement mieux comprendre les mécanismes sous-jacents à sa perception, puis d'identifier les différents facteurs l'influencant à travers la proposition d'une nouvelle représentation pour l'étude du confort passager.

Dans le premier chapitre, l'approche sensorielle a été présentée dans la première partie comme une solution pour la différenciation des produits ferroviaires dans un environnement complexe et techniquement très constraint. Les éléments actuels de conception des matériels roulants sont aujourd'hui peu maîtrisés d'un point de vue de la perception du passager. Cette démarche propose de remettre l'utilisateur final, le passager, au centre de la conception du service de transport, grâce à des méthodes permettant de maîtriser ses perceptions. L'évaluation sensorielle, atout majeur du design sensoriel, permet grâce à la métrologie sensorielle de mesurer les propriétés organoleptiques des produits, selon un cadre de référence bien défini. De nombreuses expériences ont été réalisées pour essayer de corrélérer des mesures instrumentales et sensorielles, dans le but de pallier les limites liées à l'appel de panélistes plus ou moins entraînés, notamment en phase de validation de la qualité de conformité du produit. Pour le cas de la modalité sensorielle tactile, le toucher tangentiel pose toujours problème. Cependant, plusieurs études faisant appel à la tribologie montrent des résultats prometteurs pour une corrélation entre les données tribologiques et le descripteur tactile « glissant ».

Une présentation du système perceptif humain était nécessaire en deuxième partie pour comprendre les mécanismes de la perception. Une introduction suffisamment complète de l'organisation des systèmes sensoriels ainsi que des différents processus cognitifs a permis de mieux comprendre comment se construisait la perception d'un stimulus. Le cas de la perception tactile a été abordée plus en détail pour présenter les différents types de toucher et comprendre les bases de leur fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre, le premier axe de recherche a permis de répondre à la première problématique, à savoir la question de l'objectivation des propriétés tactiles des matériaux en toucher tangentiel grâce à l'outil tribométrique. Cette première étude s'est déroulée sur trois séries d'essais tribologiques, en collaboration avec le CETIM. La première a permis de valider le tribomètre utilisé pour la mesure du frottement d'une surface grâce à des essais menés sur la peau de l'avant-bras de plusieurs volontaires. La deuxième série a permis de mesurer les propriétés tribologiques de 43 échantillons et de les confronter à des données sensorielles issues d'une épreuve simple de classement sur trois descripteurs tactiles : accrochant, adhérent et lisse. La mise en relation des données instrumentales et sensorielles n'a pas permis d'observer de corrélation suffisante entre les différents paramètres. Cependant, l'analyse statistique des données tribologiques a permis de distinguer certains types de matériaux, chacun d'entre eux présentant des propriétés tactiles spécifiques. Afin d'examiner plus en détail cette différenciation, le nombre d'échantillons a été réduit et la méthodologie sensorielle revue.

La troisième série d'essais a été effectuée sur un groupe réduit de 12 échantillons et a été complétée par un profil de rugosité. En parallèle, une épreuve de napping a été choisie pour plusieurs raisons : mettre de côté les difficultés liées au choix des descripteurs tactiles, faire appel à un groupe de sujets non entraînés et obtenir un profil sommaire des échantillons dans un temps très bref. Dans les conditions de cette dernière exploration, il a été constaté que les sujets naïfs percevaient principalement le relief de la surface, la chaleur, le caractère accrochant et la dureté. Des coefficients de corrélation supérieurs à 0,75 ont été calculés entre les données mesurées par profilométrie et tribométrie et les termes associés au relief et au caractère accrochant des surfaces, respectivement. Cela semble montrer qu'une partie de l'information sensorielle peut effectivement être traduite grâce à ce type d'instrumentation. Il apparaît alors envisageable de considérer une suite pour le « tribomètre sensoriel », en effectuant des essais sur des échantillons présentant une différenciation maîtrisée et donc de travailler sur des intervalles plus réduits. Néanmoins, la méthode instrumentale montre vite ses limites : de la même manière qu'il est nécessaire « d'étalonner » le panel sur un espace produits pour l'entraîner à décrire de façon juste et fidèle, il va être nécessaire d'adapter la machine selon les sensations humaines décrites par une évaluation sensorielle. Elle ne pourra donc pas être utilisée en tant qu'outil prospectif, mais seulement en tant qu'outil de mesure monodimensionnel. Par là même, lorsqu'il s'agit d'interroger les perceptions humaines, la métrologie en général va devenir caduque. Ainsi, il sera nécessaire de prendre du recul et de sortir du laboratoire pour

être en mesure d'étudier les perceptions du passager, et par extension ses attentes en matière de propriétés de confort pour les matériaux.

Dans le troisième chapitre, le deuxième axe de recherche a permis de mieux comprendre les facteurs influençant la perception du confort et de l'inconfort, puis de proposer une nouvelle représentation du confort pour le contexte du transport public urbain, répondant alors à la deuxième problématique de recherche. La première partie de cette seconde étude a présenté le concept de confort selon une approche historique pour montrer l'évolution de sa signification à travers les époques et les sociétés. Celui-ci a été défini comme la réaction d'un sujet à un objet dans un contexte d'interaction spécifique. Il a ensuite été divisé en deux concepts : le confort du corps individuel, où le confort est un but à atteindre, représentant alors un plaisir immédiat et sensoriel, puis le confort du corps social, où le confort est un moyen d'atteindre plus facilement un objectif particulier, s'insérant dans une série d'actions programmée. Il est également vu que le confort est une notion très subjective, dépendante du sujet, de sa culture, de son histoire, ou encore des circonstances d'interaction. Il est donc très difficile de l'évaluer directement, à la différence de l'inconfort qui, dans l'usage d'un objet, semble plus objectif. En effet, ce dernier est plutôt influencé par des facteurs physiologiques et biomécaniques, pouvant faire l'objet de mesures. Un effort de conceptualisation du confort a été initié par des ergonomes à la fin des années 90 puis a continué jusqu'à aujourd'hui. Il a donné lieu à des modèles de confort ergonomiques donnant un cadre d'étude pour le confort d'assise dans un premier temps, puis pour le confort en général très récemment.

De la même manière que pour la construction de ces modèles, une réflexion multidisciplinaire a été entreprise pour construire un cadre d'étude pour le confort dans un transport public urbain. Des observations menées en situation écologique ont permis de distinguer deux nouveaux aspects spécifiques à ce contexte. Lors d'un trajet urbain, le passager se retrouve confronté à une masse d'inconnus avec laquelle il doit interagir de manière non-voulue. L'importance de cette masse est définie par le critère de densité, dont l'évaluation a été jugée problématique. Selon cette densité, le passager va devoir adopter des stratégies particulières pour maîtriser sa mobilité. De plus, il s'avère qu'il existe une stratégie commune à la grande majorité des voyageurs et indépendante de cette densité, nommée l'« ancrage ». Ce terme exprime le besoin qu'ont les passagers à se tenir appuyés voire adossés contre un support. Il a été vu que cet appui s'effectuait non seulement pour se maintenir en équilibre, mais également pour « prendre place » dans un lieu qui ne leur est pas directement attribué. À la lumière de ces résultats, une proposition a été faite pour modéliser le confort à bord d'un

transport en commun, selon une représentation à deux niveaux. Le premier niveau représente l'interaction entre le passager et l'appui auquel il va s'ancrer, d'un point de vue sensoriel. Il est considéré comme étant « local » et souhaite représenter le premier rapport au confort, celui du corps individuel. Le second niveau cherche quant à lui à situer l'interaction et à l'intégrer dans la suite d'étapes jonchant le parcours du voyageur, selon une approche inspirée de l'analyse micropsychologique. Ce niveau « global » souhaite représenter le deuxième rapport au confort, celui du corps social. Finalement, il a été conclu que le confort dans le contexte des transports publics urbains tient à la capacité que les gens ont à y maîtriser leur mobilité ainsi qu'à y prendre place, d'un point de vue spatial et psychologique.

## **Contributions significatives**

L'étendue des connaissances nécessaires à l'étude du confort dans sa globalité ne peut pas être réduite dans une seule discipline scientifique. Cette thèse a montré qu'il était primordial d'adopter une approche multidisciplinaire et anthropocentrale pour prétendre améliorer les perceptions des usagers, à la croisée entre les sciences dites « dures » (sciences de l'ingénieur) et les sciences dites « molles » (sciences humaines et sociales).

D'un point de vue méthodologique, l'exploration menée dans ce qui a été appelé la « tribologie sensorielle » a permis d'amorcer le développement d'une méthode objective permettant la mesure de propriétés organoleptiques de surfaces liées au toucher tangentiel. Cependant, elle nécessite un référentiel d'échantillons plus fourni pour potentiellement obtenir de meilleurs résultats. Il serait alors intéressant de travailler par la suite sur des échantillons caractérisés sensoriellement en amont et présentant un gradient selon la sensation d'accroche, afin d'étendre la représentativité de l'étude.

Concernant la notion de confort, il faut constater qu'il existe autant de représentations qu'il y a de situations. Même si la recherche d'un modèle universel apparaît vaine, il existe tout de même des points communs entre les différentes perceptions du confort, ce qui permet de construire un cadre d'étude suffisamment global pour inclure différents scénarios d'un même type d'interaction. Les deux niveaux de représentations proposés dans cette thèse ont semblé être nécessaires là où il n'existe pas vraiment de base de connaissances sur le confort dans le contexte du transport public urbain. En allant plus loin, il faut tout de même constater que l'ouvrage le plus complet sur ce thème, « L'invention du confort » de Le Goff [GOF,94], a été publié il y a plus de 20 ans mais est pourtant toujours autant d'actualité. Cela reflète finalement la lenteur de développement des intérieurs des matériels roulants, prisonniers des contraintes

techniques et financières. Un des souhaits de cette thèse était de remettre en lumière les travaux de cet auteur et de les coupler avec les avancées dans le domaine de l'ergonomie « du confort » développée notamment par les chercheurs de l'université de Delft, aux Pays-Bas.

Le confort, malgré son ancienneté, évolue avec la société, ce qui fait qu'il n'a jamais été autant d'actualité.

## Perspectives de recherche

Dès lors qu'il s'agit d'explorer les différentes sensations que pourraient procurer tel objet sur telle partie du corps, le champ des possibles devient gigantesque.

Dans cette recherche, seule une petite partie du toucher a été explorée : la sensation d'accroche. En s'intéressant aux autres propriétés tactiles des matériaux, il est possible de mener bien d'autres études. Par exemple, en restant sur l'objet « appui », la variété d'activités pouvant être menées par les voyageurs lors d'un trajet invite à mener une réflexion sur la forme des appuis, ainsi qu'étudier de nouveaux modes d'ancrage, impliquant une nouvelle vision pour l'aménagement intérieur. Il est déjà connu par des designers que le simple fait de pouvoir choisir sa position est un confort en soi, ce qui se retrouve dans le besoin de maîtriser sa mobilité et sa place.

Un autre aspect non étudié est la texture des surfaces. Lors d'une visite à Hong Kong, il a été possible d'observer un élément du mobilier qui n'existe pas vraiment en France : les barres d'appui présentent une texture spécifique et une couleur saillante à hauteur de bras (jaune sur gris ou rouge sur gris, suivant les métros), semblant alors indiquer aux passagers que c'est ici l'endroit où il faut s'ancrer (Figure 95). La texture offerte par ces barres offre un nouveau toucher qu'il serait intéressant de comparer à des barres non texturées. De même, la modalité sensorielle visuelle est clairement mobilisée par ces couleurs vives, probablement utilisées pour aider le passager à repérer les lieux où il peut s'appuyer en cas de forte densité. Cette signalétique de l'espace, relativement peu présente aujourd'hui dans les transports actuels, est encore un élément à explorer, notamment en matière de sécurité à bord.

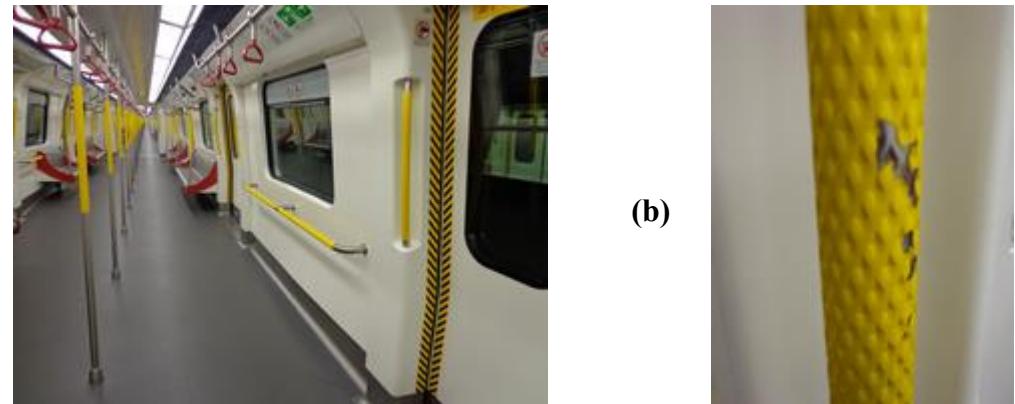


Figure 95 : (a) Intérieur du nouveau métro de Hong Kong, (b) Détail d'une barre d'appui (photos personnelles)

Pour conclure sur la modalité sensorielle tactile, la perception du chaud et du froid semble avoir son importance lors de la préhension d'une barre. Ceci est à mettre en parallèle avec la notion de « résilience » du matériau, à prendre au sens de la capacité pour le matériau à reprendre son état initial après usage. En effet, se maintenir à une barre va naturellement la réchauffer, après quoi elle mettra quelques temps avant de se remettre à température ambiante. Il apparaît que la sensation de froid (provoquée par la faible effusivité thermique du métal composant généralement les barres de maintien) est plutôt associée à la propreté, tandis que la sensation de chaud est associée à la saleté, sujet critique dans le milieu des transports publics urbains (le « fameux » léchage répugnant de la barre de métro [LOU,15]).

Pour terminer cette conclusion générale, la conceptualisation du confort est une résolution très actuelle. L'organisation du *First International Comfort Congress* au début du mois de juin 2017 en est la démonstration la plus marquante. Il y a une réelle volonté de la part des chercheurs et industriels de « cracker » la notion de confort, mais il manque aujourd'hui une uniformisation des méthodes et techniques pour son évaluation, que ce soit dans le secteur du transport (qu'il soit ferroviaire, automobile, aérien ou naval), mais également dans tous les secteurs proposant un produit ou un service.

## Bibliographie

- [ABD,17] A. Abdouni, M. Djaghoul, C. Thieulin, R. Vargiolu, C. Pailler-Mattei et H. Zahouani, « Biophysical properties of the human finger for touch comprehension : influences of ageing and gender », Royal Society open science, vol. 4, n°8, 2017.
- [AFN,07] Association française de normalisation, Analyse sensorielle: recueil, normes, agroalimentaire. La Plaine Saint-Denis: AFNOR, 2007.
- [AFN,12] Association française de normalisation. NF V09-500 Décembre 2012. Analyse sensorielle - Méthodologie - Directives générales pour la réalisation d'épreuves hédoniques effectuées avec des consommateurs dans un espace contrôlé, 2012.
- [AFN,13] Association française de normalisation. NF EN 16271 Février 2013 - Management par la valeur - Expression fonctionnelle du besoin et cahier des charges fonctionnel - Exigences pour l'expression et la validation du besoin à satisfaire dans le processus d'acquisition ou d'obtention d'un produit. 2013.
- [AFN,82] Association française de normalisation. X35-002 Juillet 1982 - Modèles anthropométriques de la population masculine et féminine. La Plaine Saint-Denis: AFNOR, 1982.
- [ALS,14] Alstom Transport, « Concevoir la fluidité », Brochure commerciale, 2014.  
<http://www.alstom.com/Global/Transport/Resources/Documents/brochure2014/Designing%20Fluidity%20-%20Brochure%20-%20FR%20-%20LD.pdf>
- [APP,91] S. Appelle, « Haptic perception of form: activity and stimulus attributes », dans The Psychology of Touch, Psychology Press, 2013, p. 169-188.
- [ARA,13] M. Aranguren et S. Tonnellat, « Comment supporte-t-on les rames bondées ? - Le rôle des émotions dans le métro parisien », metropolitiques.eu, 14 octobre 2013.  
<http://www.metropolitiques.eu/Comment-supporte-t-on-les-rames.html>
- [ARI,93] Aristote, De l'âme. Paris: Flammarion, 1993.
- [BAR,95] J.-C. Baron, « Neuro-anatomie fonctionnelle de la perception : Etudes par la tomographie à positons », dans Perception et agnosies, De Boeck Supérieur, 1995, p. 119.
- [BAS,95] J.-F. Bassereau, Cahier des charges qualitatif design, élaboration par le mécanisme des sens. Thèse de doctorat ENSAM, Paris, 1995.
- [BA1,09] J.-F. Bassereau, R. Charvet-Pello, et L. Bonnamy, « Design sensoriel », Techniques de l'ingénieur. L'Entreprise industrielle. 2009.
- [BA2,09] J.-F. Bassereau, « Évaluation sensorielle d'objets autres qu'alimentaires et cosmétiques sur des modalités sensorielles autres qu'olfactives et gustatives », dans Évaluation sensorielle (3d éd.) : Manuel méthodologique, chapitre 9, Ted & Doc Lavoisier, p. 243-274, 2009.

[BAS,11] J.-F. Bassereau et R. Charvet-Pello, Dictionnaire des mots du sensoriel. Paris: Éd. Tec & Doc : Lavoisier, 2011.

[BAU,15] L. J. Baudu, « L'expérience passager, une stratégie différenciante pour les compagnies », latribune.fr, 12 juin 2015.

(<http://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/aeronautique-defense/l-experience-passager-une-strategie-differenciatrice-pour-les-compagnies-483777.html>)

[BOL,88] S. J. Bolanowski, G. A. Gescheider, R. T. Verillo et C. M. Checkosky, « Four channels mediate the mechanical aspects of touch », Journal of the Acoustical Society of America, vol. 84, n°5, p. 1680-1694, 1988.

[BRO,08] L. Brown, « Interview with Xavier Allard », EURAILmag Business & Technology, Issue 18, p. 96-97, 2008.

[CAL,16] A. Calas, J.-F. Perrin, C. Plas, P. Vanneste, et J. Figarella, Précis de physiologie. 2016.

[CGD,16] « Vingt-cinq années de transport intérieur de voyageurs », Commissariat Général du Développement Durable (CGDD), Paris, 148, mai 2016.

[CHE,09A] X. Chen, C. J. Barnes, T. H. C. Childs, B. Henson, et F. Shao, « Materials' tactile testing and characterisation for consumer products' affective packaging design », Materials & Design, vol. 30, n° 10, p. 4299-4310, 2009.

[CHE,09B] X. Chen, F. Shao, C. Barnes, T. Childs, et B. Henson, « Exploring relationships between touch perception and surface physical properties », International Journal of Design, vol. 3, n° 2, p. 67–76, 2009.

[CHR,65] Saint Jean Chrysostome, Commentaires sur l'Évangile selon saint Jean, Homélie LXXXVII. Traduites pour la première fois sous la direction de M. Jeannin, Bar-le-Duc, L. Guérin & Cie, éditeurs, 1865.

(<http://abbaye-saint-benoit.ch/saints/chrysostome/jean/089.htm>)

[COH,06] M. Cohn, « I didn't know I needed that !: Finding features to satisfy your customers », mountaingoatsoftware.com, 2006.

(<https://www.mountaingoatsoftware.com/articles/i-didnt-know-i-needed-that>)

[CON,58] Article 72 de la constitution du 4 octobre 1958.

(<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexteArticle.do;?idArticle=LEGIARTI000006527579&cidTexte=LEGITEXT000006071194>)

[CRO,02] S. Crochemore, C. Vergneault, et D. Nesa, « Les corrélations sensorielles/instrumentales : promesses/difficultés et limites/potentialités », Renault, 2002.

[CRO,04] S. Crochemore, D. Nesa, et S. Couderc, « Analyse sensorielle des matériaux d'habitacle automobile: toucher/vision ». Ed. Techniques Ingénieur, Paris, 2004.

[CUT,90] M. R. Cutkosky et R. D. Howe, « Human grasp choice and robotic grasp analysis », dans S. T. Venkataraman et T. Iberall (Eds.), Dextrous robot hands (p. 5-31). New York: Springer-Verlag, 1990.

[DAM,03] A. R. Damasio, Spinoza avait raison - Le cerveau de la tristesse, de la joie et des émotions. Odile Jacob, 2003.

[DAU,15] A. Dautun, « Le rôle des appuis au sein des transports en commun urbains : le cas des barres d'appui du tramway de Tours », Projet de fin d'études, Polytech'Tours, 2015.

[DAV,15] S. Davis, K. Nesbitt, et E. Nalivaiko, « Comparing the onset of cybersickness using the Oculus Rift and two virtual roller coasters », dans Proceedings of the 11th Australasian Conference on Interactive Entertainment (IE 2015), 2015, vol. 27, p. 30.

[DEL,03] A. Delorme et M. Flückiger, Perception et réalité: une introduction à la psychologie des perceptions. Bruxelles: De Boeck, 2003.

[DEL,07] G. Delepaut, « Contribution de la linguistique cognitive à l'identification du confort : analyse des discours des passagers sur le confort en train », Thèse, Université La Sorbonne Nouvelle - Paris 3 - Ecole Doctorale 268 : Langage et Langues, 2007.

[DEL,10] L. Delahaye, M. S. Le Gac, C. Martins-Carvalho, L. Vazel, G. Potard, et R. Marianowski, « Gap between odor perception threshold and identification threshold: Calculation based on a graph of the Biolfa® olfactory test », European Annals of Otorhinolaryngology, Head and Neck Diseases, vol. 127, n° 4, p. 130-136, 2010.

[DEP,09] F. Depedt, Évaluation sensorielle (3d éd.) : Manuel méthodologique. Paris: Ted & Doc Lavoisier, 2009.

[DES,02] P. Desmet et P. Hekkert, « The basis of product emotions », Pleasure with products, beyond usability, p. 60–68, 2002.

[DES,08] P. Desmet, « Product Emotion », in Product Experience, Elsevier, 2008, p. 379-397.

[DÉS,13] D. Désveaux, T. Richez, F. Blerot, V. Cottet, et F. Cuillier, Tramways à la française. Paris : Archibooks + Sautereau, 2013.

[DIO,99] D. Dion-Le Mée, « La foule dans un contexte commercial : concept, mesure, effets sur les comportements », Thèse, Université de Rennes 1, 1999.

[DUB,02] D. Dubois, « Sciences humaines et cognitives : des sciences pour l'ingénieur ? », dans Journée d'étude ANAEM, Lettres de l'ANAEM, Paris, 2002.

[DUB,15] F. Dubois et S. Ségrétain, « Étude du confort debout en Transilien : observations et entretiens », 13<sup>ème</sup> Journée du Sensolier, 2015.

[DUC,16] E. Duclercq, « La réalité virtuelle et la nausée : les résultats », LudoTIC Ergonomie des interfaces, 21 juillet 2016.

(<http://www.ludotic.fr/realite-virtuelle-nausee-resultats/>)

[EKK,12] P. Ekkekakis, « Affect, Mood, and Emotion », dans Measurement in sport and exercise psychology, Champaign, IL: Human Kinetics, 2012, p. 321-332.

[EEP] Eurostar Engineering Plastics, Fiche produit « HU 30E4 ECR ».

(<http://www.eurostar-ep.com/wp-content/uploads/pdfs/PDF-0280-hu-30e4-ecr-starpylen-1460468717.pdf>)

[ERG,A] Système de bases de données en Anthropométrie et Ergonomie ERGODATA.  
(<http://www.ergodata-laa.com/FR/index.htm>)

[ERG,B] Définition de l'ergonomie.  
(<http://www.ergonomie.eu.com/>)

[ESC,08] B. Escofier et J. Pagès, Analyses factorielles simples et multiples: objectifs, méthodes et interprétation. Paris: Dunod, 2008.

[EUR,12] « CERTESENS – Enter the realm of the senses », EURAILmag Business & Technology, n°26, p. 112-115, 2012.

[EVE,11] N. Everaert-Desmedt, « La sémiotique de Pierce », dans Louis Hébert (dir.), Signo [en ligne], Rimouski (Québec), 2011.  
(<http://www.signosemio.com/peirce/semitotique.asp>)

[FAB,11] S. Fabrégat, « La Commission européenne présente sa stratégie transports pour 2050 », actu-environnement.com, 29 mars 2011.

(<https://www.actu-environnement.com/ae/news/transports-union-europeenne-2050-fret-report-modal-moteurs-combustion-vehicules-propres-peage-urbain-12250.php4>)

[FEI,11] T. Feix, « Anthropomorphic Hand Optimization based on a Latent Space Analysis », Technische Universität Wien, Wien, 2011.

[FIE,14] T. Field, Touch, Second edition. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2014.

[FRI,88] N. H. Frijda, « The laws of emotion. », American psychologist, vol. 43, n° 5, p. 349-358, 1988.

[GAR,14] C. Garcia-Zunino, « L'effet WOW ! De la satisfaction à l'enchantement du client », journaldunet.com, 28 août 2014.

(<http://www.journaldunet.com/ebusiness/expert/58283/l-effet-wow---de-la-satisfaction-a-l-enchantement-du-client.shtml>)

[GEL,72] F. A. Geldard, The Human Senses. New York: Wiley, 1972.

[GIB,00] A. Giboreau et A. Bardot, « Évaluation sensorielle tactile des plastiques », Caoutchoucs & Plastiques, n° 789, p. 43-46, 2000.

[GIL,12] L. Gilbert, Caractérisation physico-chimique et sensorielle d'ingrédients cosmétiques : une approche méthodologique. Thèse de doctorat, Université du Havre, 2012.

[GOF,71] E. Goffman, Relations in public: Microstudies of the public order. New York: Harper and Row, 1971.

[GOF,94] O. Le Goff, L'invention du confort: naissance d'une forme sociale. Lyon : France: Presses universitaires de Lyon, 1994.

[HAB,77] S. Habsburg et L. Middendorf, « What really connects in seating comfort ? – Studies of correlates of static seat comfort », SAE Technical Paper 770247, 1997.

[HAL,71] E. T. Hall, traduit de l'anglais par A. Petita, La dimension cachée. Paris, France: Éd. du Seuil, 1971.

[HAY,14] L. Haywood et M. Koning, « L'enfer dans le métro parisien, c'est les autres », metropolitiques.eu, 1 octobre 2014.

(<http://www.metropolitiques.eu/L-enfer-dans-le-metro-parisien-c.html>)

[HEL,84] M. A. Heller, « Active and passive touch: The influence of exploration in time on form recognition », Journal of General Psychology, vol. 110, p. 243-249, 1984.

[HIE,15] S. Hiemstra-van Mastrigt, Comfortable passenger seats: Recommendations for design and research. TU, 2015.

[HOL,93] M. Hollins, R. Faldowski, S. Rao, et F. Young, « Perceptual dimensions of tactile surface texture: A multidimensional scaling analysis », Perception & psychophysics, vol. 54, n° 6, p. 697–705, 1993.

[ING,97] Eurosyn Développement, L'ingénierie centrée sur l'homme ou la prise en compte des facteurs humains dès les premières phases de la conception. Document réalisé avec l'appui et le financement du Ministère de l'Industrie, de la Poste et des Télécommunications, Direction Générale des Stratégies Industrielles, Service de la Technologie et de la Stratégie, 1997.

[ISO,07] Organisation internationale de normalisation. ISO 8589:2007. Analyse sensorielle - Directives générales pour la conception de locaux destinés à l'analyse, 2007.

[ISO,08] Organisation internationale de normalisation. ISO 5492:2008. Analyse sensorielle – Vocabulaire.

[ISO,17] Organisation internationale de normalisation. ISO 6658:2017. Analyse sensorielle - Méthodologie - Lignes directrices générales, 2017.

[ITD,16] Institute for Transportation & Development Policy (ITDP), People Near Transit: Improving Accessibility and Rapid Transit Coverage in Large Cities. New York: ITDP, 11 octobre 2016.

(<https://www.itdp.org/publication/people-near-transit/>)

[JOH,83] R. S. Johansson et R. H. La Motte, « Tactile detection thresholds for a single asperity on an otherwise smooth surface », Somatosensory Research, vol. 1, p. 21-31, 1983.

[JON,06] L. A. Jones et S. J. Lederman, « End-effector Constraints », dans Human Hand Function, Oxford University Press, USA, 2006.

[JON,09] L. A. Jones, « Thermal touch », Scholarpedia.org, 2009.

([http://www.scholarpedia.org/article/Thermal\\_touch](http://www.scholarpedia.org/article/Thermal_touch))

[KAN,84] N. Kano, N. Seraku, F. Takahashi et S. Tsuji, « Attractive quality and must-be quality », Hinshitsu (Quality), vol. 14, n°2, p. 39-48, 1984.

[KAW,82] Kawabata S., Niwa M, Sakaguchi H., « Application of the new thermal tester Thermolabo to the evaluation of clothing comfort, in the objective specification of fabrics quality, mechanical properties and performance”, Objective measurement: Applications to product design and process control, The Textile Machinery Society of Japan, 1982.

[KLA,87] S. J. Lederman et R. L. Klatzky, « Hand movements: A window into haptic object recognition », Cognitive Psychology, vol. 19, p. 342-368, 1987.

[KOG,79] K. Kogi, « Passenger Requirements and Ergonomics in Public Transport », Ergonomics, vol. 22, n° 6, p. 631-639, 1979.

[KRO,14] E. Kroes, M. Kouwenhoven, L. Debrincat, et N. Pauget, « Crowding on public transport for Île-de-france », dans Valuing Convenience in Public Transport, OECD Publishing, 2014, p. 151-175.

(<http://dx.doi.org/10.1787/9789282107683-en>)

[LAD,11] AFP, « Hans Makart "peintre des sens": exposition exceptionnelle à Vienne », ladepeche.fr, 9 juin 2011.

(<http://www.ladepeche.fr/article/2011/06/09/1102684-hans-makart-peintre-des-sens-exposition-exceptionnelle-a-vienne.html>)

[LEC,15] B. Le Corre, « Oculus Rift : jouer ou vomir, il faut choisir ? », L'OBS avec Rue89, 7 mai 2015.

(<http://tempsreel.nouvelobs.com/rue89/rue89-tech/20160329.RUE8971/oculus-rift-jouer-ou-vomir-il-faut-choisir.html>)

[LED,97] S. J. Lederman, « Skin and touch », Encyclopedia of human biology, vol. 8, p. 49-61, 1997.

[LEE,15] R. Lee Hotz, « Big Data and Bacteria : Mapping the New York Subway's DNA », The Wall Street Journal [wsj.com], 5 février 2015.

(<https://www.wsj.com/articles/big-data-and-bacteria-mapping-the-new-york-subways-dna-1423159629>)

[LEF,03] A. Lefebvre et J.-F. Bassereau, « L'analyse sensorielle, une méthode de mesure au service des acteurs de la conception ! : ses avantages, ses limites, ses voies d'amélioration. Application aux emballages », 10ème séminaire CONFERE, Belfort, p. 3-11, 2003.

[LEF,14] D. Lefrançois, « Trains de vies : Ethnographie des transports urbains et périurbains », Rapport final, Lab'Urba EA 3482, Université Paris-Est, 2015.

([http://orderinf.eu/?page\\_id=17&lang=en](http://orderinf.eu/?page_id=17&lang=en))

[LEG,a] Loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée.

(<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000693683>)

[LEG,b] Article L5216-5 du Code général des collectivités territoriales.

(<https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?idArticle=LEGIARTI000033974859&cidTexte=LEGITEXT000006070633>)

[LEG,c] Code des transports. Partie Législative. Livre II : Les principes directeurs de l'organisation des transports, Titre III : L'organisation générale des services de transport public urbain.

(<https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?cidTexte=LEGITEXT000023086525>)

[LEM,08] B. Hopquin, « Métro : les naufragés de la ligne 13 », LeMonde.fr, 8 avril 2008.

([http://www.lemonde.fr/societe/article/2008/04/08/metro-les-naufrages-de-la-ligne-13\\_1032291\\_3224.html](http://www.lemonde.fr/societe/article/2008/04/08/metro-les-naufrages-de-la-ligne-13_1032291_3224.html))

[LEM,16] Le Monde.fr avec AFP, « Transport : les grandes villes du monde continuent de mal desservir leur population », LeMonde.fr, 11 octobre 2016.

([http://www.lemonde.fr/planete/article/2016/10/11/les-grandes-villes-du-monde-continuent-a-mal-desservir-leur-population\\_5011445\\_3244.html](http://www.lemonde.fr/planete/article/2016/10/11/les-grandes-villes-du-monde-continuent-a-mal-desservir-leur-population_5011445_3244.html))

[LOO,86] J. M. Loomis et S. J. Lederman, « Tactual Perception », dans *Handbook of human perception and performance*, K. Boff, L. Kaufman, J. Thomas (Eds.), 1986, p. 1-41.

[LOO,03] M. P. De Looze, L. F. M. Kuijt-Evers, et J. Van Dieën, « Sitting comfort and discomfort and the relationships with objective measures », *Ergonomics*, vol. 46, n° 10, p. 985 - 997, 2003.

[LOU,15] L. Loumé, « Lécher les barres de métro est-il risqué pour la santé ? », sciencesetavenir.fr

([https://www.sciencesetavenir.fr/sante/lecher-les-barres-de-metro-est-il-risque-pour-la-sante\\_28534](https://www.sciencesetavenir.fr/sante/lecher-les-barres-de-metro-est-il-risque-pour-la-sante_28534))

[LUS,03] M. Lussault, *L'avènement du monde. Essais sur l'habitation humaine de la Terre*. Paris: Éditions du Seuil. 2003.

[MAC,09] P. Mac Leod, F. Sauvageot et E. P. Köster, « Les caractéristiques d'une réponse sensorielle », dans *Évaluation sensorielle* (3d éd.) : Manuel méthodologique, chapitre 1, Ted & Doc Lavoisier, p. 7-33, 2009.

[MAL,91] M. Malherbe, *Trois essais sur le sensible*. Paris: Librairie philosophique J. Vrin, 1991.

[MAM,13] M. Mammeri, « Une approche d'aide multicritère à la décision pour l'évaluation du confort dans les trains: construction d'un modèle d'évaluation », Thèse, Université Paris Dauphine-Paris IX, 2013.

[MCG,A] Niveau intermédiaire : « L'amygdale et ses alliés » et « Les deux routes de la peur », *Le cerveau à tous les niveaux*, Université McGill, Montréal.

([http://lecerveau.mcgill.ca/flash/i/i\\_04/i\\_04\\_cr/i\\_04\\_cr\\_peu/i\\_04\\_cr\\_peu.html](http://lecerveau.mcgill.ca/flash/i/i_04/i_04_cr/i_04_cr_peu/i_04_cr_peu.html))

[MCG,B] Niveau intermédiaire : « Mémoire et apprentissage », « Mémoire sensorielle, à court et long terme » et « Différents types de mémoire à long terme », *Le cerveau à tous les niveaux*, Université McGill, Montréal.

([http://lecerveau.mcgill.ca/flash/i/i\\_07/i\\_07\\_p/i\\_07\\_p\\_tra/i\\_07\\_p\\_tra.html#3](http://lecerveau.mcgill.ca/flash/i/i_07/i_07_p/i_07_p_tra/i_07_p_tra.html#3))

[MCG,C] Niveau avancé : « Mémoire et apprentissage », « Mémoire sensorielle, à court et long terme » et « Différents types de mémoire à long terme », *Le cerveau à tous les niveaux*, Université McGill, Montréal.

([http://lecerveau.mcgill.ca/flash/a/a\\_07/a\\_07\\_p/a\\_07\\_p\\_tra/a\\_07\\_p\\_tra.html](http://lecerveau.mcgill.ca/flash/a/a_07/a_07_p/a_07_p_tra/a_07_p_tra.html))

[MOE,05] N. C. C. M. Moes, « Analysis of sitting discomfort, a review », dans *Contemporary Ergonomics*, Taylor & Francis., London: Philip D. Bust, Paul T. McCabe, 2005, p. 200-204.

[MOI,94] J.-L. Le Moigne, La théorie du système général : Théorie de la modélisation. Paris: Presses universitaires de France, 1994.

[MOL,76] A. Moles et E. Rohmer, Micropsychologie et vie quotidienne. Paris: Denoël, 1976.

[MON,94] Les publications de Montlignon, n°18, septembre 1994.

[MON,16] Le Monde.fr avec AFP, « Transports : les grandes villes du monde continuent à mal desservir leur population », Le Monde.fr, 11 octobre 2016.

([http://www.lemonde.fr/planete/article/2016/10/11/les-grandes-villes-du-monde-continuent-a-mal-desservir-leur-population\\_5011445\\_3244.html](http://www.lemonde.fr/planete/article/2016/10/11/les-grandes-villes-du-monde-continuent-a-mal-desservir-leur-population_5011445_3244.html))

[MOR,77] E. Morin, La méthode 1 : La nature de la nature. Paris: Seuil, 1977.

[MOR,81] J. Morval, Introduction à la psychologie de l'environnement. Bruxelles: P. Mardaga, 1981.

[MOR,05] E. Morin, Introduction à la pensée complexe. Paris: Édition du Seuil, 2005.

[MOS,81] S. Moscovici, L'âge des foules. Paris: Fayard, 1981.

[MUC,91] A. Mucchielli, Les méthodes qualitatives. Paris: Presses universitaires de France, 1991.

[MZA,02] M. Mzali, Perception de l'ambiance sonore et évaluation du confort acoustique dans les trains. Thèse de doctorat en acoustique, Paris VI, 2002.

[NAD,17] A. Naddeo, N. Mansfield, S. Frohriep et P. Vink, « Now is the time for a comfort congress », Proceedings of the First International Comfort Congress, 2017.

(<http://irep.ntu.ac.uk/id/eprint/30985/>)

[NAT,01] Centre des Nations Unies pour les établissements humains (habitat), « Urbanisation : des faits et des chiffres », Le millénaire urbain, session extraordinaire de l'Assemblée Générale des Nations Unies consacrée à l'examen et à l'évaluation d'ensemble de l'application du Programme pour l'habitat, 2001.

(<http://www.un.org/french/ga/istanbul5/kit2.pdf>)

[NDE,16] J. Dacleu Ndengue et al., « Tactile Perception and Friction-Induced Vibrations: Discrimination of Similarly Patterned Wood-Like Surfaces », IEEE Transactions on Haptics, vol. 99, p. 1-1, 2016.

(<http://ieeexplore.ieee.org/document/7795197/>)

[ONU,14] Centre d'actualités de l'ONU, « Plus de la moitié de la population mondiale vit désormais dans des villes – ONU », un.org, 10 juillet 2014.

(<http://www.un.org/fr/development/desa/news/population/world-urbanization-prospects.html>)

[ORT,88] A. Ortony, G. L. Clore, et A. Collins, The Cognitive Structure of Emotions. Cambridge University Press, 1988.

[PAG,01] Á. Page, R. Porcar, M. J. Such, J. Solaz, V. Blasco, Nuevas técnicas para el desarrollo de productos innovadores orientados al usuario. Valencia: Martín Impresores, 2001.

[PAG,03] J. Pagès, « Recueil direct de distances sensorielles : application à l'évaluation de dix vins blancs du Val-de-Loire », Sciences des aliments, vol. 23, n° 5-6, p. 679-688, 2003.

[PAG,05] J. Pagès, « Collection and analysis of perceived product inter-distances using multiple factor analysis: Application to the study of 10 white wines from the Loire Valley », Food Quality and Preference, vol. 16, n° 7, p. 642-649, 2005.

[PEN,50] W. Penfield, T. Rasmussen, et National Institute on Drug Abuse, The cerebral cortex of man: a clinical study of localization of function. New York: Macmillan, 1950.

[PER,99] « Perception », Grand dictionnaire de la psychologie. 1999, pp. 624-631.

[PIL,03] H. Pille, J.-F. Bassereau, L. Cornec et F. Du Boisrouvray, « Design sensoriel appliqué aux produits/process Polyrey », 10<sup>ème</sup> séminaire CONFERE, Belfort, p.21-30, 2003.

[PLU,01] R. Plutchik, « The Nature of Emotions », American Scientist, vol. 89, p. 344-350, 2001.

[RAZ,13] O. Razemon, « L'information des voyageurs, toujours un maillon faible à la RATP », Chronique impatiente de la mobilité quotidienne, lemonde.fr, 14 avril 2013.

(<http://transports.blog.lemonde.fr/2013/04/14/linformation-des-voyageurs-toujours-un-maillon-faible-a-la-ratp/>)

[REM,97] A. Remoue, « Quand l'industrie joue le sensoriel », Usine Nouvelle, n° 2622, 18 décembre 1997.

(<http://www.usinenouvelle.com/article/quand-l-industrie-joue-le-sensoriel.N86015>)

[REV,50] G. Revesz, Psychology and Art of the Blind. New York: Longmans Green and Co, 1950.

[RIC,94] D. Richard et D. Orsal, Neurophysiologie - Tome 1 : Physiologie cellulaire et systèmes sensoriels. Paris: Nathan, 1994.

[RIC,12] C. Richemont et J. Casals, « Etude exploratoire sur les perceptions du temps et les activités dans les transports en commun », Rapport Grand Lyon et Nova 7, 2012.

[RIV,17] C. Rivat, « La sensorialité », Cours de Neuropsychologie niveau L2, Université Montpellier 3, 2017.

(<https://newschwann.wordpress.com/2017/04/05/12-s4-cours-sensorialite-les-bases/>)

[ROB,74] J. Robert, Histoire des transports dans les villes de France. Neuilly-sur-Seine: Distribué par l'auteur, 1974.

[ROB,06] T. Robert, « Analyse biomécanique du maintien de l'équilibre debout suite à une accélération transitoire de la surface d'appui - Application à l'amélioration de la protection des passagers de transports en commun », Thèse, INSA de Lyon, 2006.

[ROL,94] J.-P. Roll, Sensibilités cutanées et musculaires, dans Traité de psychologie expérimentale, M. Richelle, J. Requin et M. Robert (dir.), 1994, p. 483-542.

[SAN,15] D. Sander, Le monde des émotions. Paris: Belin, 2015.

[SAU] P. Sauleau, S. Dragomir et Mathieu Kuchenbuch, « Système moteur », Cours de Neurophysiologie, Université Rennes 1.

(<https://sites.google.com/site/aphysionado/home/fonctionssn/systmoteur>)

[SAU,95] F. De Saussure, Cours de linguistique générale. Paris: Payot & Rivages, 1995.

[SEN,99] « Sens », Grand dictionnaire de la psychologie. 1999, p. 788.

[SER,85] M. Serres, Les cinq sens. Paris: Grasset & Fasquelle, 1985.

[SEZ,94] C. Sèze, Confort moderne : Une nouvelle culture du bien-être. Paris: Autrement, 1994.

[SHA,69] B. Shackel, K. D. Chidsey, et P. Shipley, « The assessment of chair comfort », Ergonomics, vol. 12, n° 2, p. 269-306, 1969.

[SIM,07] N. Simon, J.-F. Bassereau et A. Auossat, « Les « bugs perceptifs » : une clé de lecture en conception de produits centrée utilisateur », 10<sup>ème</sup> Colloque National AIP-PRIMECA, 2007.  
(<http://www.slideserve.com/ivana-calhoun/les-bugs-perceptifs-une-cl-de-lecture-en-conception-de-produits-centr-e-utilisateur>)

[SLA,14] F. Jannic-Cherbonnel, « Pourquoi les sièges de nos transports sont-ils si moches ? », Slate.fr, 16 janvier 2014.

(<http://www.slate.fr/life/79548/sieges-transports-moches>)

[SMI,02] A. Smith, G. Gosselin, et B. Houde, « Deployment of fingertip forces in tactile exploration », Experimental Brain Research, vol. 147, n° 2, p. 209-218, 2002.

[SNC,17] Groupe SNCF, « SNCF joue la carte inOui », sncf.com, 30 mai 2017.  
(<http://www.sncf.com/fr/Presse/fil-info/inoui/29052017>)

[STE,98] J. C. Stevens et K. K. Choo, « Temperature sensitivity of the body surface over the life span », Somatosensory and Motor Research, vol. 15, p. 13-28, 1998.

[STR,09] F. Strigler, C. Touraille, F. Sauvageot, J. Barthélémy, S. Issanchou et J. Pagès, « Les épreuves discriminatives et descriptives », dans Évaluation sensorielle (3d éd.): Manuel méthodologique, chapitre 4, Ted & Doc Lavoisier, p. 99-200, 2009.

[TOR,06] B. Tornil, « Adaptations et interactions gestuelles et haptiques, ciblées utilisateurs. Vers plus d'utilisabilité et d'accessibilité », Université Paul Sabatier - Toulouse 3, 2006.  
(<http://www.tornil.me/these/>)

[UIC,90] International Union or Railways, UIC 566 – Loadings of coach bodies and their components. 3<sup>rd</sup> edition, 1990.

[ULH,17] A. Ulherr et K. Bengler, « Seat assessment – A discussion of comfort and discomfort models and evaluation methods », Proceedings of the First International Comfort Congress, Session 3B-6, 2017.

[VAL,84] Å. B. Vallbo et R. S. Johansson, « Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation », Human Neurobiology, vol. 3, n° 1, p. 3–14, 1984.

[VAN,13] E. Van Der Heide, X. Zeng, et M. A. Masen, « Skin tribology: Science friction? », Friction, vol. 1, n° 2, p. 130-142, 2013.

[VIN,05] P. Vink, M. P. De Looze et L. F. M. Kuijt-Evers, « Theory of comfort », dans Comfort and Design - Principles and Good Practice, chapitre 2, CRC Press, 2005, p. 13-32.

[VIN,12] P. Vink et S. Hallbeck, « Editorial: Comfort and discomfort studies demonstrate the need for a new model », Applied Ergonomics, vol. 43, n° 2, p. 271-276, mars 2012.

[VIN,14] P. Vink, The sweetness of discomfort. Delft: Delft University of Technology, 2014.

[VOT,07] G. Votolato, Transport design: a travel history. London: Reaktion Books Ltd, 2007.

[VRT,10] VRT Communication, « Tours : un tramway qui reflète la ville », Dossier spécial de Ville Rail et Transports, Octobre 2010.

[WEI,68] S. Weinstein, Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex and laterality, dans D. R. Kenshalo (dir.), The skin senses, Springfield, IL: Thomas, 1968, p. 195-222.

[WIS,85] A. Wisner, Quand voyagent les usines: essai d'anthropotechnologie. Paris: Syros, 1985.

[YMC,01] Y.-M. Chen et J.-C. Pavy, « Device and method for characterization of the skin by tribometry », US6309363 B1, 2001.

[YMC,11] Y.-M. Chen et C. Richard, Tribomètres et essais tribologiques, Ed. Techniques de l'Ingénieur. Paris, 2011.

[ZHA,96] L. Zhang, M. G. Helander, et C. G. Drury, « Identifying Factors of Comfort and Discomfort in Sitting », Human factors, vol. 38, n° 3, p. 377-389, 1996.

[ZLI,13] Z. Li et D. Hensher, « Crowding in public transport : a review of objective and subjective measures », Journal of public transportation, vol. 16, n°2, p. 107-134, 2013.

## Annexe A : Échantillons testés lors de la première étude

Les échantillons de cette première étude sont présentés ici selon leur identifiant, leur visuel, leur matière, ainsi que la catégorie d'appuis dans laquelle le matériau s'insère. Cinq catégories sont recensées, à l'image de la Figure 50 (ce qui peut être saisi avec la main – catégorie 1, ce qui est en contact passif avec le corps assis – catégorie 2, avec le corps non-assis – catégorie 3 – et avec les pieds – catégorie 4), tout en incluant les échantillons prospectifs, c'est-à-dire des matériaux n'étant actuellement pas utilisés dans l'habitacle des transports en commun urbains.

**B1 :**  
Gaïalène +15% Bambou

- Prospectif



**B3 :**  
Polypropylène +30%  
Huître

- Prospectif



**B5 :**  
Gaïalène +30% Huître

- Prospectif



**B7 :**  
Polypropylène +40%  
PVB

- Prospectif



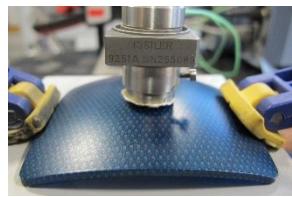
**B9 :**  
Polyamide PA6 motif  
vache

- Prospectif



**B11 :**  
Polyamide PA6 motif  
carbone bleu

- Prospectif



**B2 :**  
Polysulfure de  
phénylène +40% Billes  
de bronze

- Prospectif



**B4 :**  
Gaïalène +15% Liège

- Prospectif



**B6 :**  
Gaïalène vierge

- Prospectif



**B8 :**  
Polyamide PA6 motif  
bois céréisé

- Prospectif



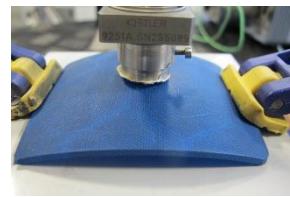
**B10 :**  
Polyamide PA6 motif  
jaguar

- Prospectif



**B12 :**  
Polyamide PA6 motif  
écaille de tortue

- Prospectif



**B13 :**  
Tissu haute-couture

- Prospectif



**B15 :**  
Tissu haute-couture

- Prospectif



**B17 :**  
Peinture époxy sur  
plaqué en aluminium

- Catégorie 3



**B19 :**  
Peinture époxy sur  
plaqué en aluminium

- Catégorie 3



**B21 :**  
Peinture époxy sur  
plaqué en aluminium

- Catégorie 3



**B23 :**  
Composite à matrice  
organique et à renfort de  
verre

- Catégorie 3



**B25 :**  
Tissu synthétique

- Catégorie 2



**B27 :**  
Composite à matrice  
organique et à renfort de  
verre

- Catégorie 3



**B14 :**  
Tissu haute-couture

- Prospectif



**B16 :**  
Peinture époxy sur  
plaqué en aluminium

- Catégorie 3



**B18 :**  
Peinture époxy sur  
plaqué en aluminium

- Catégorie 3



**B20 :**  
Plaque acier inoxydable

- Catégorie 3



**B22 :**  
Plaque verre

- Catégorie 3



**B24 :**  
Stratifié

- Catégorie 3



**B26 :**  
Tissu synthétique

- Catégorie 2



**B28 :**  
Tissu synthétique

- Catégorie 2



**B29 :**  
Tissu synthétique

- Catégorie 2



**B31 :**  
Stratifié

- Catégorie 3



**B33 :**  
Tube acier inoxydable

- Catégorie 1



**B35 :**  
Tissu synthétique

- Catégorie 2



**B37 :**  
Elastomère

- Catégorie 4



**B39 :**  
Elastomère

- Catégorie 4



**B41 :**  
Elastomère

- Catégorie 4



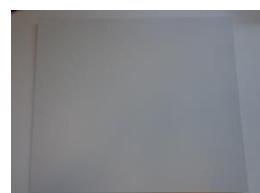
**B43 :**  
Elastomère

- Catégorie 4



**B30 :**  
Stratifié

- Catégorie 3



**B32 :**  
Plaque acier inoxydable

- Catégorie 3



**B34 :**  
Tube acier inoxydable  
avec revêtement braille  
(essai effectué sur la  
partie acier)

- Catégorie 1



**B36 :**  
Elastomère

- Catégorie 4



**B38 :**  
Elastomère

- Catégorie 4



**B40 :**  
Elastomère

- Catégorie 4



**B42 :**  
Elastomère

- Catégorie 4



## Annexe B : Détail des données tribologiques et sensorielles de la première exploration

Échantillons	Frottement statique	Frottement dynamique	Pente régime statique (N/s)	Amplitude oscillations (N)	Adhérent	Accrochant	Lisse
B1	0,26	0,23	0,58	0,0088	5	12	12
B2	0,28	0,22	0,72	0,0098	2	9	12
B3	0,38	0,30	0,80	0,0094	5	11	11
B4	0,26	0,20	0,63	0,0073	5	12	12
B5	0,23	0,18	0,60	0,0095	5	11	12
B6	0,29	0,26	0,67	0,0086	5	11	12
B7	0,34	0,28	0,75	0,0072	5	12	12
B8	0,69	0,73	0,41	0,0075	9	10	10
B9	0,82	0,81	0,40	0,0101	7	10	10
B10	0,96	0,81	0,34	0,0084	9	10	10
B11	0,36	0,26	0,52	0,050	7	9	11
B12	0,75	0,67	0,43	0,0081	7	10	10
B13	0,49	0,39	0,25	0,016	1	1	2
B14	0,47	0,39	0,39	0,022	1	1	2
B15	0,46	0,51	0,35	0,023	1	2	2
B16	0,16	0,06	0,34	0,037	8	14	11
B17	0,16	0,10	0,31	0,037	7	9	5
B18	0,12	0,08	0,28	0,034	6	12	10
B19	0,16	0,10	0,33	0,031	6	8	9
B20	0,28	0,17	0,35	0,043	2	8	10
B21	0,14	0,10	0,28	0,042	4	2	8
B22	0,18	0,16	0,43	0,033	4	9	13
B23	0,17	0,12	0,36	0,033	8	8	7
B24	0,15	0,11	0,29	0,050	6	8	9
B25	0,48	0,40	0,30	0,029	1	4	3
B26	0,40	0,61	0,13	0,036	1	6	1
B27	0,13	0,10	0,51	0,043	7	7	7
B28	0,26	0,54	0,05	0,034	1	3	4

B29	0,24	0,50	0,09	0,033		1	4	2
B30	0,19	0,15	0,53	0,048		3	6	9
B31	0,18	0,13	0,30	0,043		8	12	11
B32	0,19	0,14	0,29	0,047		3	8	8
B33	0,11	0,09	0,27	0,035		5	13	11
B34	0,26	0,21	0,33	0,036		5	9	11
B35	0,32	0,55	0,04	0,038		1	4	4
B36	0,29	0,22	0,52	0,033		3	3	6
B37	0,31	0,22	0,49	0,030		6	6	6
B38	0,59	0,35	0,39	0,026		3	5	3
B39	0,28	0,25	0,44	0,034		4	2	9
B40	0,23	0,18	0,83	0,040		3	7	7
B41	0,44	0,40	0,57	0,041		2	3	6
B42	0,47	0,44	0,59	0,050		4	7	5
B43	0,35	0,20	0,47	0,033		3	3	6

Tableau 15 : Données tribologiques et sensorielles du premier groupe de 43 échantillons

## Annexe C : Échantillons testés lors de la seconde étude

**EEP515\* n°017**  
 Polypropylène +5%  
 Coquilles d'huîtres  
 Granulométrie 15µm



**EEP2015\* n°514**  
 Polypropylène +20%  
 Coquilles d'huîtres  
 Granulométrie 15µm



**EEP4015**  
 Polypropylène +40%  
 Coquilles d'huîtres  
 Granulométrie 15µm



**MICRO\* n°710**  
 Plaquette acier  
 inoxydable microbillée  
 (traitement de surface  
 par micro-impacts)



**RECT\* n°315**  
 Plaquette acier  
 inoxydable rectifiée  
 (meulage par balayages  
 successifs)



**PSA5**  
 Polyamide PA6.6



**CERAM\* n°495**  
 Céramique



**SAVANNAH\* n°382**  
 Céramique



**EEP5500\* n°660**  
 Polypropylène +5%  
 Coquilles d'huîtres  
 Granulométrie 500µm



**EEP20500**  
 Polypropylène +20%  
 Coquilles d'huîtres  
 Granulométrie 500µm



**EEP40500\* n°732**  
 Polypropylène +40%  
 Coquilles d'huîtres  
 Granulométrie 500µm



**POLI**  
 Plaquette acier  
 inoxydable polie  
 (traitement de surface  
 par polissage)



**PSA0\* n°089**  
 Polyamide PA6.6



**PSA83\* n°941**  
 Polyamide PA6.6



**RITZ\* n°812**  
 Céramique



**ZENWAVE\* n°557**  
 Plaque de résine  
 acrylique sculptée sur  
 panneau de fibres de  
 bois à densité moyenne

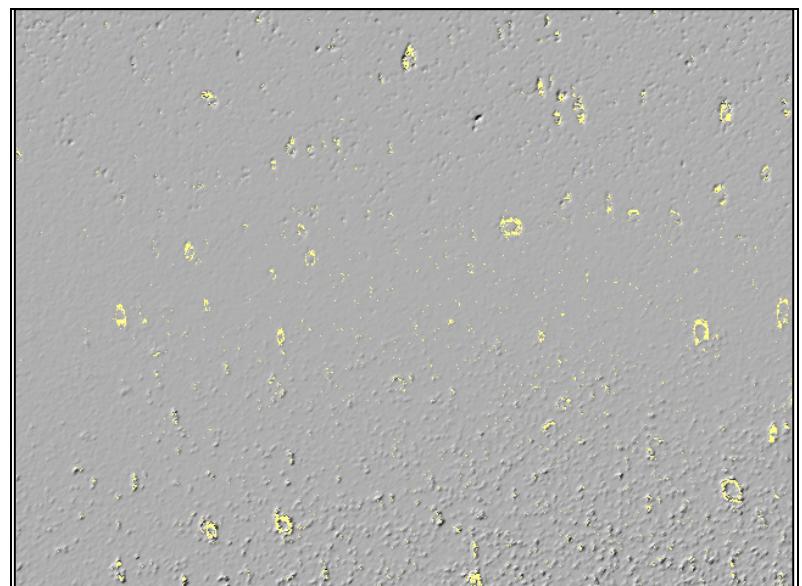
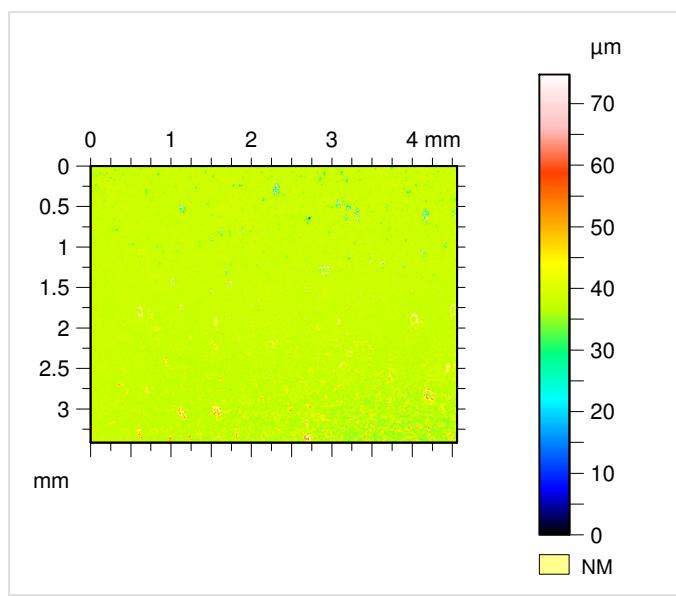
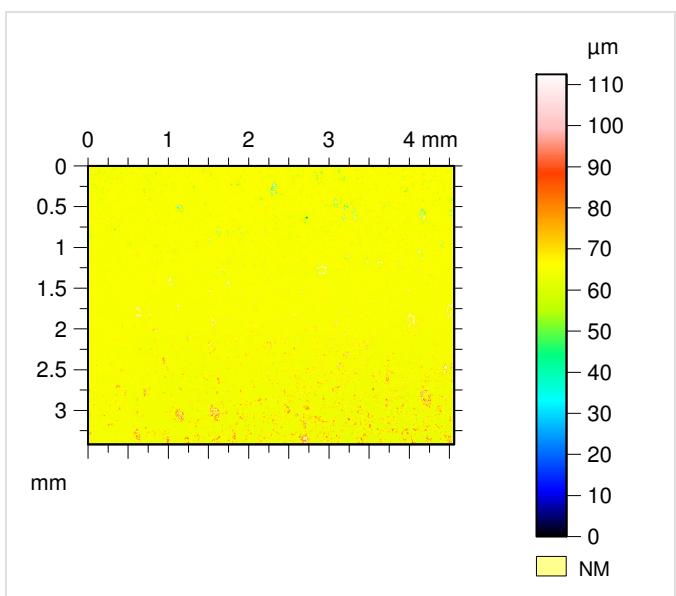
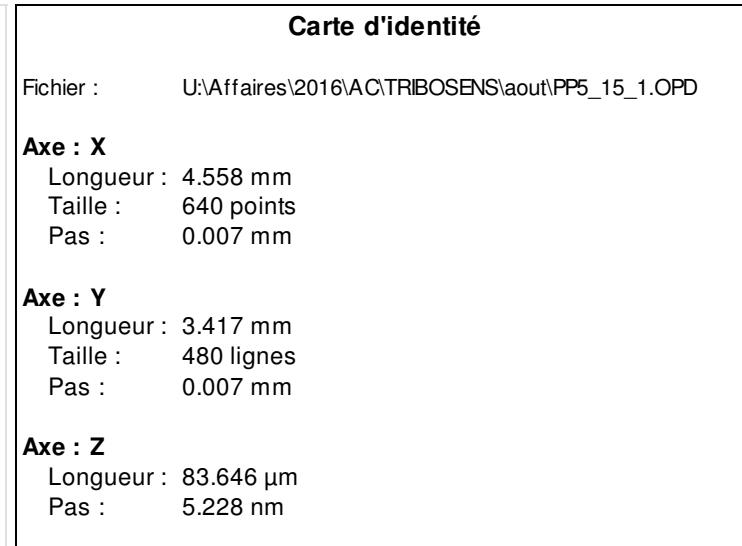
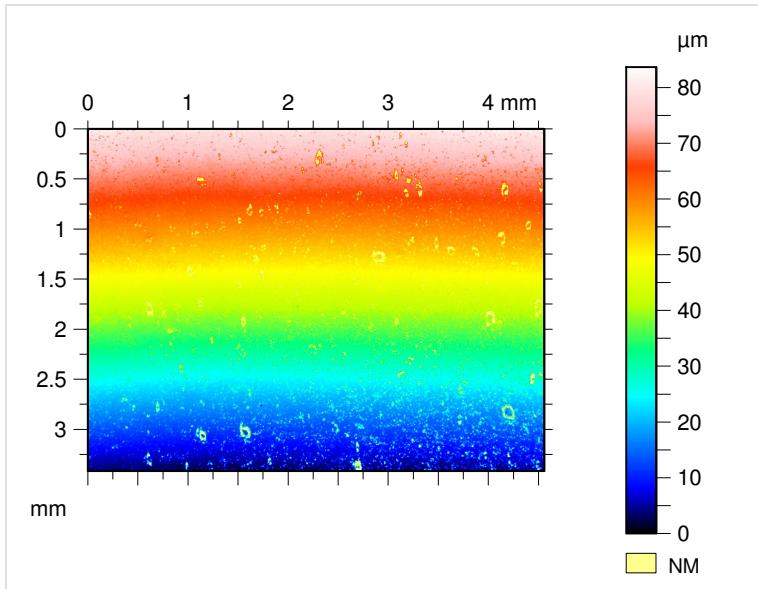


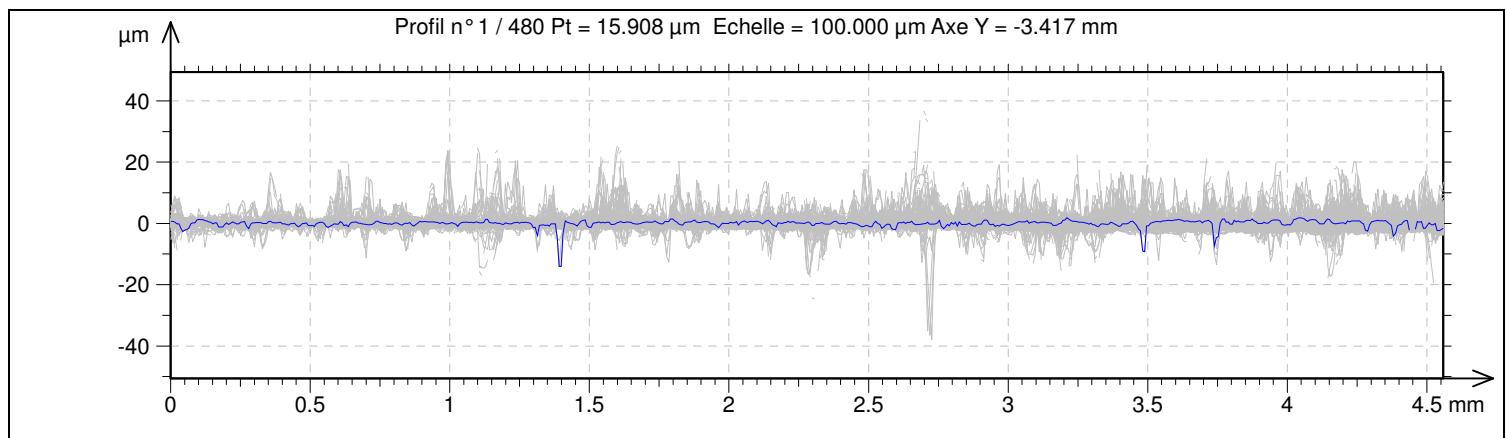
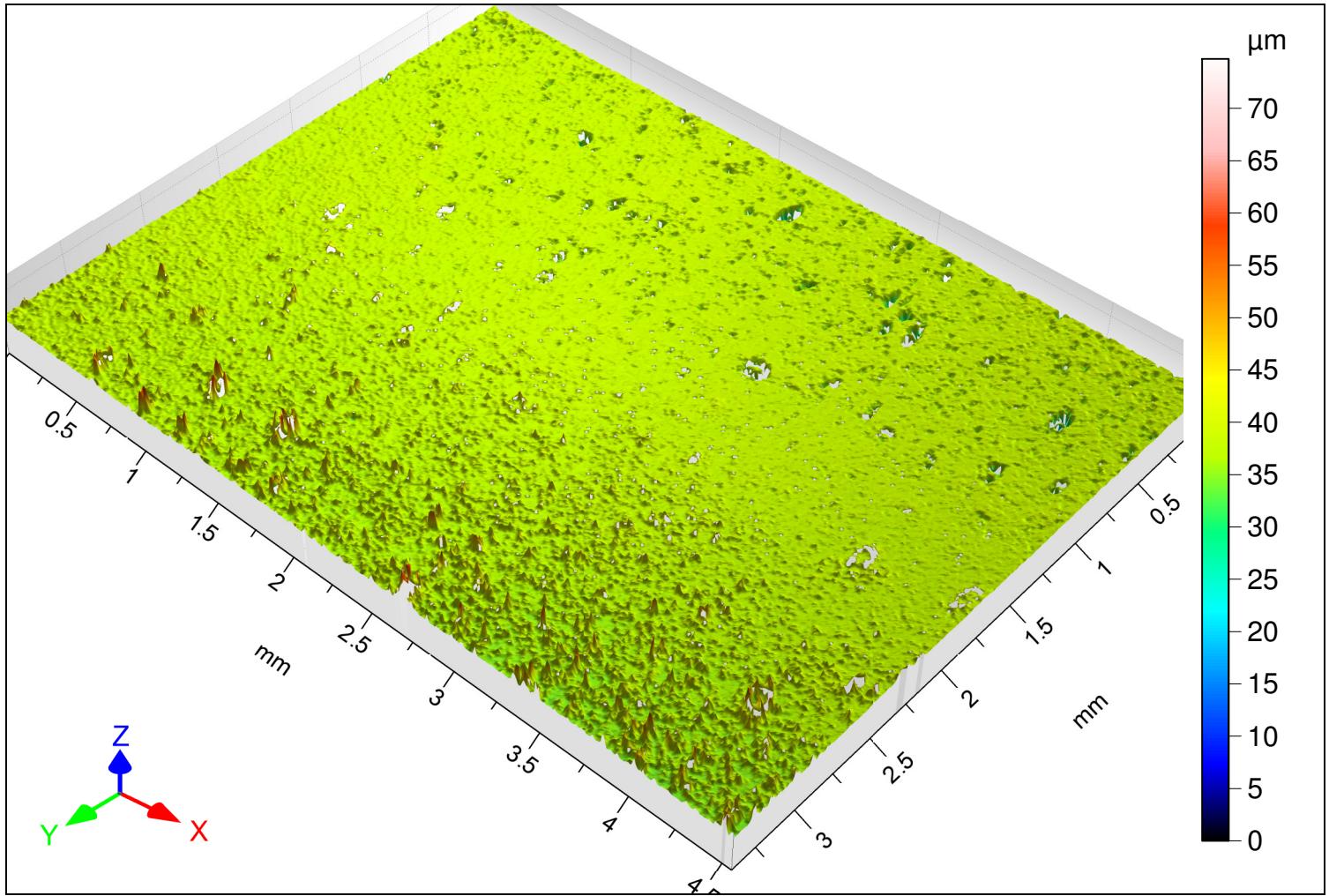
\* échantillons présents dans le groupe napping

## Annexe D : Profils de rugosité des échantillons

Sommaire :

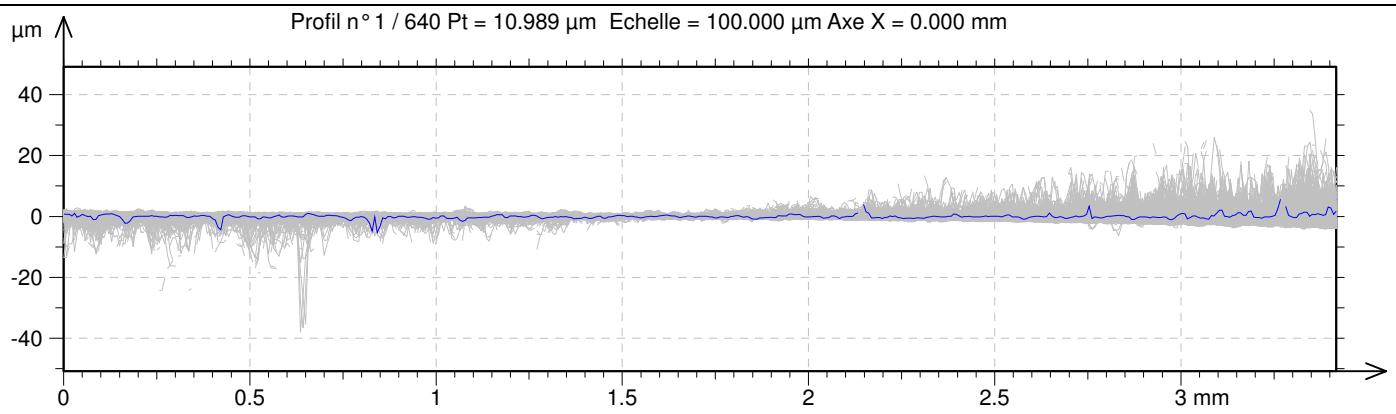
EEP515_1.....	D-1
EEP515_2.....	D-4
EEP5500_1.....	D-7
EEP5500_2.....	D-10
EEP2015_1.....	D-13
EEP2015_2.....	D-16
EEP20500_1.....	D-19
EEP20500_2.....	D-22
EEP4015_1.....	D-25
EEP4015_2.....	D-28
EEP40500_1.....	D-31
EEP40500_2.....	D-34
MICRO.....	D-37
POLI.....	D-40
RECT.....	D-43
PSA0.....	D-46
PSA5.....	D-49
PSA83.....	D-52





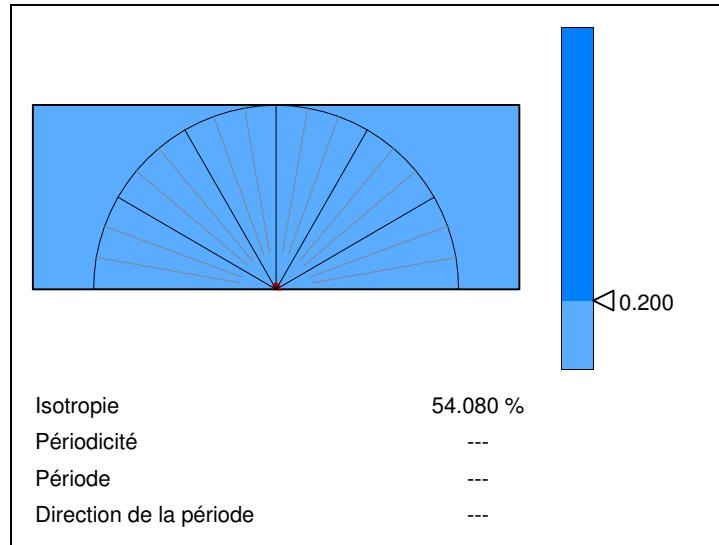
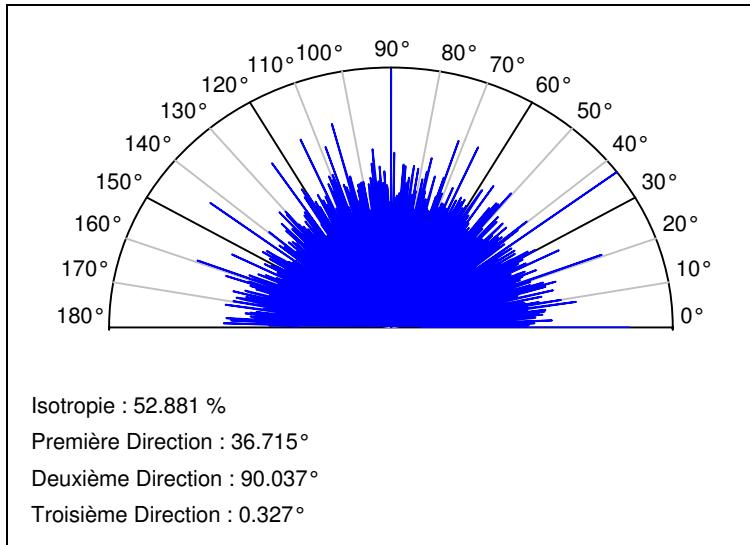
## ISO 4287

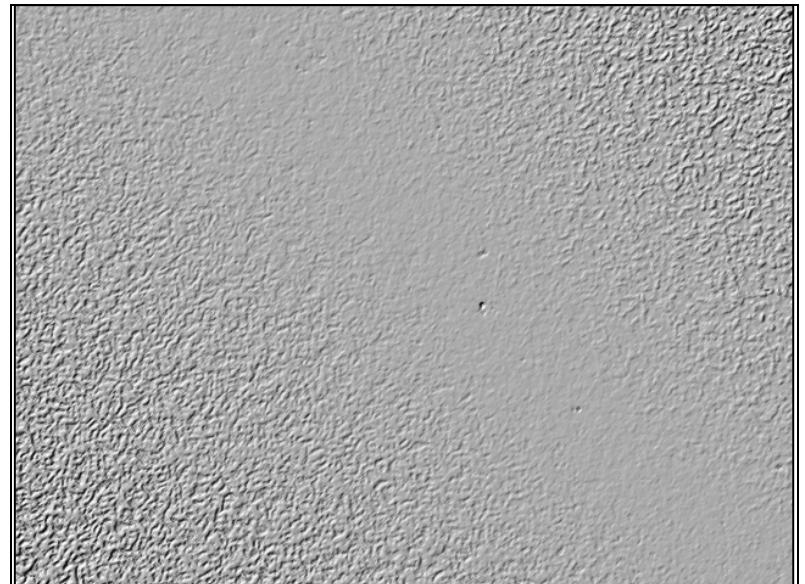
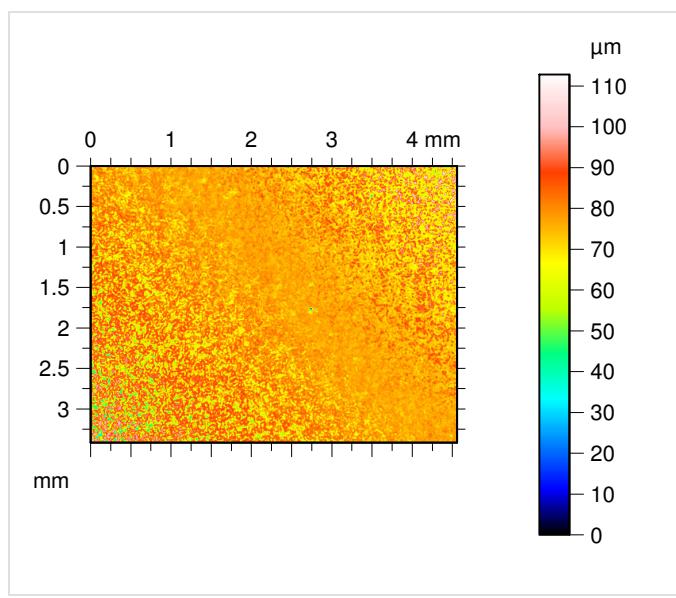
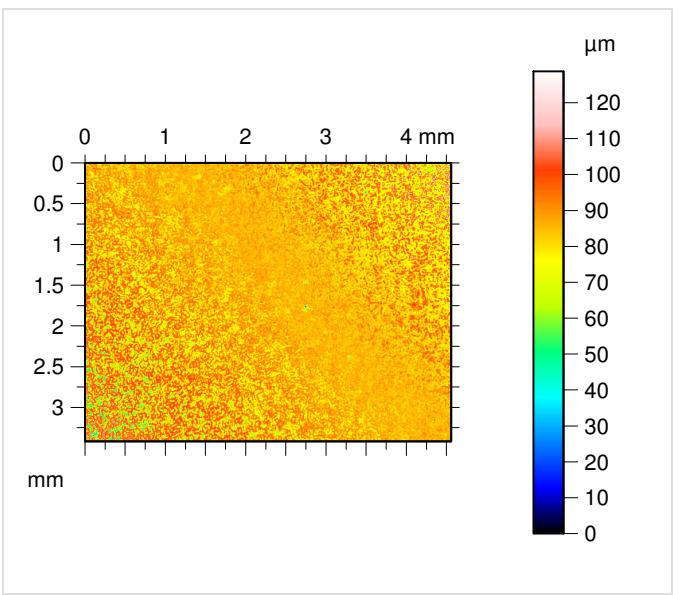
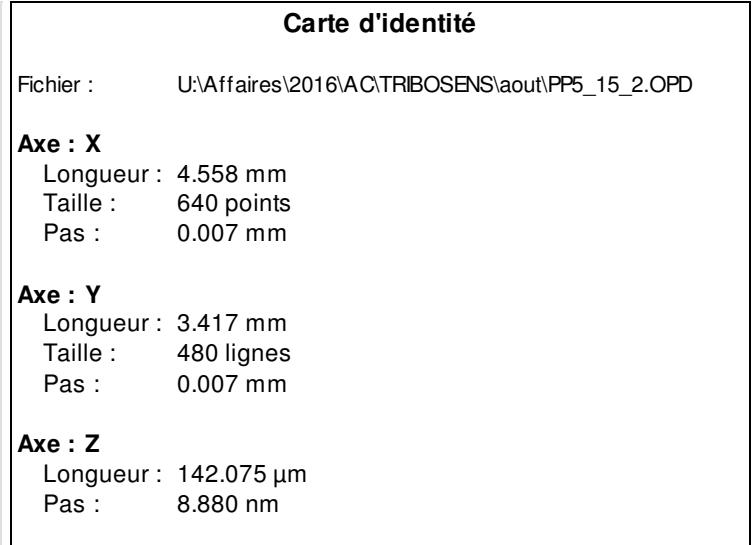
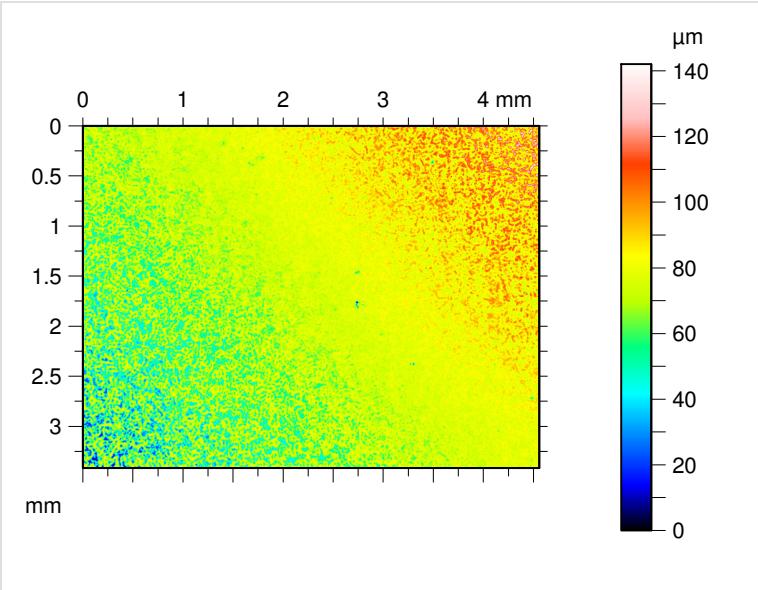
		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
R <sub>a</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.546	0.364	0.159	2.194
R <sub>p</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	3.138	3.531	0.510	20.202
R <sub>v</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	2.117	1.649	0.472	11.467
R <sub>z</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	5.256	3.817	1.125	24.213
R <sub>c</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	2.137	1.492	0.493	8.913
R <sub>t</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	9.293	6.653	1.344	37.662
R <sub>q</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.845	0.596	0.204	3.814
R <sub>sk</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	0.238	2.095	-3.556	3.787
R <sub>ku</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	10.234	4.074	2.994	23.268
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
R <sub>mr</sub>	%	c = 1 µm sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	18.583	27.323	0.189	94.286
R <sub>dc</sub>	µm	p = 20%, q = 80%, Filtre gaussien, 0.8 mm	0.887	0.538	0.297	2.703

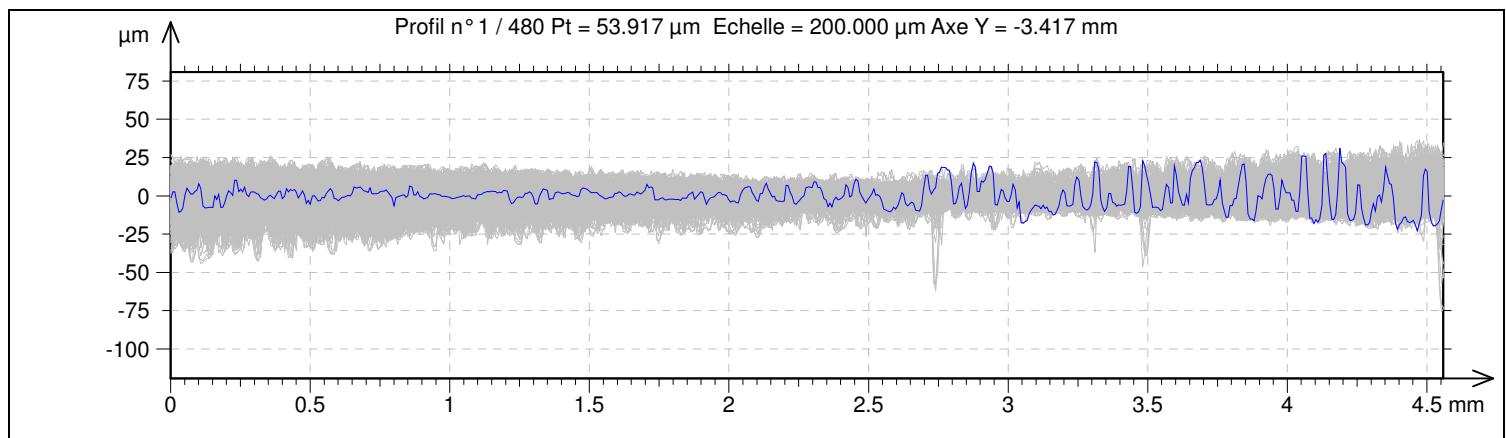
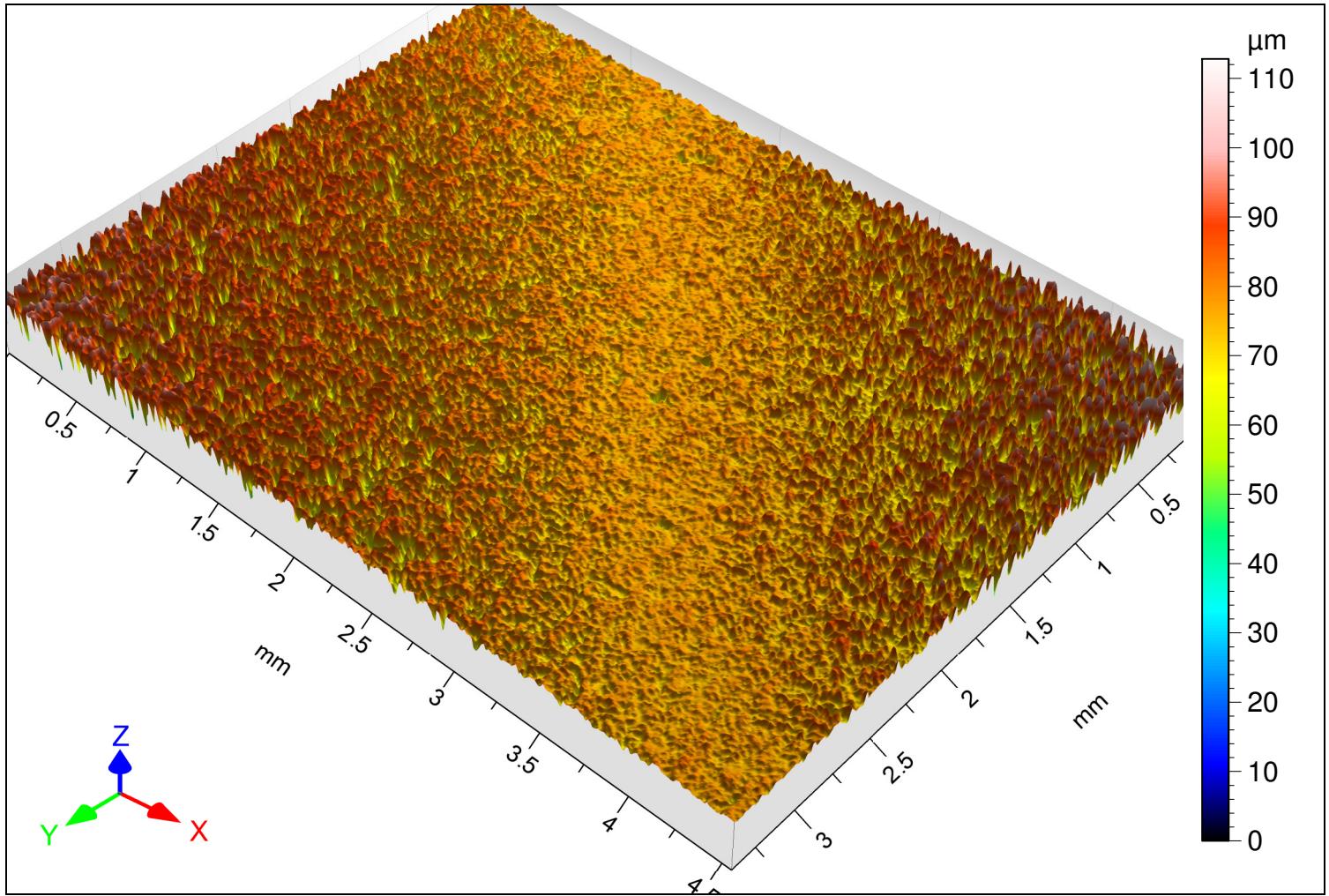


## ISO 4287

		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
<b>R<sub>a</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.405	0.140	0.201	1.257
<b>R<sub>p</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.871	0.898	0.564	7.140
<b>R<sub>v</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.752	1.187	0.565	12.183
<b>R<sub>z</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	3.623	1.727	1.225	15.211
<b>R<sub>c</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.653	0.844	0.641	8.402
<b>R<sub>t</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	8.168	5.212	2.028	45.885
<b>R<sub>q</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.600	0.248	0.258	1.989
<b>R<sub>sk</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	0.057	0.781	-2.758	2.436
<b>R<sub>ku</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	7.805	3.288	2.607	22.677
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
<b>R<sub>mR</sub></b>	%	$c = 1 \mu\text{m}$ sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	2.030	6.044	0.272	68.750
<b>R<sub>dc</sub></b>	µm	$p = 20\%$ , $q = 80\%$ , Filtre gaussien, 0.8 mm	0.748	0.220	0.398	2.082

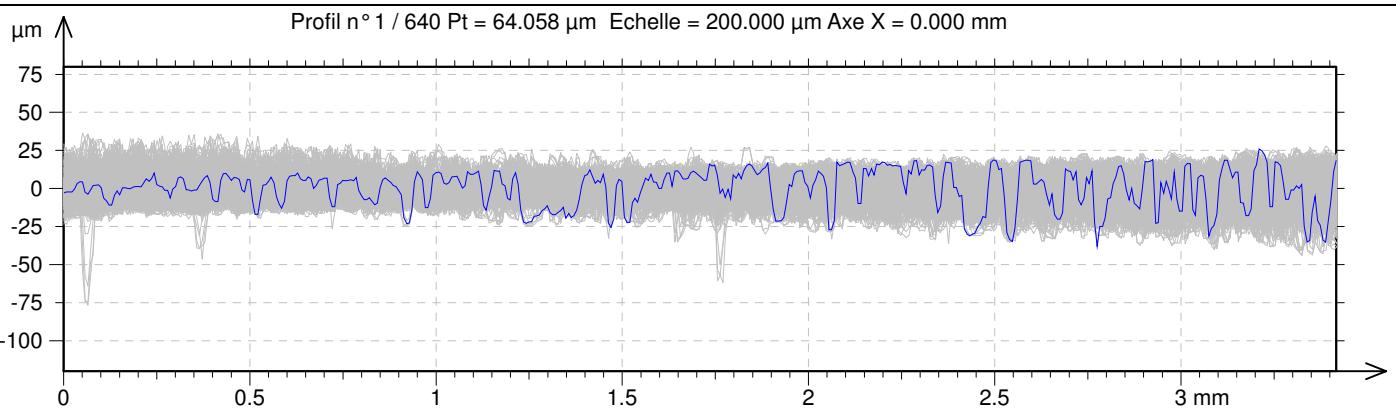






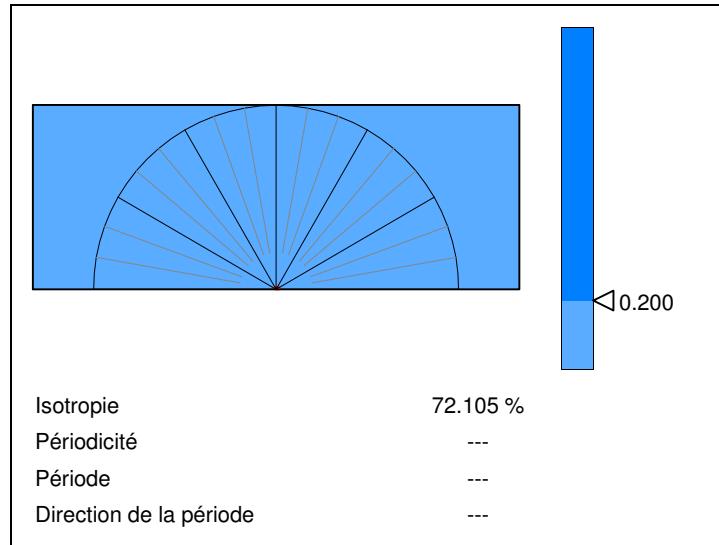
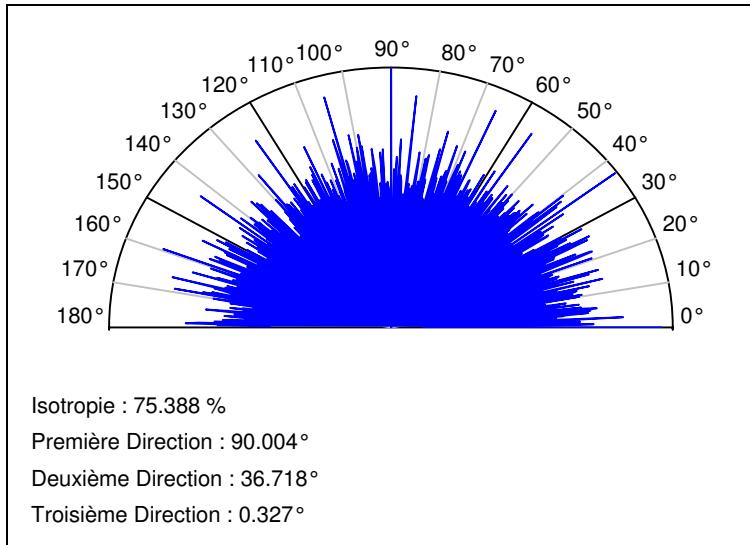
## ISO 4287

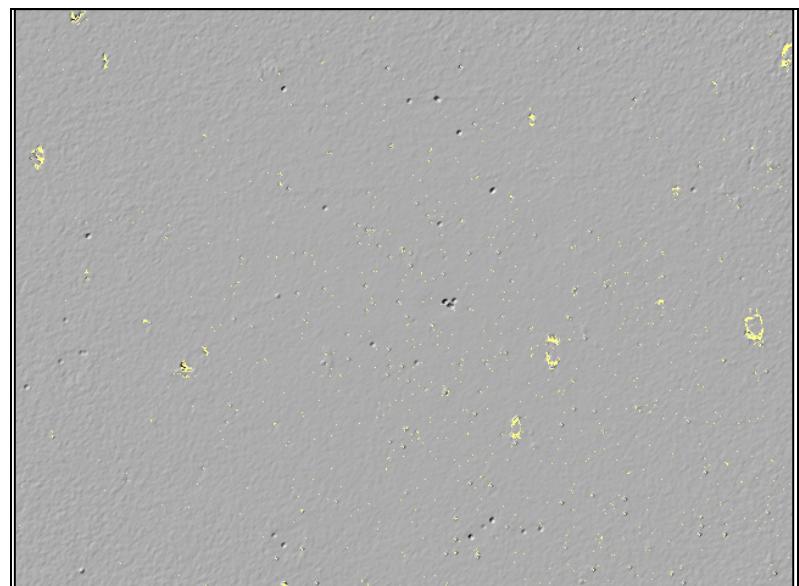
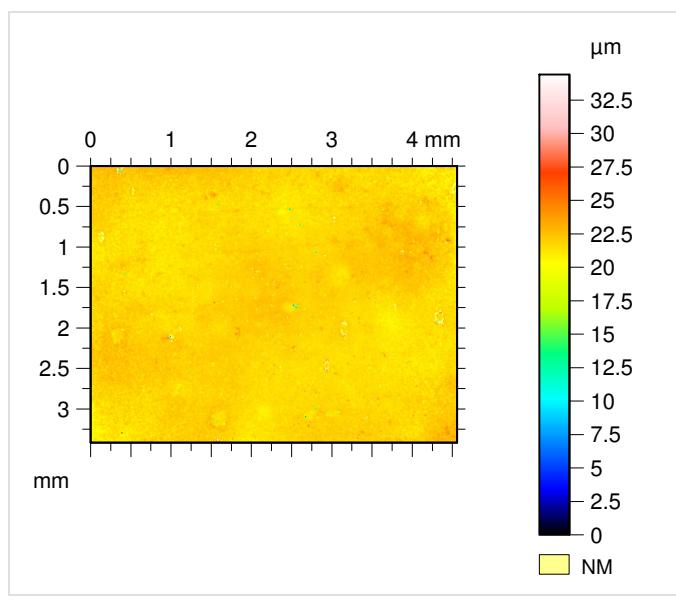
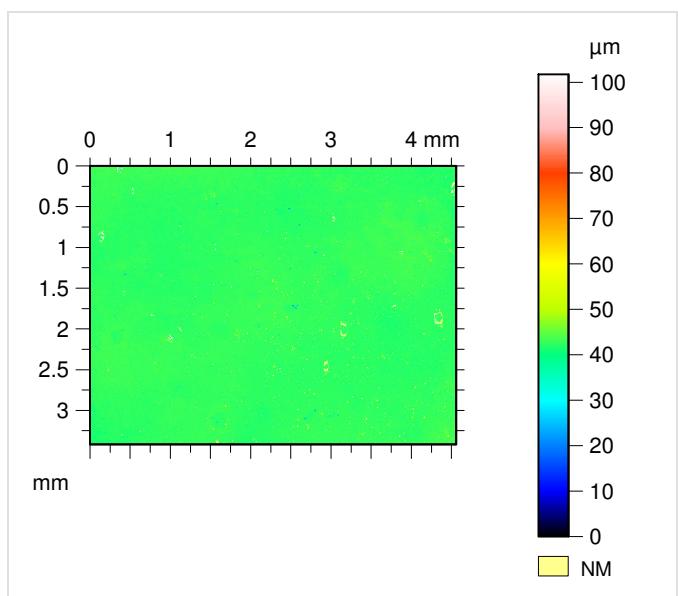
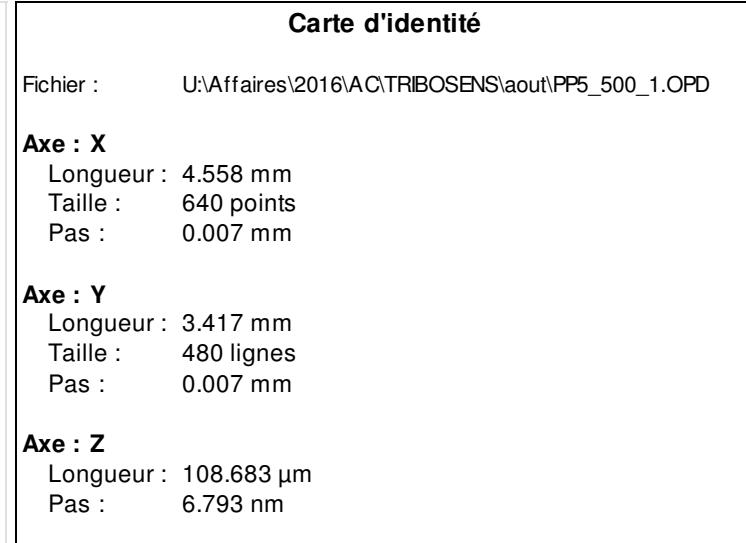
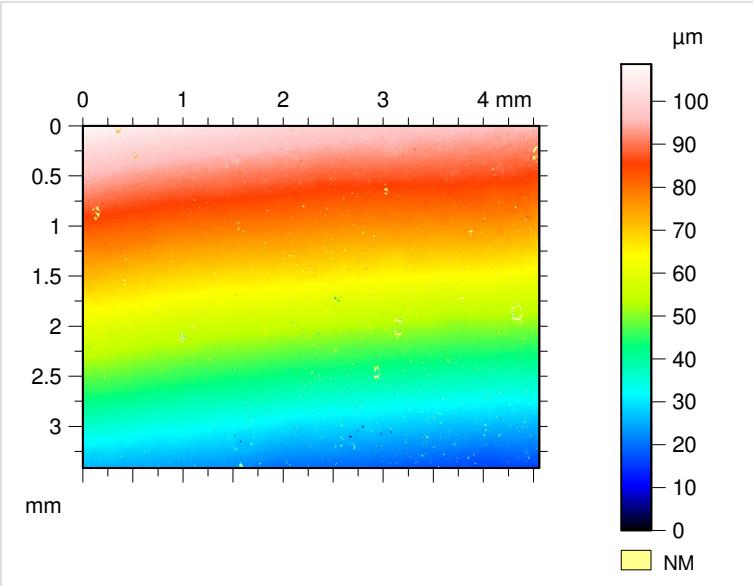
		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
<b>R<sub>a</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	4.233	1.384	2.471	7.664
<b>R<sub>p</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	10.159	1.944	6.135	16.470
<b>R<sub>v</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	12.278	4.511	6.563	25.897
<b>R<sub>z</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	22.437	6.103	12.698	40.012
<b>R<sub>c</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	12.440	2.133	8.600	18.885
<b>R<sub>t</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	38.240	7.691	23.824	72.432
<b>R<sub>q</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	5.157	1.615	3.073	9.064
<b>R<sub>sk</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	-0.210	0.349	-1.533	0.571
<b>R<sub>ku</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	3.002	0.836	2.092	10.429
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
<b>R<sub>mr</sub></b>	%	$c = 1 \mu\text{m}$ sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	0.423	0.268	0.189	1.618
<b>R<sub>dc</sub></b>	μm	$p = 20\%$ , $q = 80\%$ , Filtre gaussien, 0.8 mm	7.962	1.860	5.198	14.253

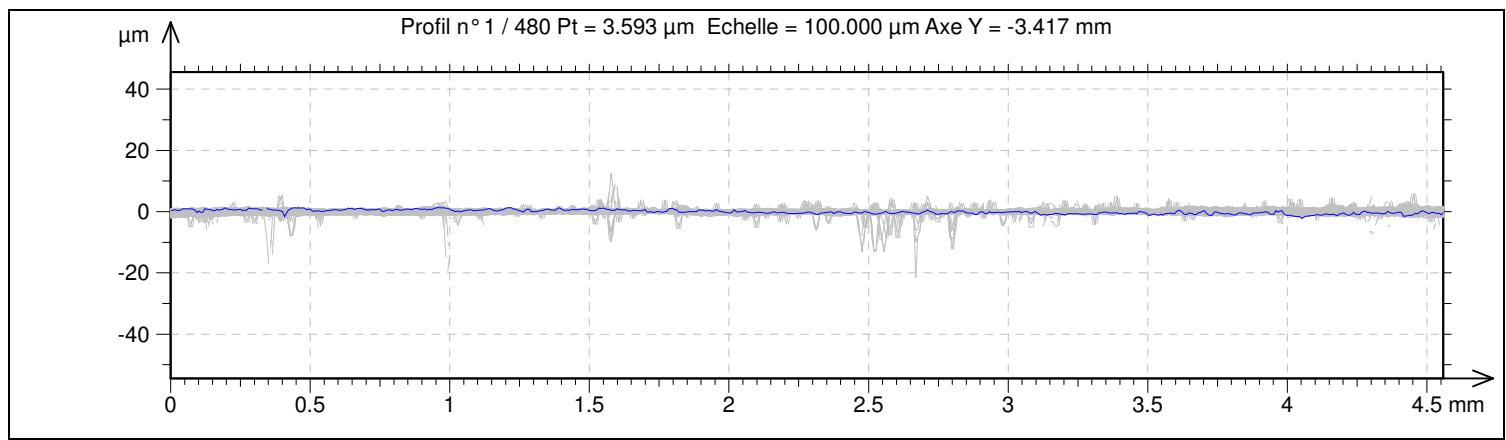
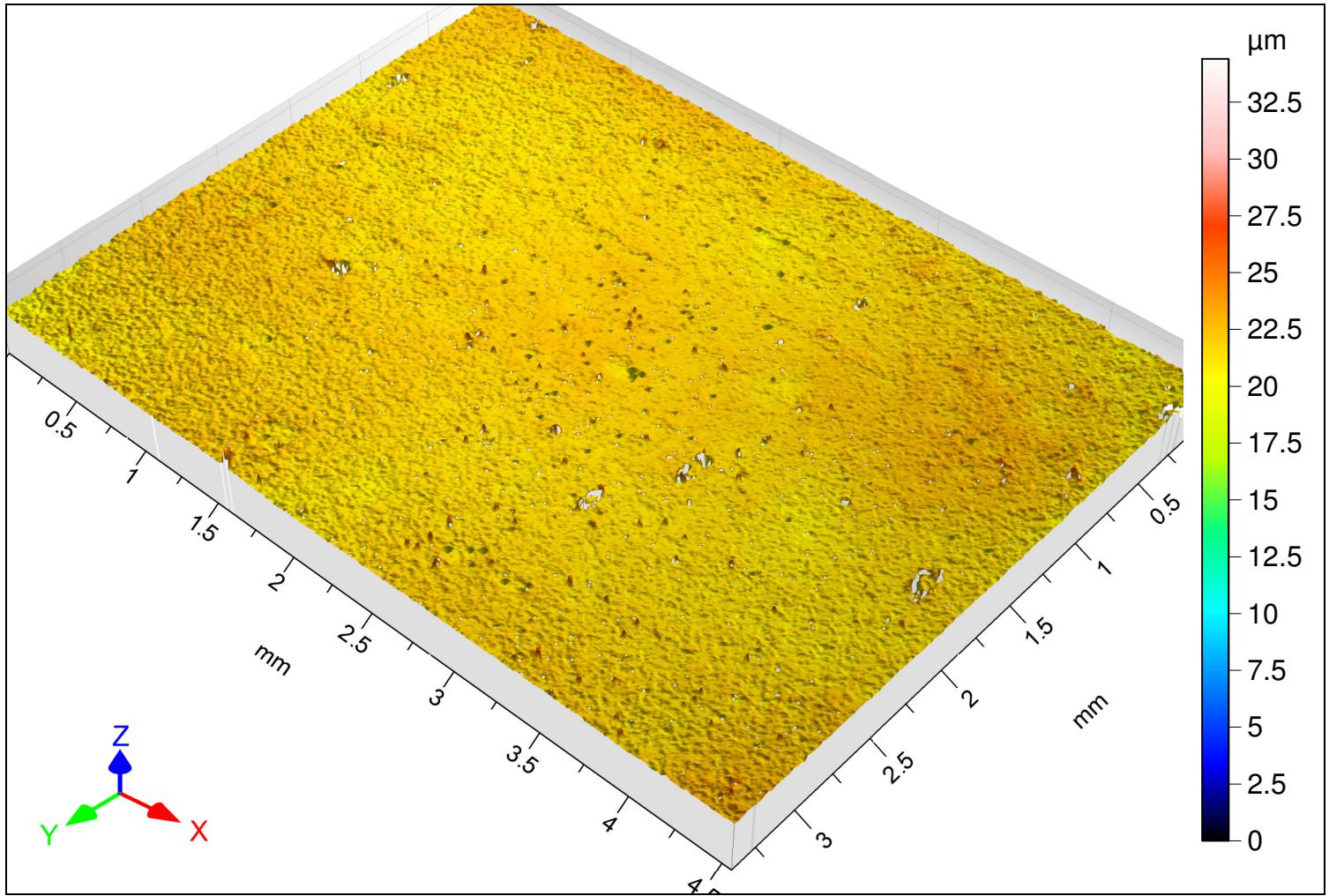


## ISO 4287

Contexte			Mean	Std dev	Min	Max
<b>Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité</b>						
<b>R<sub>a</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	4.233	1.759	1.822	9.089
<b>R<sub>p</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	10.926	3.944	4.239	23.660
<b>R<sub>v</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	11.490	4.959	5.059	27.473
<b>R<sub>z</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	22.416	7.750	10.895	44.896
<b>R<sub>c</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	12.819	5.122	5.556	28.556
<b>R<sub>t</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	32.895	10.041	14.625	62.389
<b>R<sub>q</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	5.160	2.049	2.357	10.817
<b>R<sub>sk</sub></b>		<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	-0.026	0.504	-1.331	1.078
<b>R<sub>ku</sub></b>		<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	2.944	0.824	1.826	13.069
<b>Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité</b>						
<b>R<sub>mr</sub></b>	%	<i>c = 1 µm sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	0.665	0.419	0.272	2.989
<b>R<sub>dc</sub></b>	µm	<i>p = 20%, q = 80%, Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	8.673	4.053	3.554	20.054

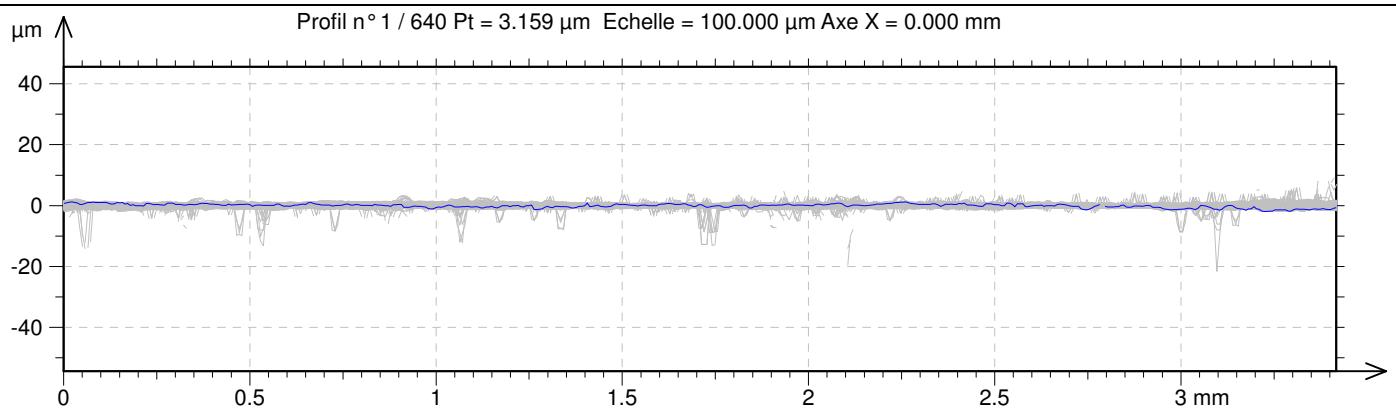






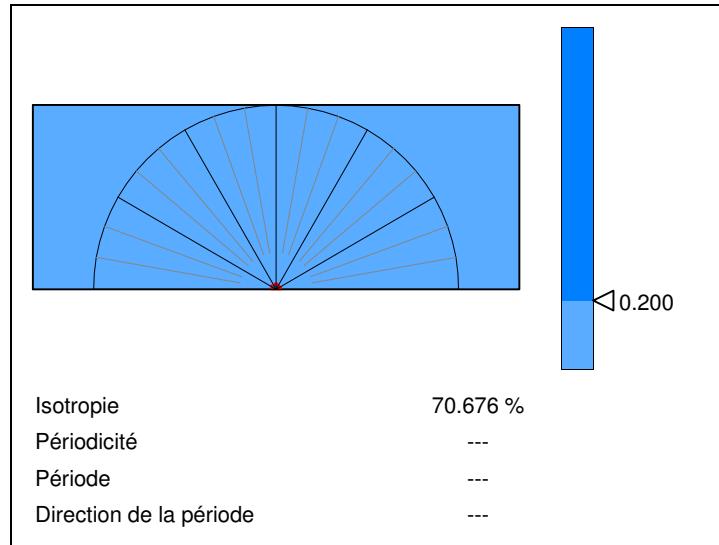
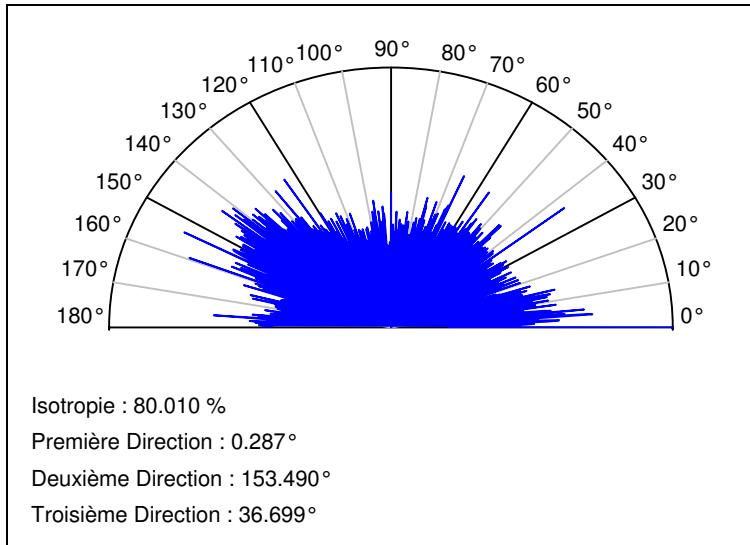
## ISO 4287

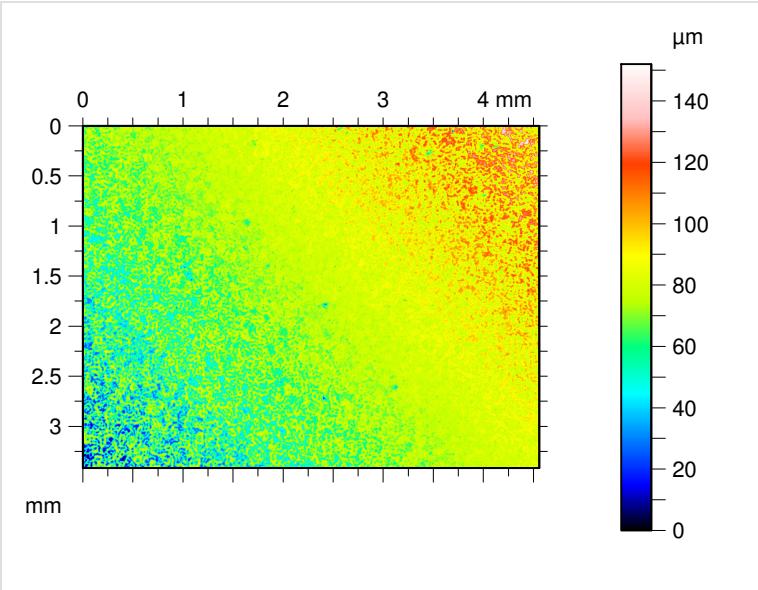
		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
R <sub>a</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.181	0.041	0.116	0.368
R <sub>p</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.790	0.379	0.314	3.504
R <sub>v</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.852	0.701	0.336	5.381
R <sub>z</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.642	0.827	0.693	6.844
R <sub>c</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.648	0.254	0.360	2.739
R <sub>t</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	3.419	2.610	0.951	19.420
R <sub>q</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.263	0.094	0.148	0.780
R <sub>sk</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	0.132	1.017	-3.730	3.332
R <sub>ku</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	8.380	5.853	2.540	34.829
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
R <sub>mr</sub>	%	c = 1 µm sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	41.709	39.389	0.189	100.000
R <sub>dc</sub>	µm	p = 20%, q = 80%, Filtre gaussien, 0.8 mm	0.351	0.066	0.232	0.542



## ISO 4287

Contexte			Mean	Std dev	Min	Max
<b>Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité</b>						
<b>R<sub>a</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	0.184	0.045	0.108	0.453
<b>R<sub>p</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	0.724	0.304	0.317	2.276
<b>R<sub>v</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	0.847	0.745	0.273	6.910
<b>R<sub>z</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	1.571	0.865	0.661	8.101
<b>R<sub>c</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	0.634	0.259	0.317	2.681
<b>R<sub>t</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	2.733	2.369	0.774	20.032
<b>R<sub>q</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	0.262	0.100	0.137	0.945
<b>R<sub>sk</sub></b>		<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	-0.011	0.938	-3.483	3.632
<b>R<sub>ku</sub></b>		<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	7.089	5.682	2.384	34.920
<b>Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité</b>						
<b>R<sub>mr</sub></b>	%	<i>c = 1 µm sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	55.637	40.244	0.272	100.000
<b>R<sub>dc</sub></b>	µm	<i>p = 20%, q = 80%, Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	0.356	0.080	0.210	0.557





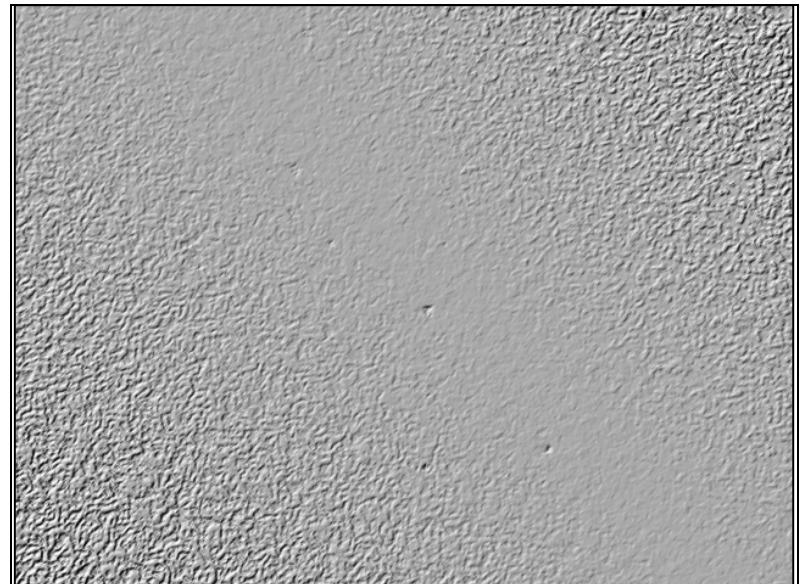
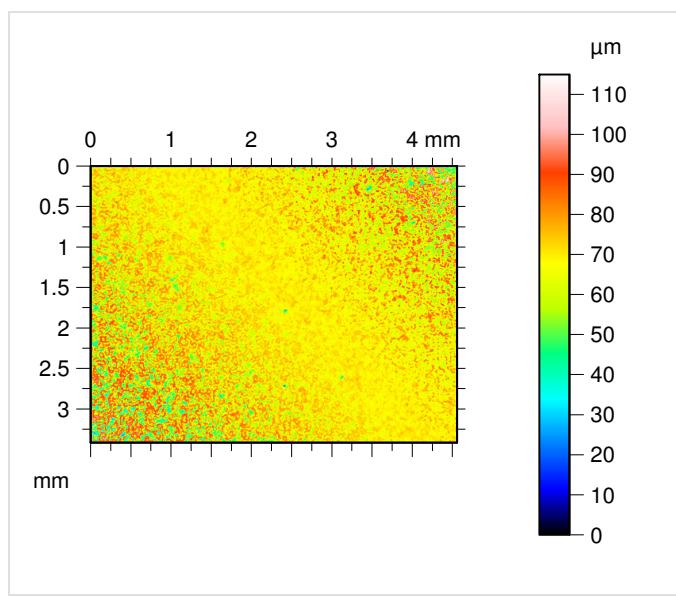
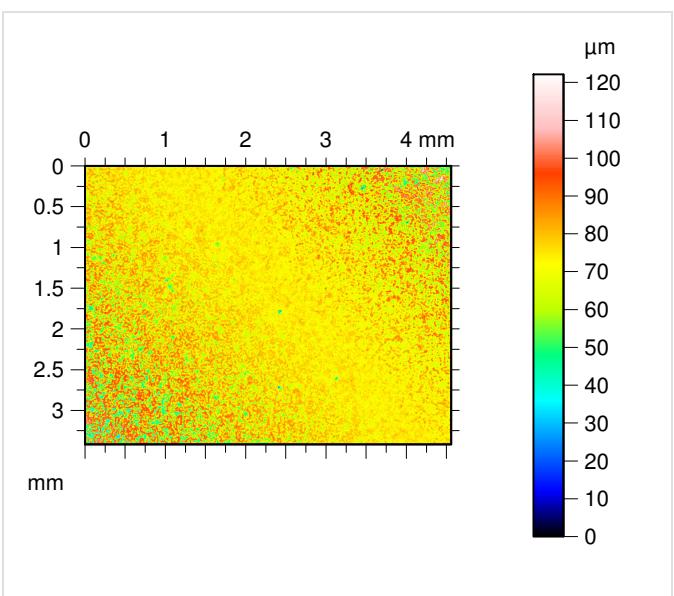
**Carte d'identité**

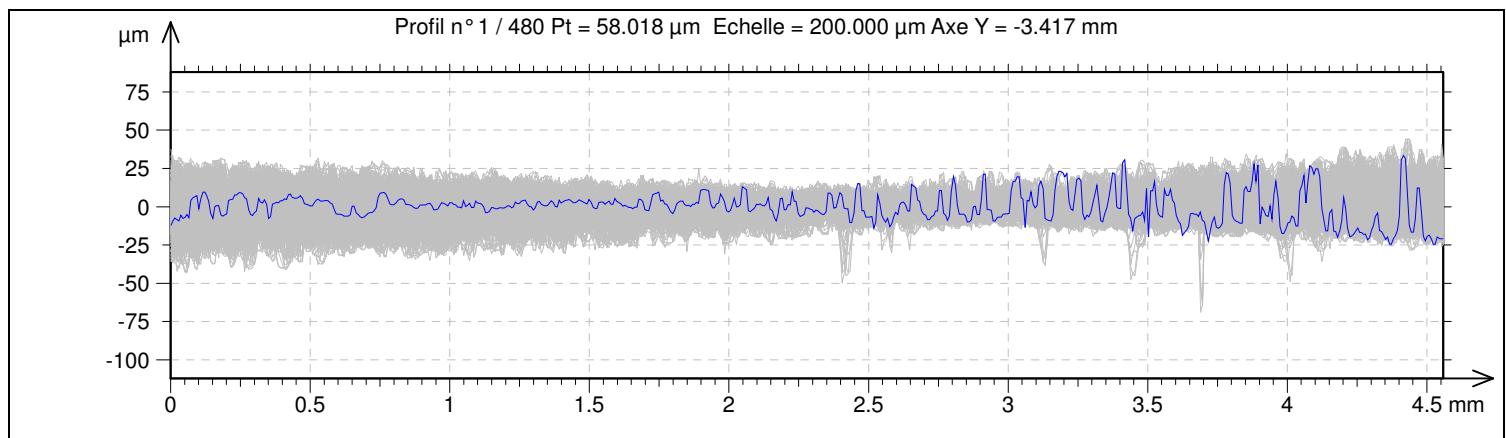
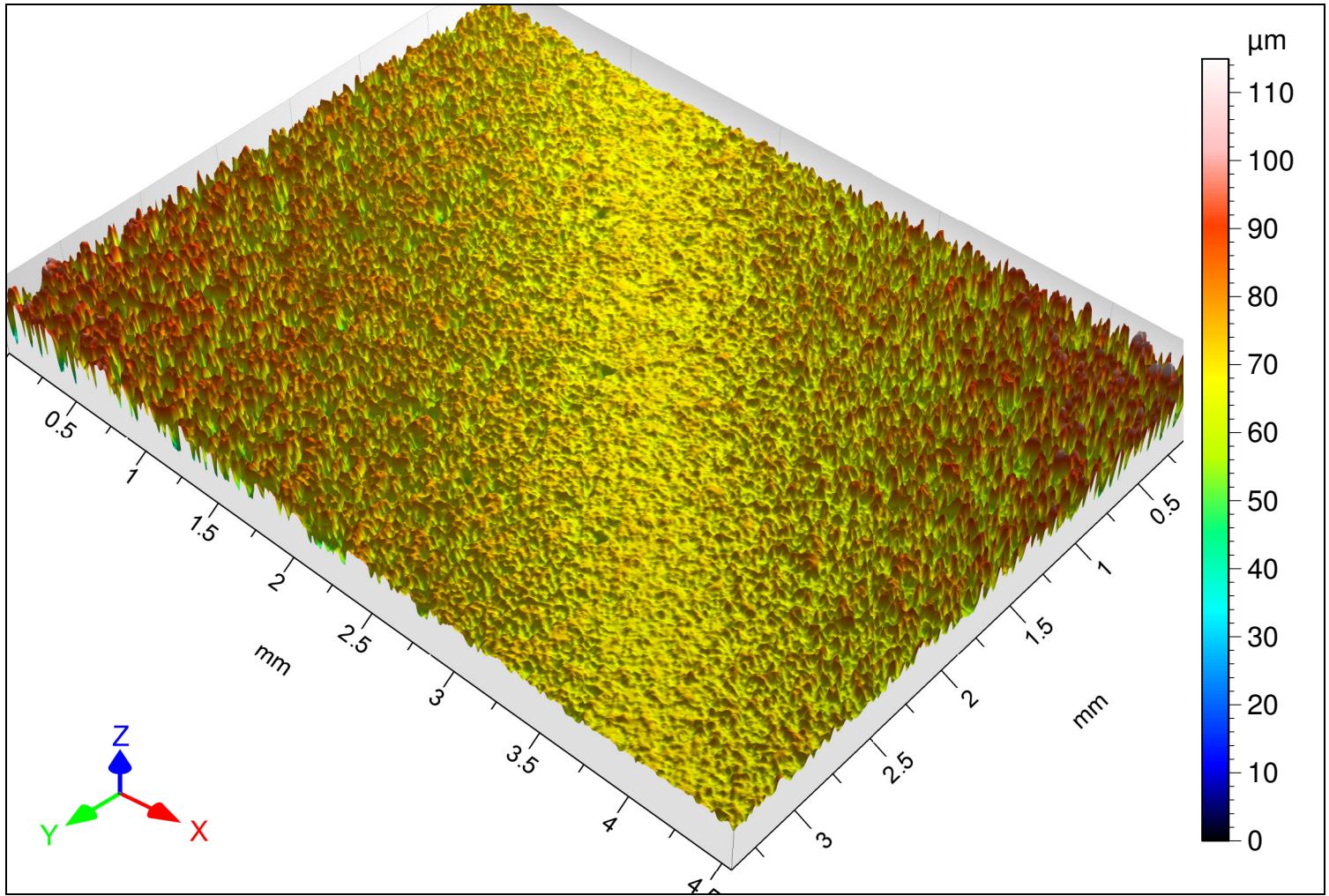
Fichier : U:\Affaires\2016\AC\TRBOSENS\août\PP5\_500\_2.OPD

**Axe : X**  
Longueur : 4.558 mm  
Taille : 640 points  
Pas : 0.007 mm

**Axe : Y**  
Longueur : 3.417 mm  
Taille : 480 lignes  
Pas : 0.007 mm

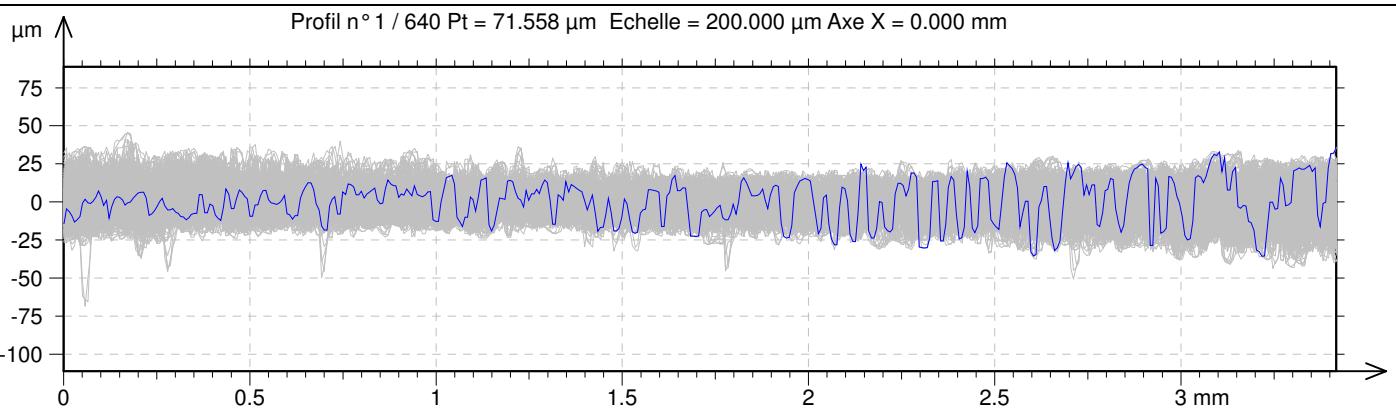
**Axe : Z**  
Longueur : 152.029  $\mu\text{m}$   
Pas : 9.502 nm





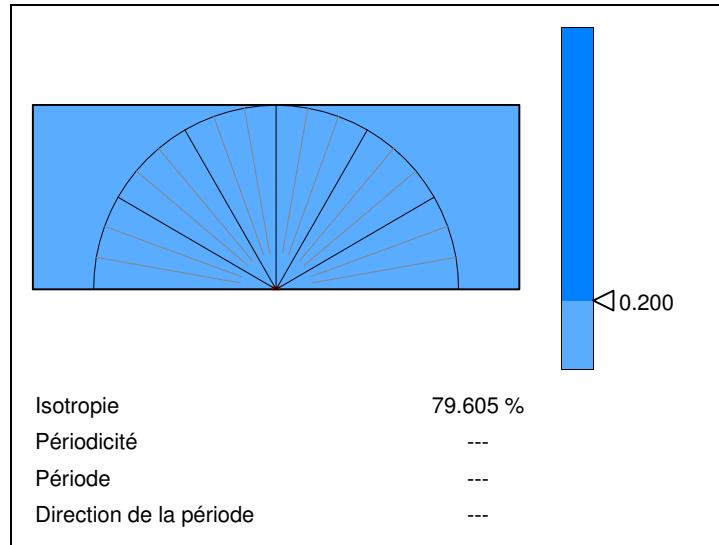
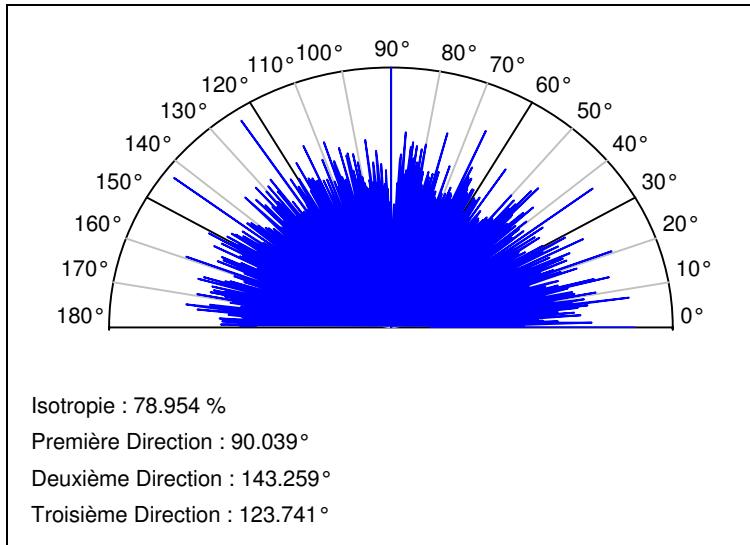
## ISO 4287

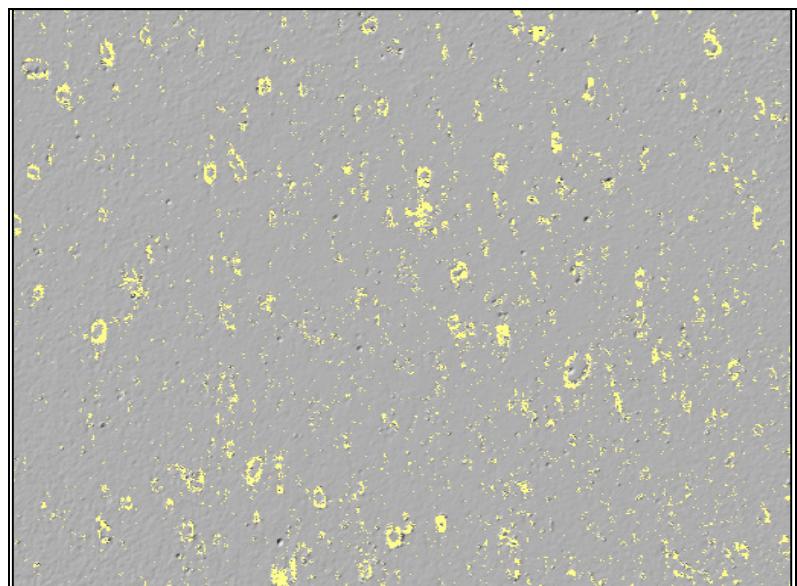
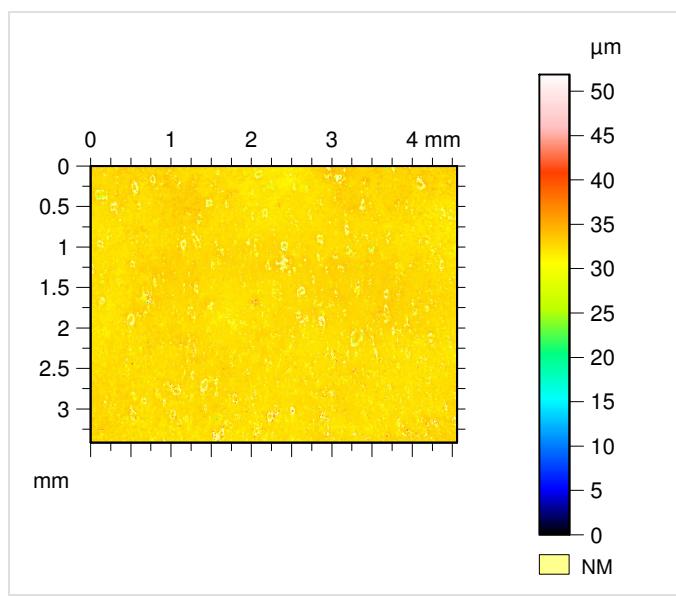
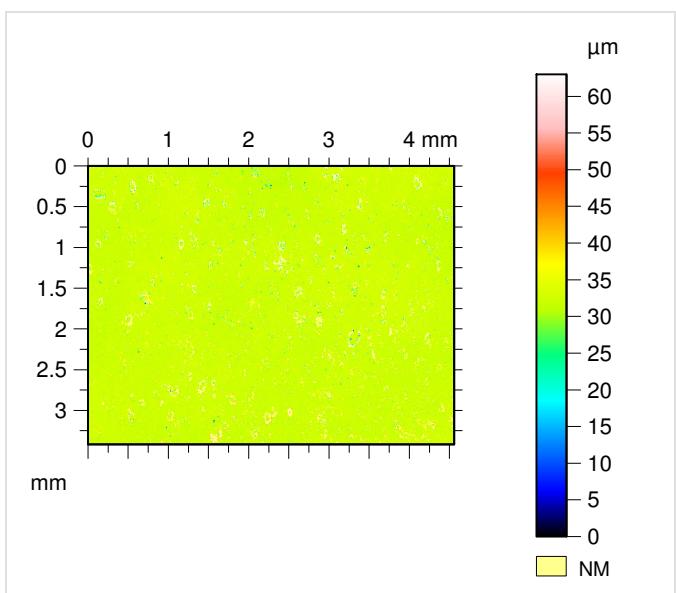
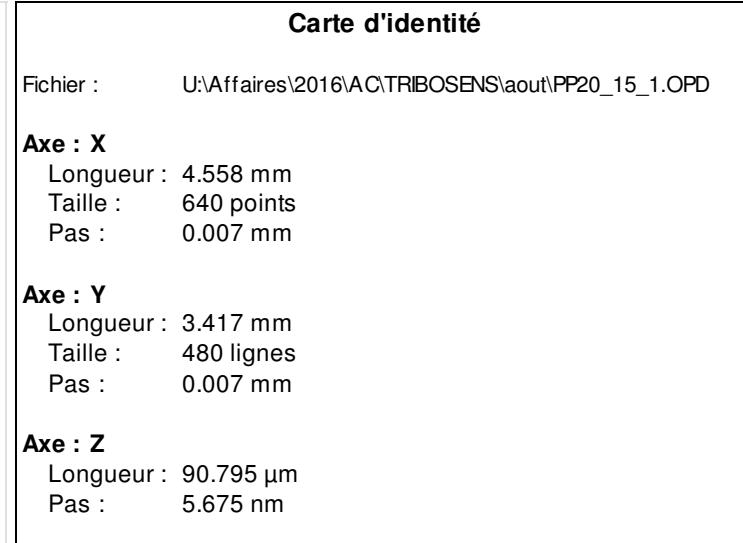
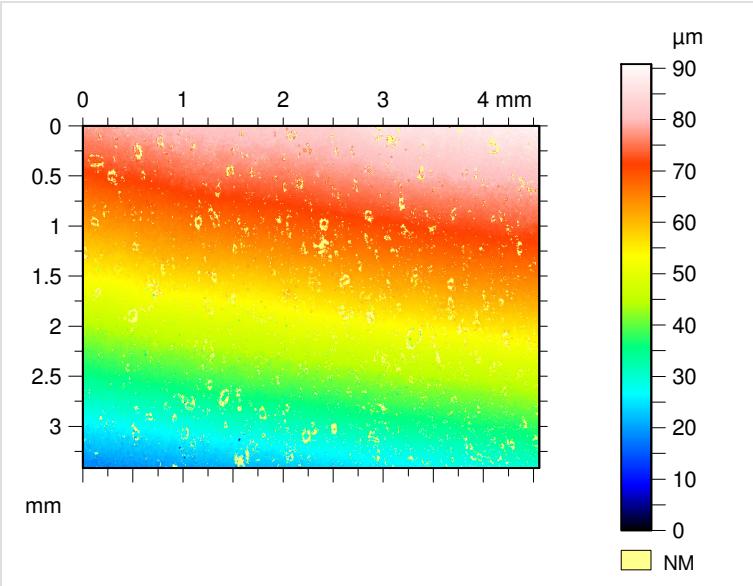
		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
<b>R<sub>a</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	4.705	1.511	2.957	9.340
<b>R<sub>p</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	11.532	2.306	7.516	19.872
<b>R<sub>v</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	12.745	4.175	6.930	24.627
<b>R<sub>z</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	24.277	6.063	15.374	43.160
<b>R<sub>c</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	13.958	2.251	9.969	23.622
<b>R<sub>t</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	42.058	9.614	25.094	92.291
<b>R<sub>q</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	5.682	1.715	3.706	10.773
<b>R<sub>sk</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	-0.090	0.311	-1.120	0.800
<b>R<sub>k<sub>u</sub></sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	2.866	0.665	1.894	6.850
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
<b>R<sub>mr</sub></b>	%	$c = 1 \mu\text{m}$ sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	0.423	0.269	0.189	1.705
<b>R<sub>dc</sub></b>	μm	$p = 20\%$ , $q = 80\%$ , Filtre gaussien, 0.8 mm	9.110	2.010	6.464	17.523

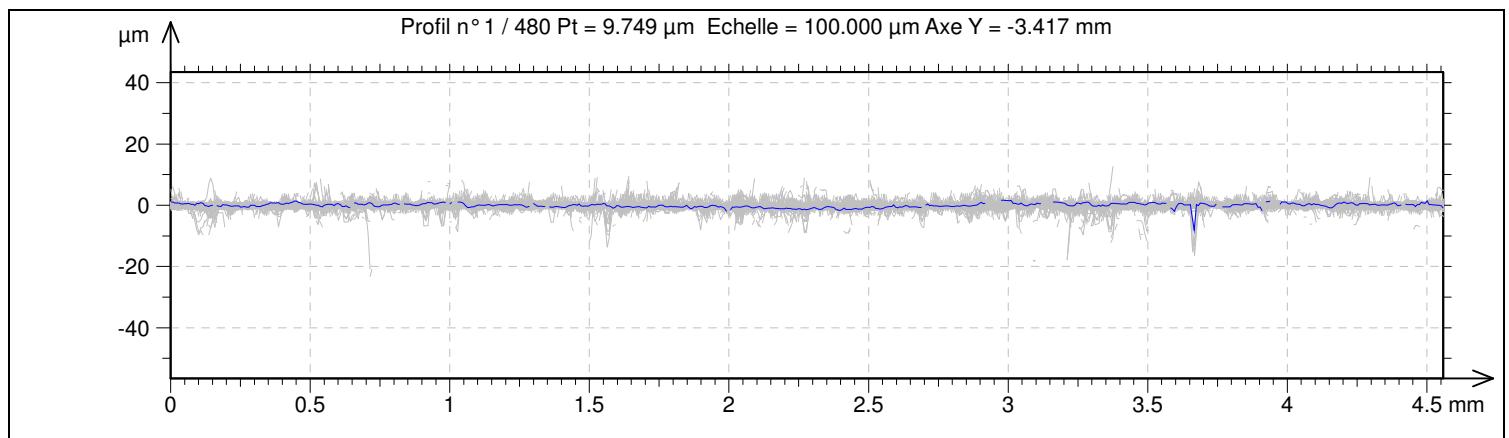
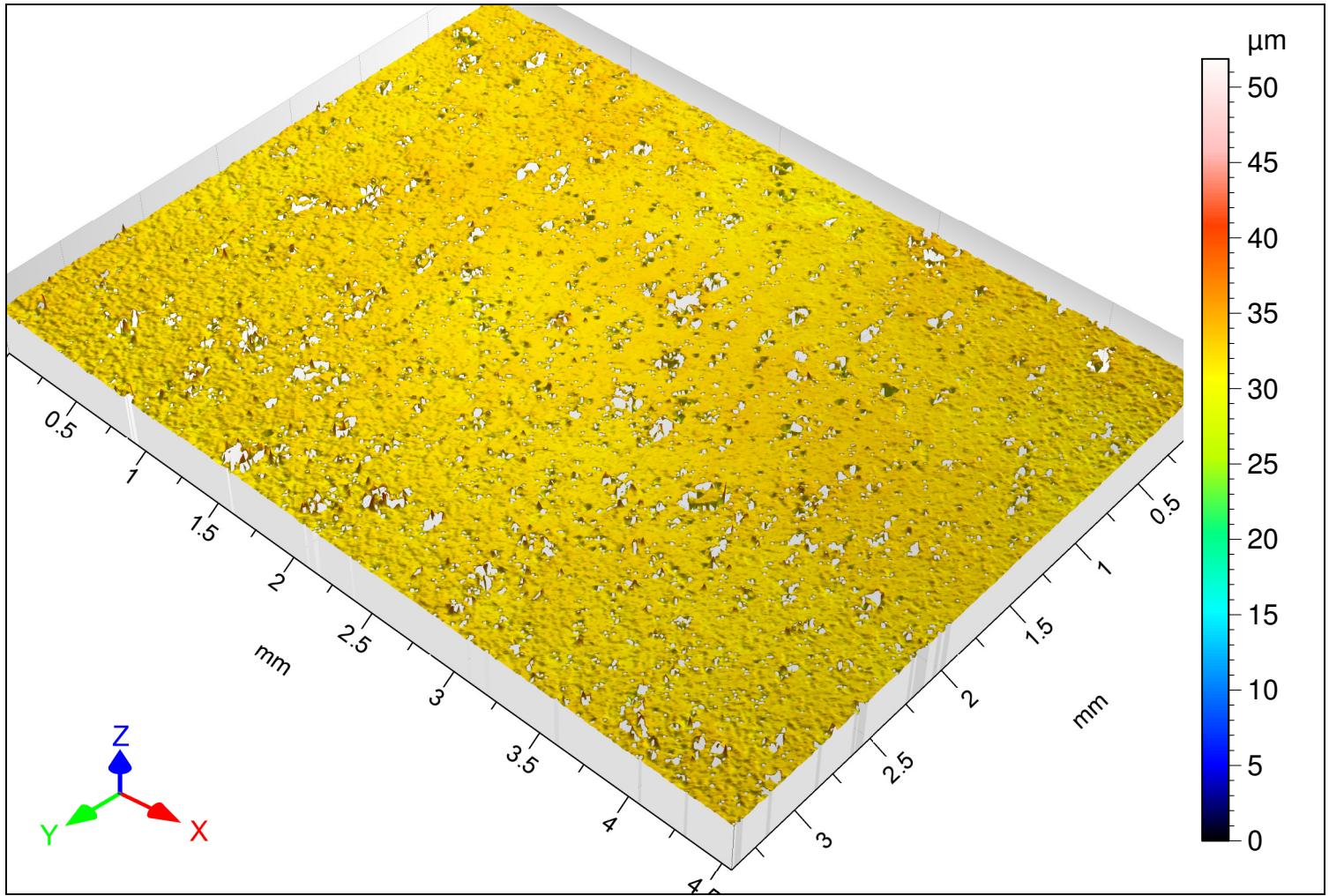


## ISO 4287

Contexte			Mean	Std dev	Min	Max
<b>Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité</b>						
<b>R<sub>a</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	4.863	1.998	1.986	10.152
<b>R<sub>p</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	12.441	4.595	5.874	26.925
<b>R<sub>v</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	12.483	4.672	4.703	25.893
<b>R<sub>z</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	24.925	8.397	11.412	44.979
<b>R<sub>c</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	14.199	5.589	6.138	33.166
<b>R<sub>t</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	36.588	10.789	16.096	61.781
<b>R<sub>q</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	5.865	2.282	2.505	11.471
<b>R<sub>sk</sub></b>		<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	0.006	0.444	-2.135	0.985
<b>R<sub>ku</sub></b>		<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	2.801	0.986	1.814	11.149
<b>Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité</b>						
<b>R<sub>mrr</sub></b>	%	<i>c = 1 µm sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	0.625	0.378	0.272	2.717
<b>R<sub>dc</sub></b>	µm	<i>p = 20%, q = 80%, Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	10.043	4.547	4.143	23.340

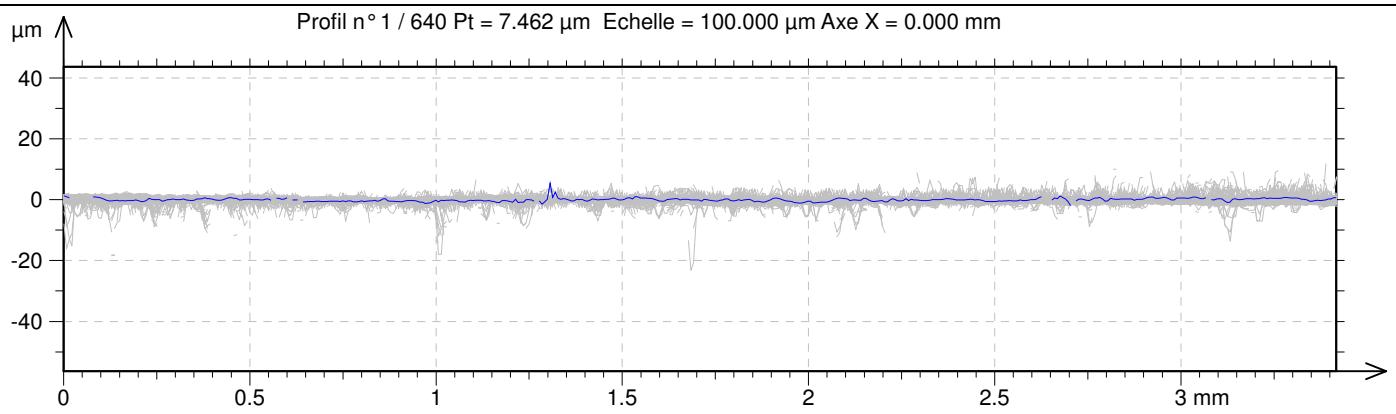






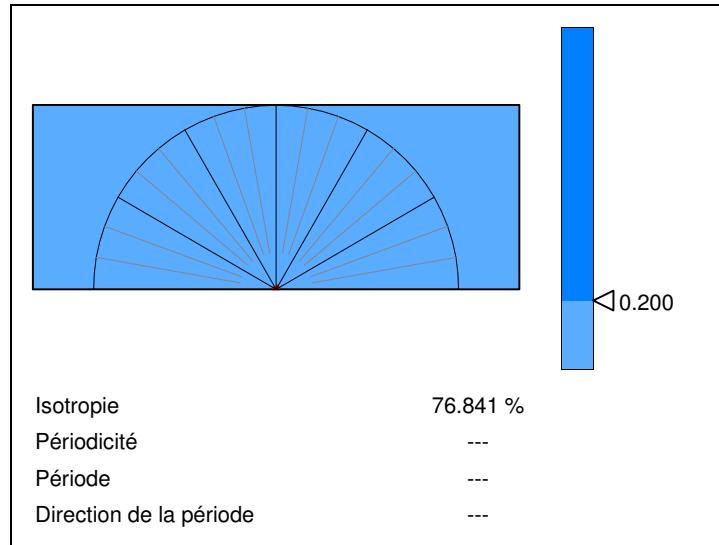
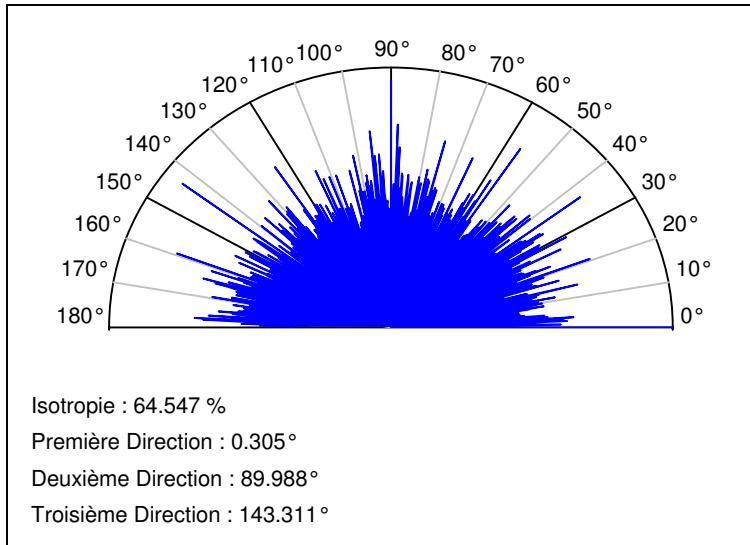
## ISO 4287

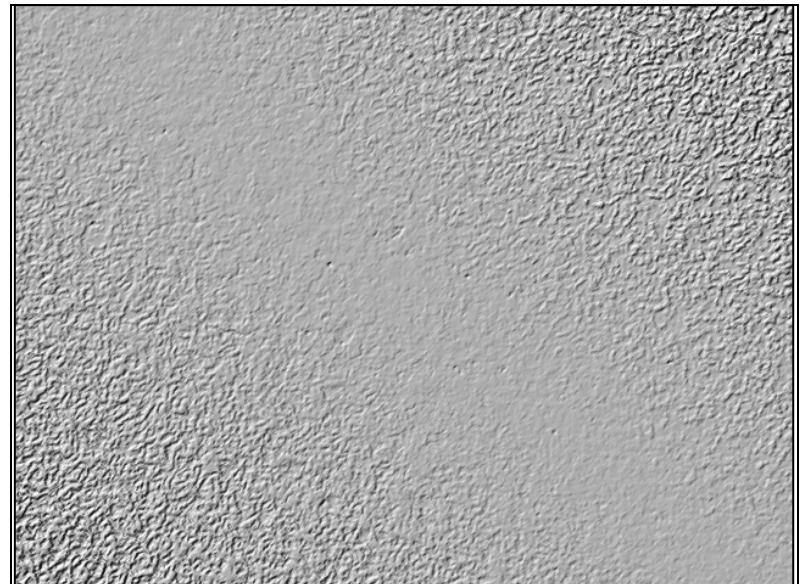
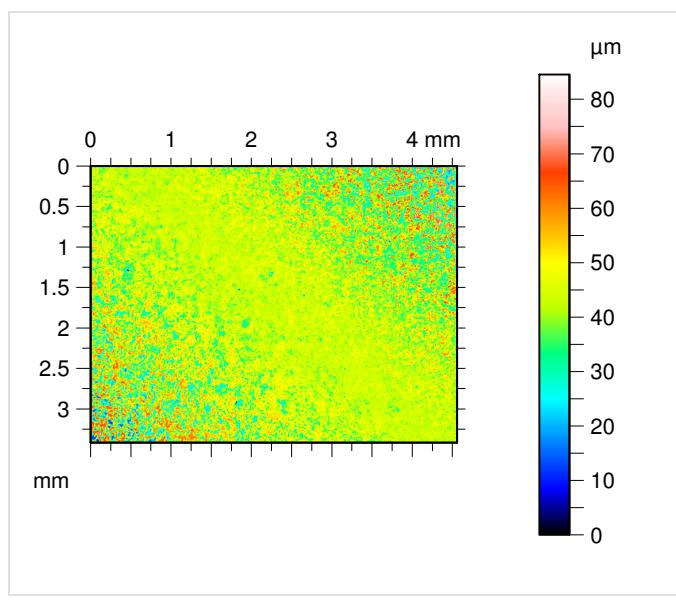
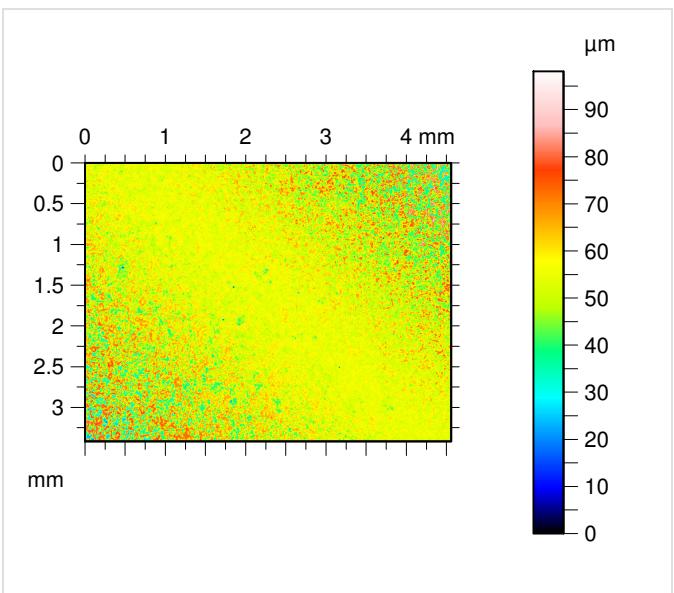
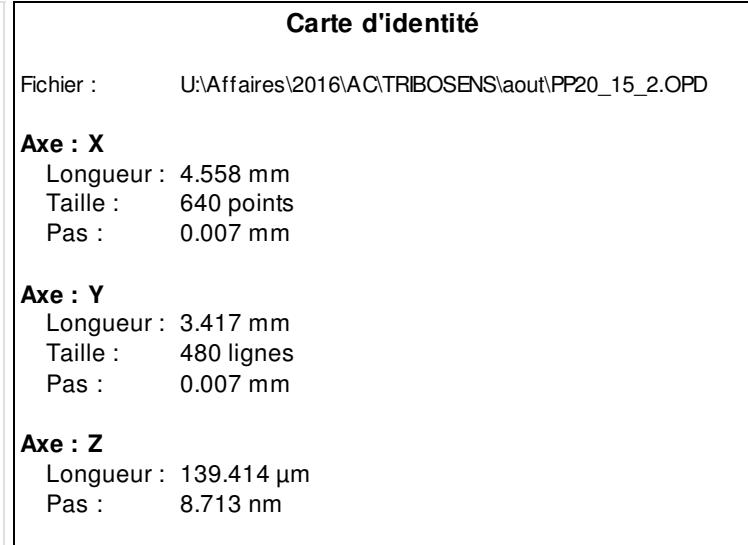
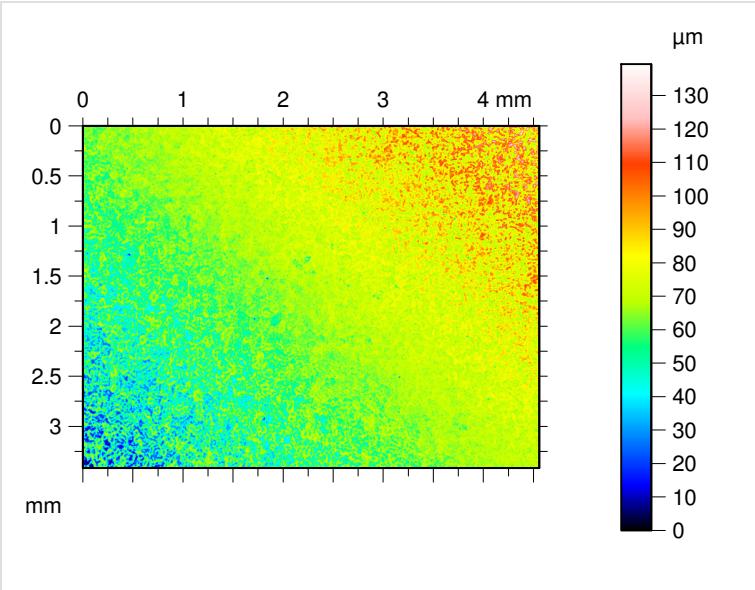
		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
R <sub>a</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.295	0.072	0.159	0.661
R <sub>p</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.630	0.909	0.541	5.114
R <sub>v</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.922	1.083	0.566	8.098
R <sub>z</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	3.552	1.343	1.285	9.691
R <sub>c</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.278	0.504	0.525	4.612
R <sub>t</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	6.773	3.275	1.771	30.473
R <sub>q</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.474	0.152	0.215	1.205
R <sub>sk</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	-0.299	1.552	-4.672	3.869
R <sub>k</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	13.077	5.567	2.273	36.422
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
R <sub>mr</sub>	%	c = 1 µm sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	9.467	18.576	0.193	92.334
R <sub>dc</sub>	µm	p = 20%, q = 80%, Filtre gaussien, 0.8 mm	0.504	0.097	0.302	0.888

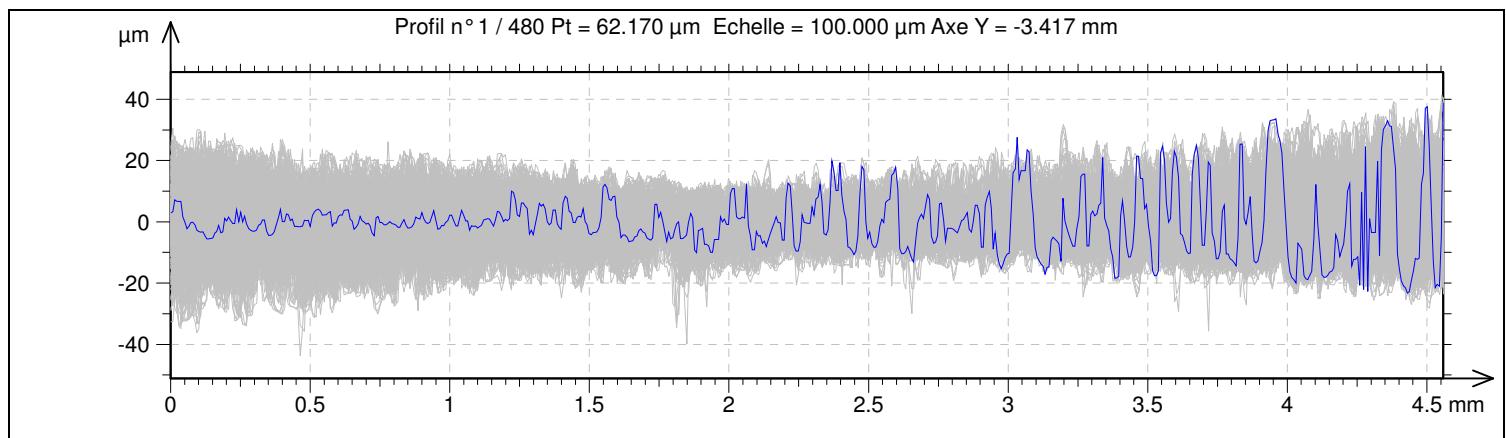
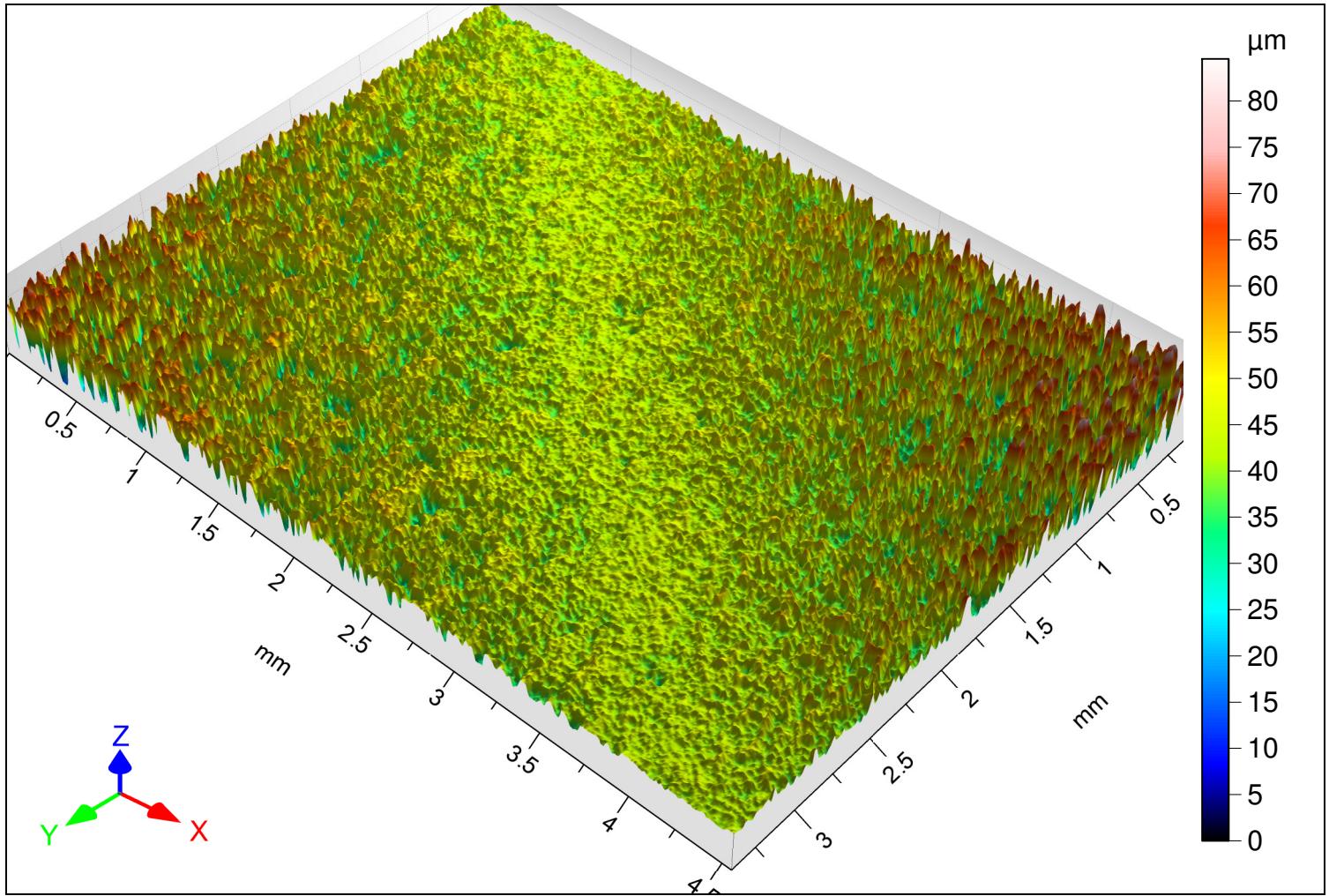


## ISO 4287

		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
R <sub>a</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.266	0.054	0.139	0.564
R <sub>p</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.338	0.593	0.430	6.440
R <sub>v</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.686	0.990	0.531	7.586
R <sub>z</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	3.024	1.289	1.091	9.830
R <sub>c</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.187	0.530	0.503	5.478
R <sub>t</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	5.391	2.822	1.334	24.509
R <sub>q</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.417	0.133	0.186	1.312
R <sub>sk</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	-0.376	1.182	-3.925	3.413
R <sub>ku</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	10.927	5.853	2.271	32.908
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
R <sub>mr</sub>	%	$c = 1 \mu\text{m}$ sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	12.116	23.938	0.274	96.703
R <sub>dc</sub>	µm	$p = 20\%$ , $q = 80\%$ , Filtre gaussien, 0.8 mm	0.466	0.074	0.295	0.750

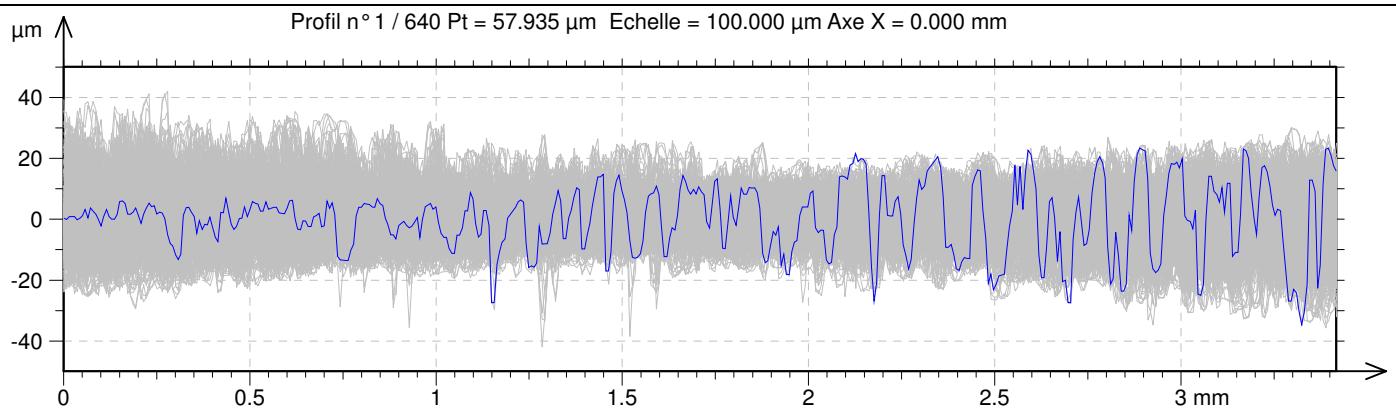






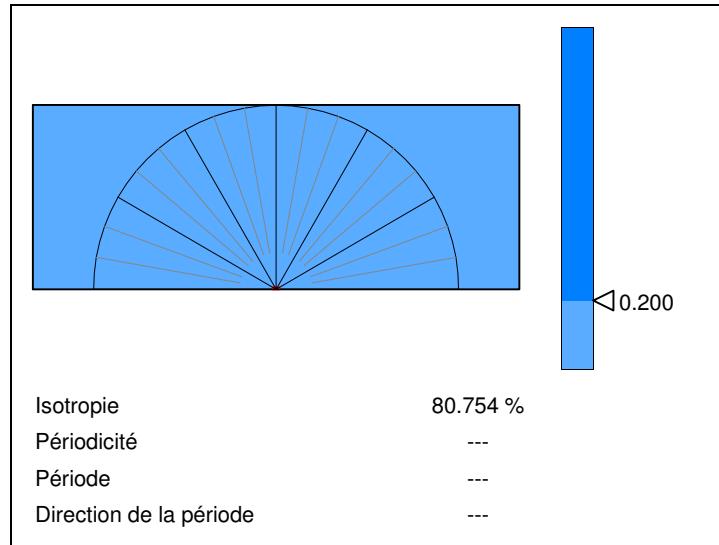
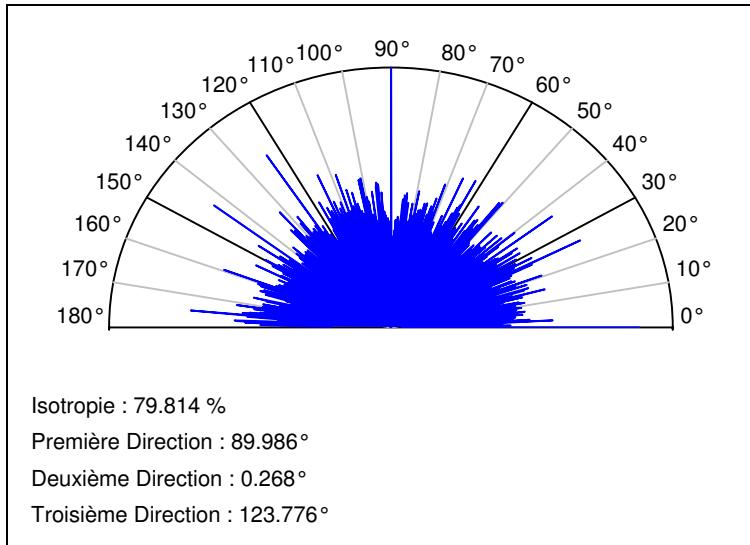
## ISO 4287

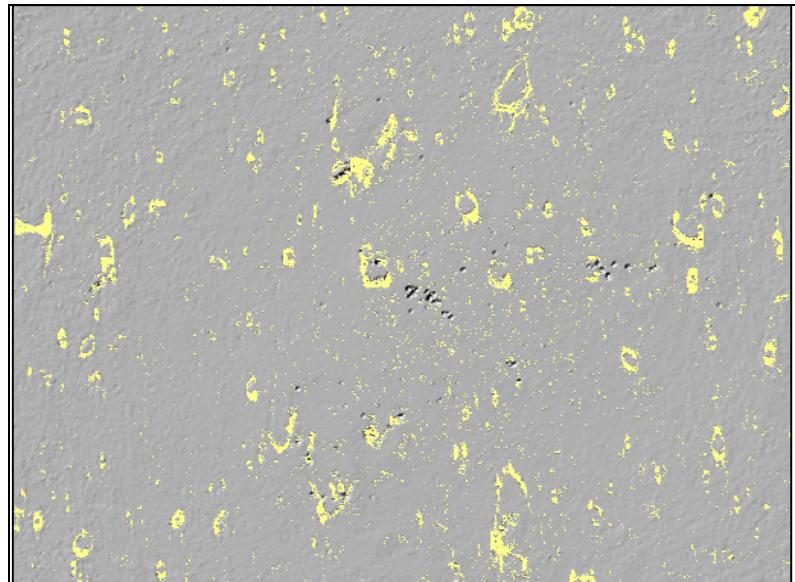
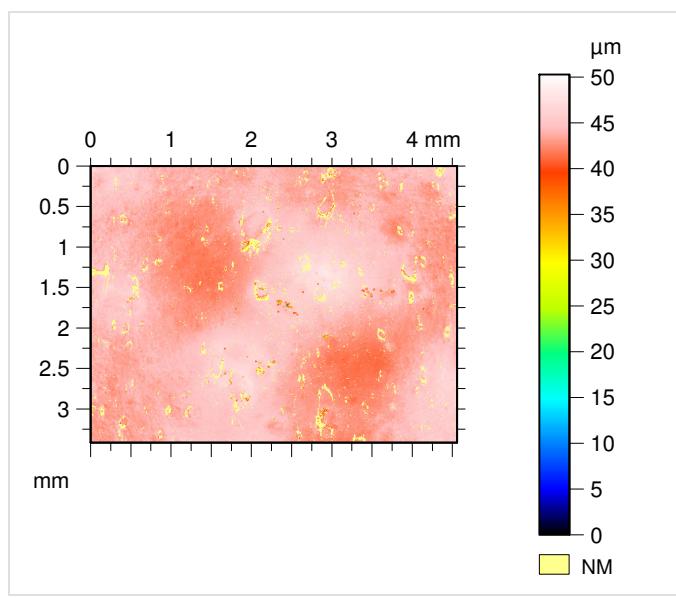
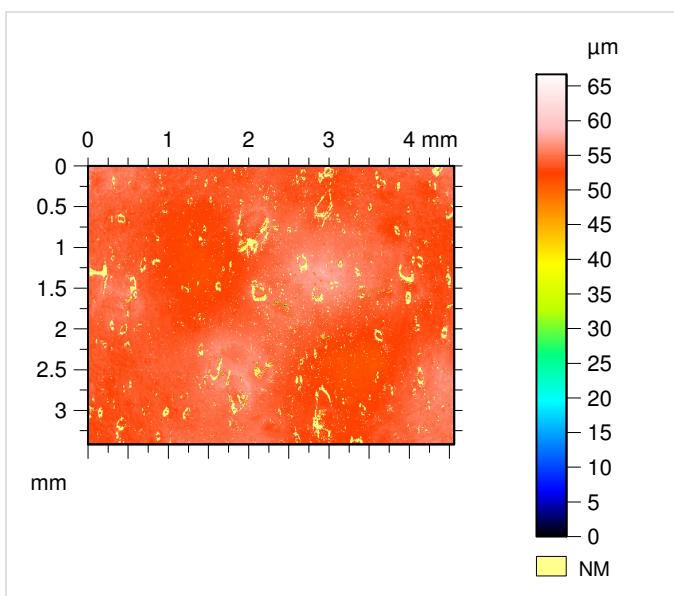
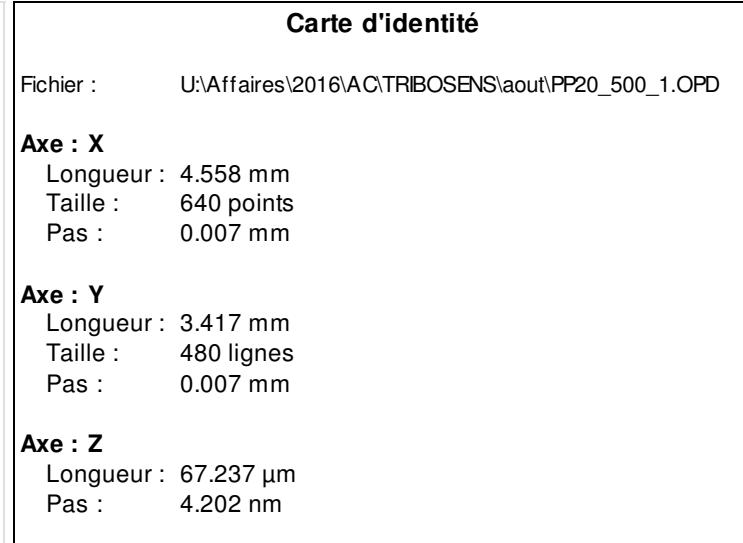
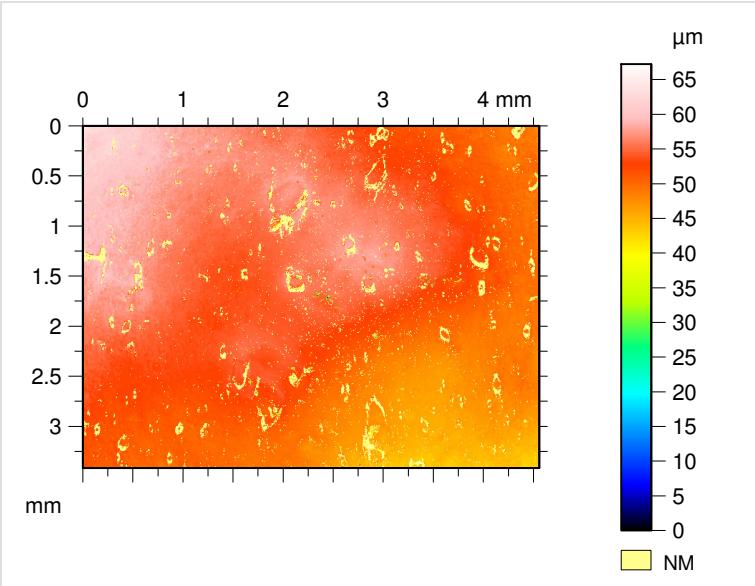
		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
R <sub>a</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	3.933	1.119	2.548	7.801
R <sub>p</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	10.323	2.171	6.933	17.494
R <sub>v</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	10.493	3.055	6.113	20.831
R <sub>z</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	20.816	4.703	13.277	35.161
R <sub>c</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	12.143	2.516	8.445	20.181
R <sub>t</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	36.329	7.871	21.296	57.752
R <sub>q</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	4.767	1.279	3.107	9.053
R <sub>sk</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	-0.010	0.315	-1.071	0.740
R <sub>k</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	2.806	0.635	1.992	9.292
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
R <sub>mr</sub>	%	c = 1 µm sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	0.403	0.256	0.189	1.894
R <sub>dc</sub>	µm	p = 20%, q = 80%, Filtre gaussien, 0.8 mm	7.748	1.718	5.246	14.994

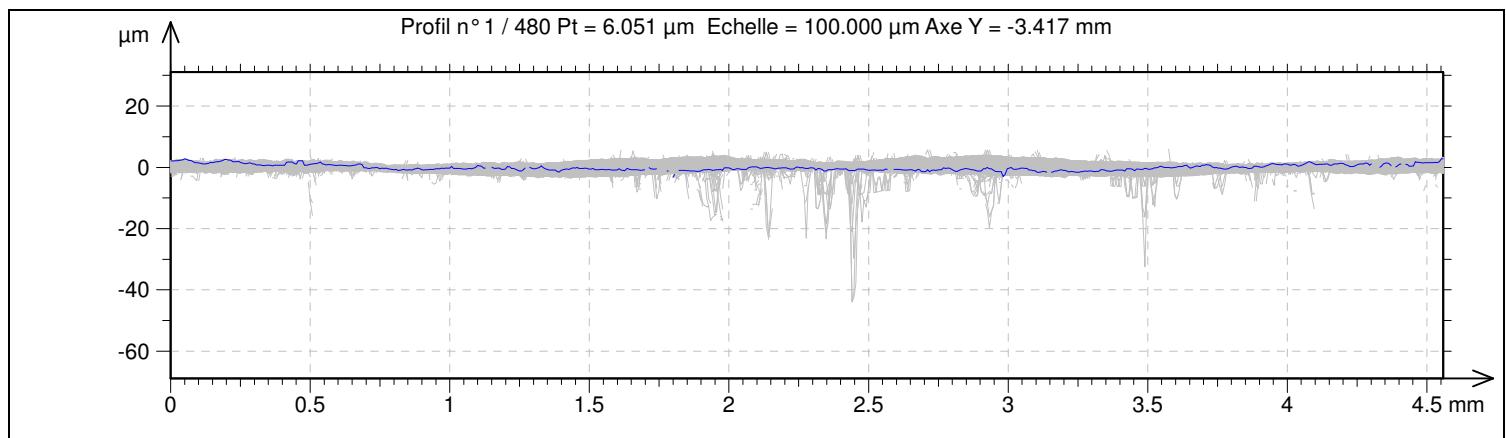
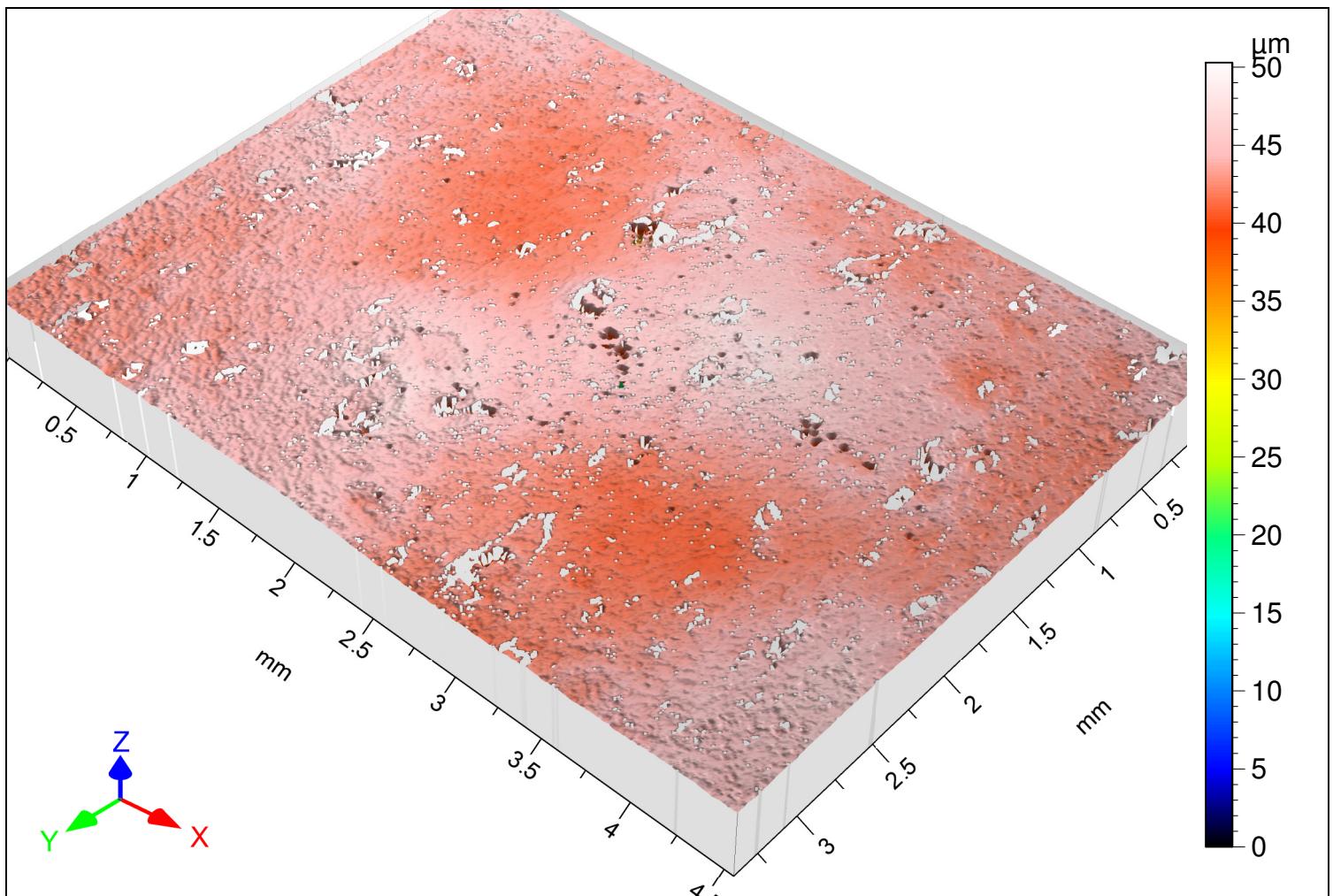


## ISO 4287

Contexte			Mean	Std dev	Min	Max
<b>Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité</b>						
<b>R<sub>a</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	4.014	1.432	1.882	8.006
<b>R<sub>p</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	11.098	4.089	5.240	23.595
<b>R<sub>v</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	10.446	3.018	4.699	22.427
<b>R<sub>z</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	21.545	6.446	10.473	38.475
<b>R<sub>c</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	11.860	3.917	5.659	22.896
<b>R<sub>t</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	32.304	9.013	16.390	54.772
<b>R<sub>q</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	4.897	1.667	2.327	9.266
<b>R<sub>sk</sub></b>		<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	0.069	0.420	-1.403	1.050
<b>R<sub>ku</sub></b>		<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	2.960	0.882	1.974	9.884
<b>Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité</b>						
<b>R<sub>mrr</sub></b>	%	<i>c = 1 µm sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	0.648	0.443	0.272	2.989
<b>R<sub>dc</sub></b>	µm	<i>p = 20%, q = 80%, Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	7.981	2.969	3.732	17.362

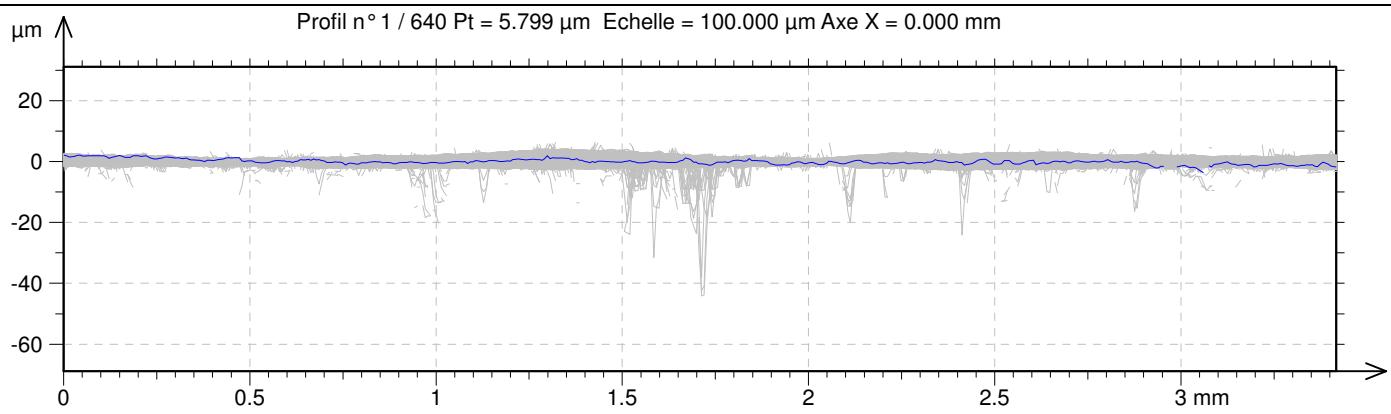






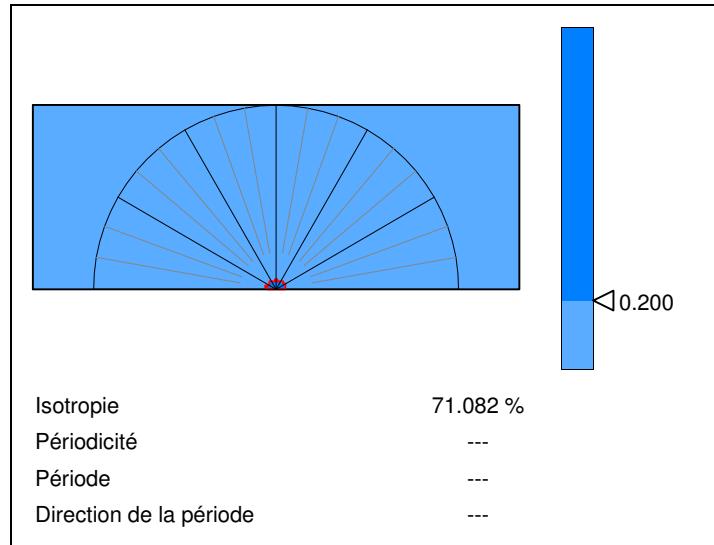
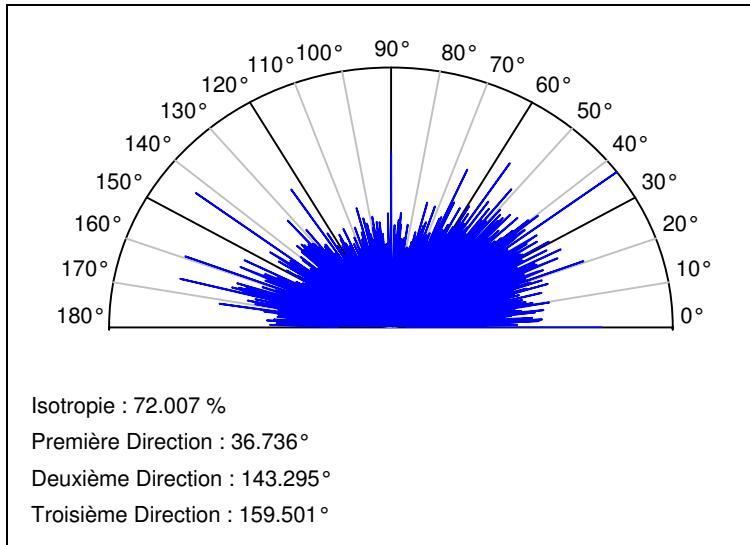
## ISO 4287

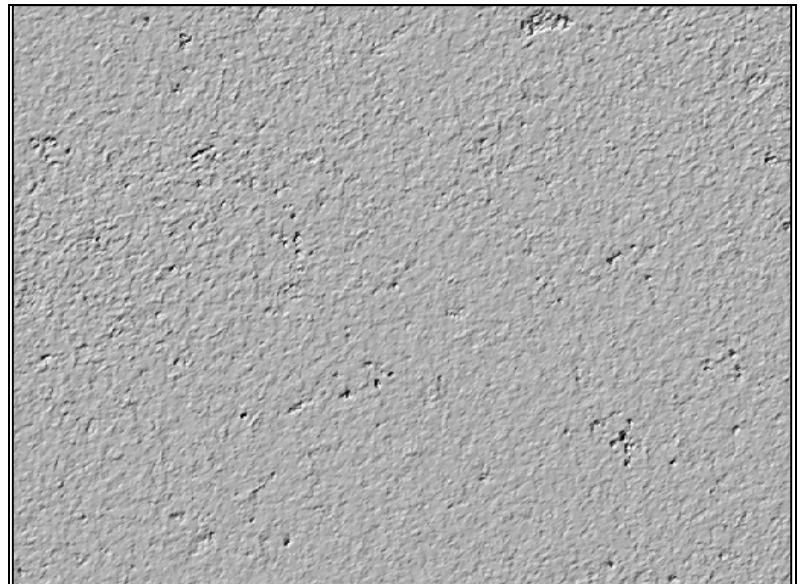
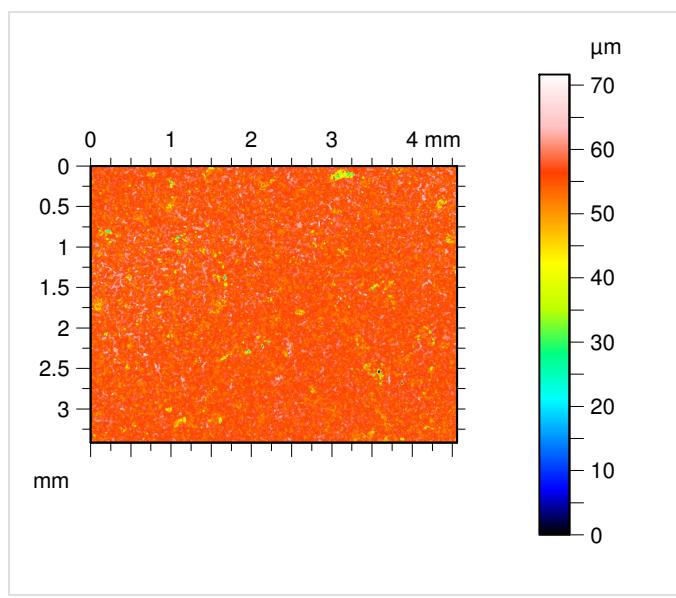
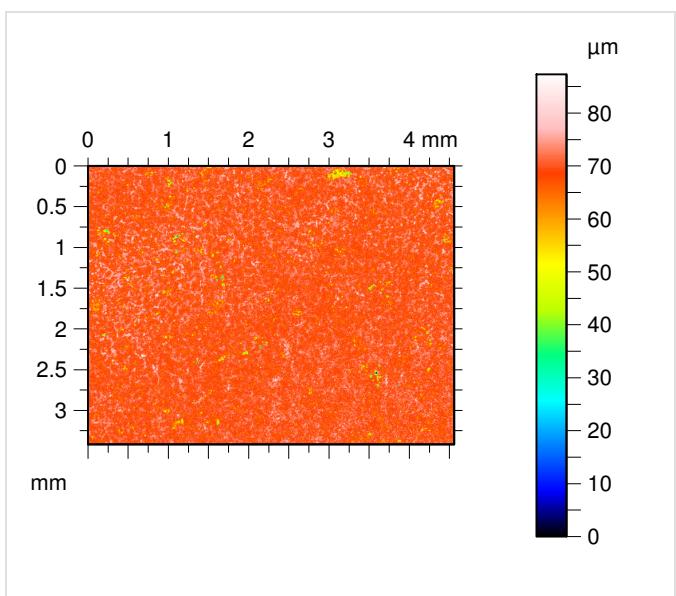
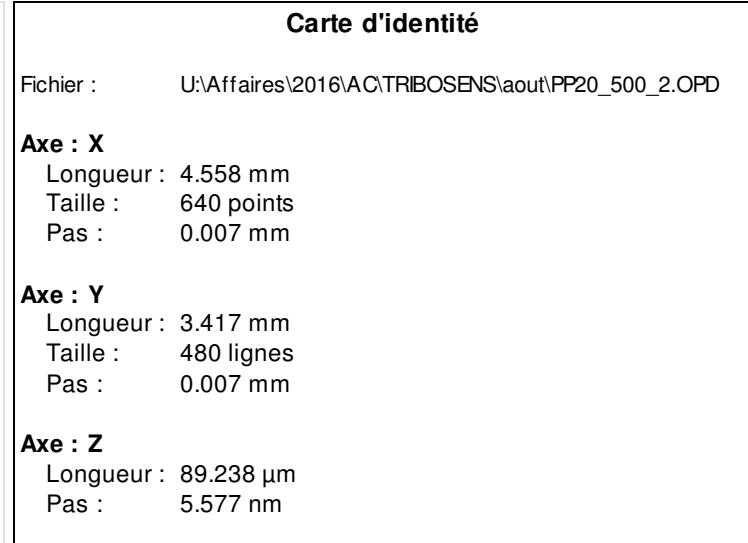
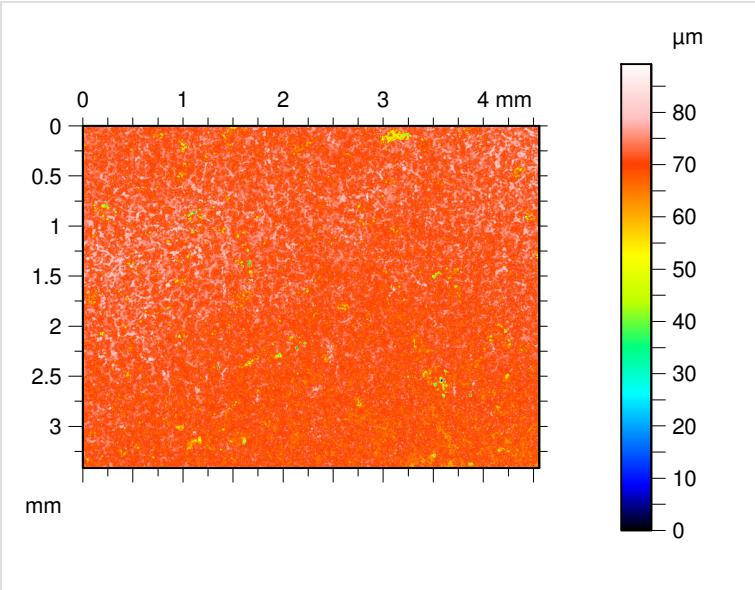
		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
R <sub>a</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.283	0.095	0.157	0.823
R <sub>p</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.005	0.352	0.351	2.591
R <sub>v</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.771	1.459	0.467	10.518
R <sub>z</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	2.776	1.651	0.944	11.838
R <sub>c</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.159	0.701	0.529	7.175
R <sub>t</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	6.348	5.297	1.366	43.393
R <sub>q</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.435	0.223	0.205	1.842
R <sub>sk</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	-0.546	0.874	-3.165	2.191
R <sub>k<sub>u</sub></sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	8.300	4.536	2.425	26.181
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
R <sub>mr</sub>	%	c = 1 µm sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	18.970	24.623	0.193	96.505
R <sub>dc</sub>	µm	p = 20%, q = 80%, Filtre gaussien, 0.8 mm	0.496	0.088	0.302	0.967

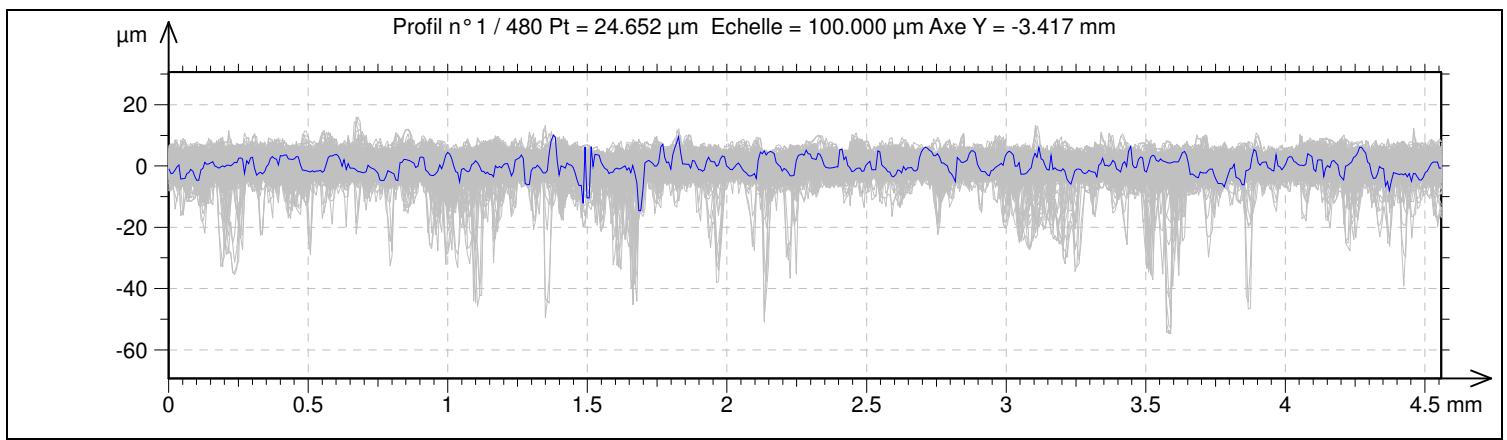
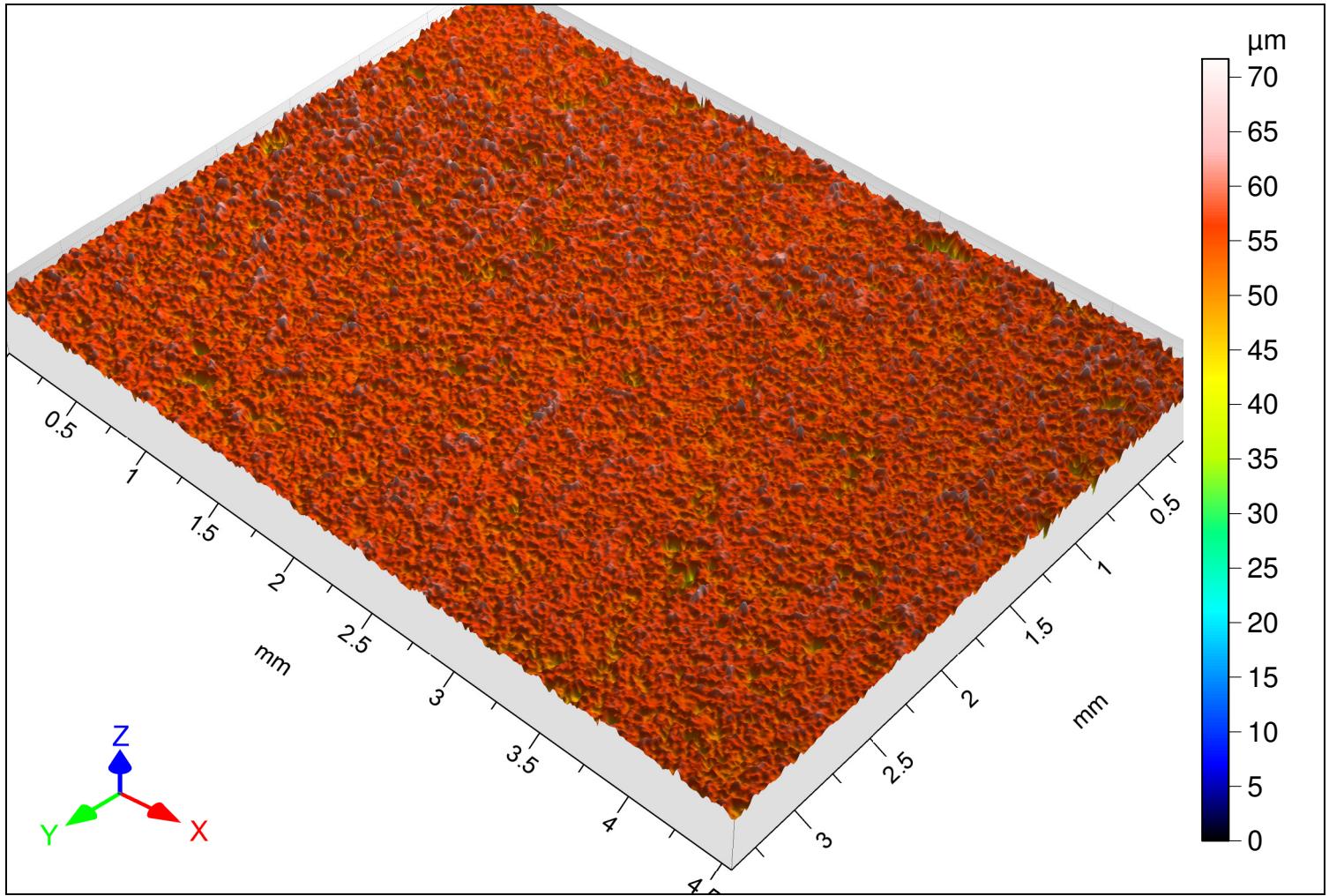


## ISO 4287

		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
<b>R<sub>a</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.283	0.112	0.143	0.887
<b>R<sub>p</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.898	0.379	0.358	2.453
<b>R<sub>v</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.751	1.790	0.343	14.530
<b>R<sub>z</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	2.649	2.026	0.789	15.871
<b>R<sub>c</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.359	2.186	0.346	44.406
<b>R<sub>t</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	5.000	5.017	1.076	44.406
<b>R<sub>q</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.429	0.259	0.180	2.230
<b>R<sub>sk</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	-0.648	1.018	-5.117	2.314
<b>R<sub>ku</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	7.551	5.530	2.172	33.010
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
<b>R<sub>mr</sub></b>	%	$c = 1 \mu\text{m}$ sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	39.242	33.575	0.272	99.720
<b>R<sub>dc</sub></b>	µm	$p = 20\%$ , $q = 80\%$ , Filtre gaussien, 0.8 mm	0.504	0.135	0.268	1.289

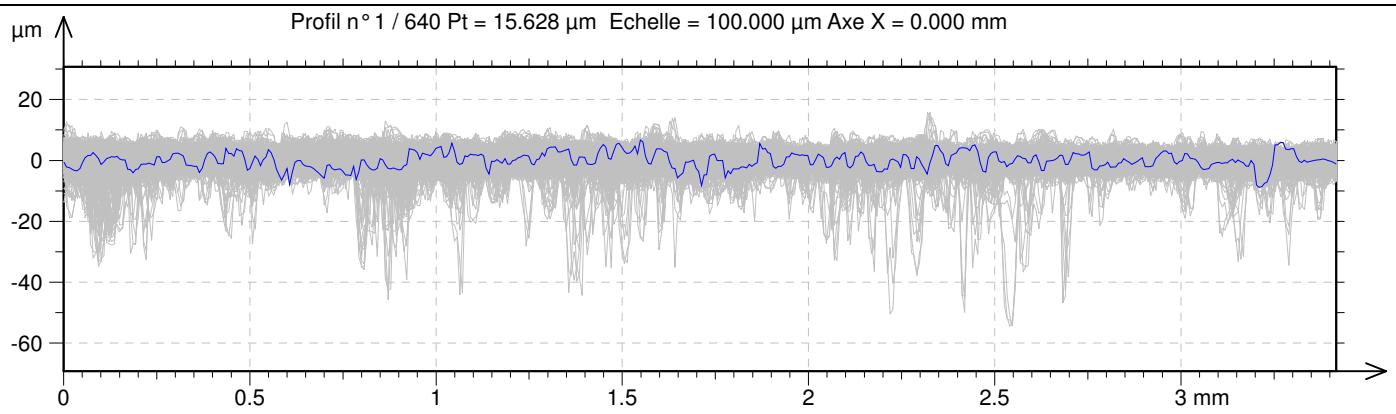






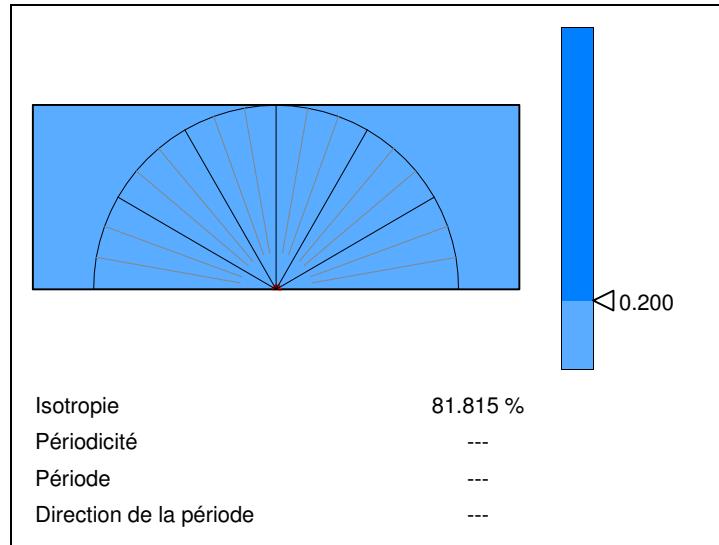
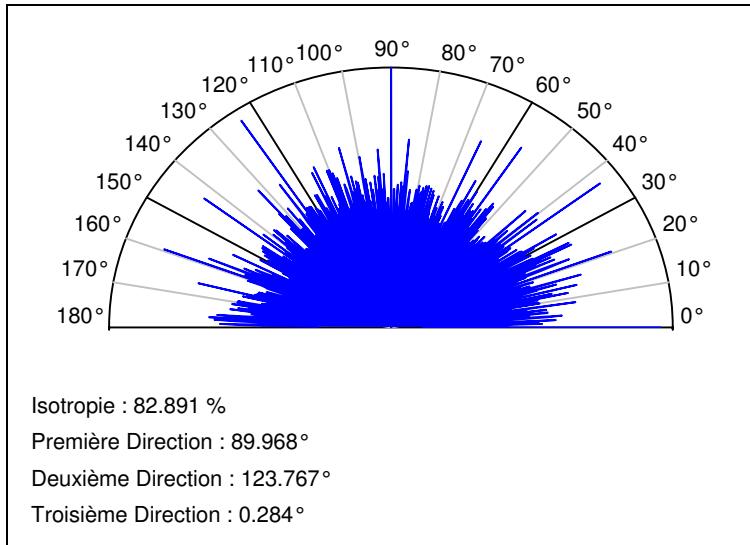
## ISO 4287

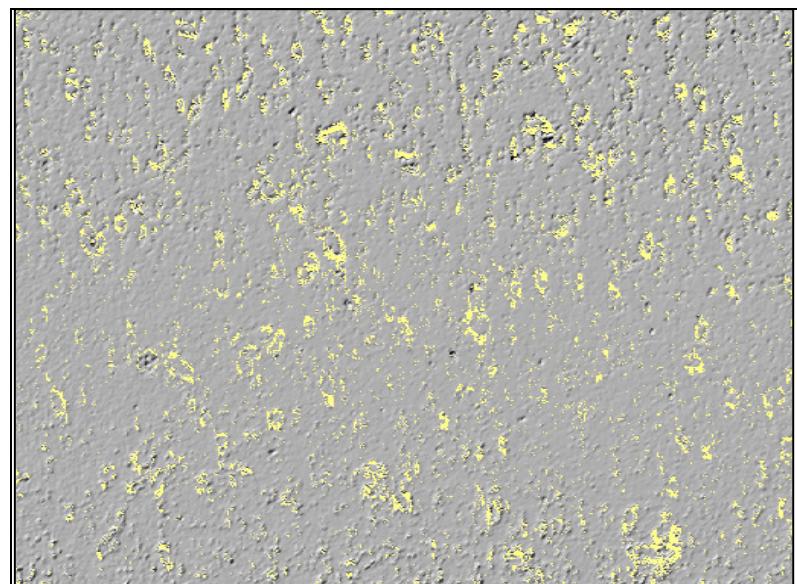
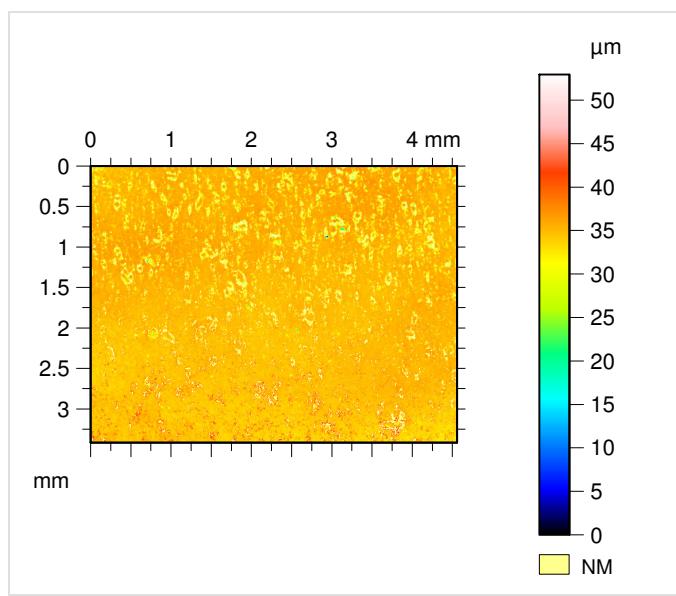
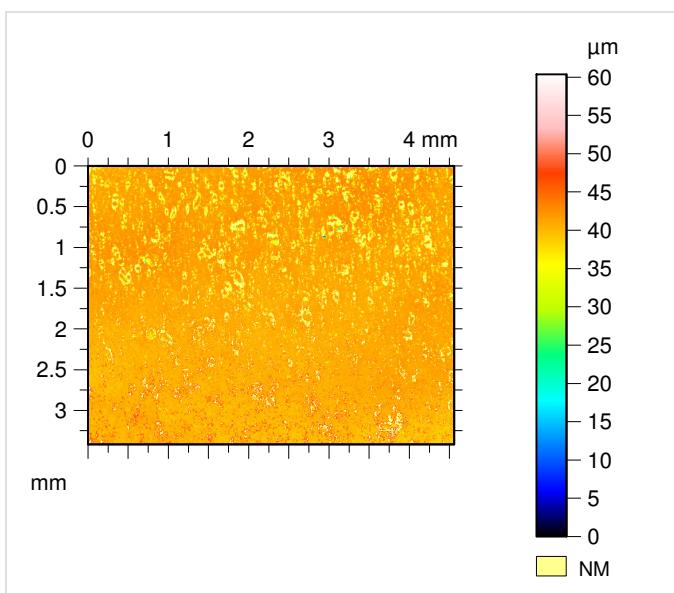
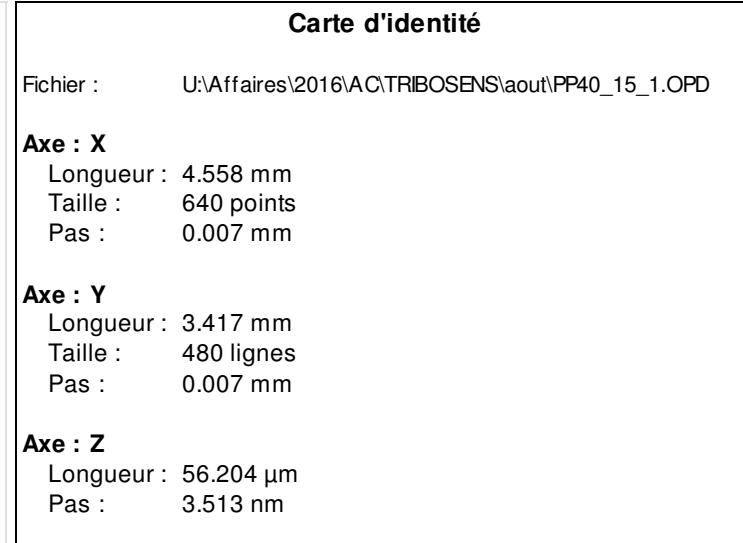
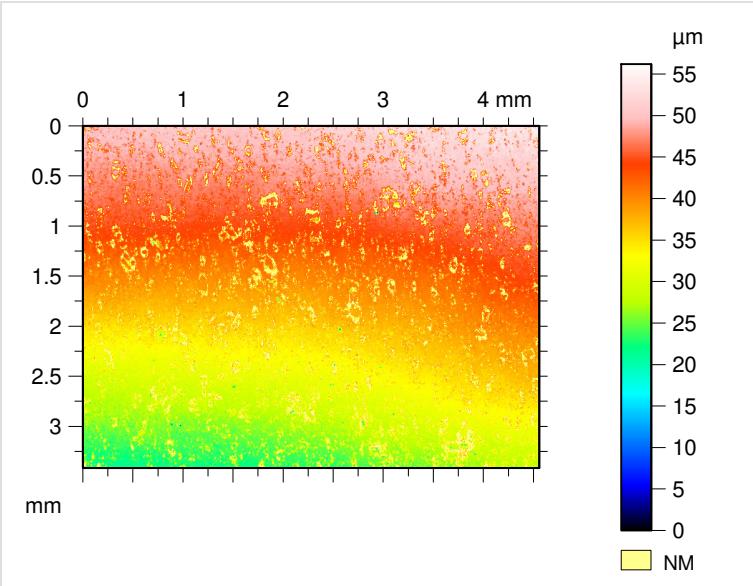
		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
R <sub>a</sub>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.786	0.263	1.312	2.855
R <sub>p</sub>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	5.329	0.871	3.203	8.343
R <sub>v</sub>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	7.398	2.665	3.749	17.355
R <sub>z</sub>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	12.727	3.020	7.596	24.598
R <sub>c</sub>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	5.530	0.892	3.808	9.854
R <sub>t</sub>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	21.293	9.000	10.379	57.062
R <sub>q</sub>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	2.371	0.433	1.614	4.089
R <sub>sk</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	-0.338	0.458	-1.908	0.749
R <sub>k</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	4.560	1.785	2.444	11.408
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
R <sub>mr</sub>	%	c = 1 μm sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	0.877	0.664	0.189	3.977
R <sub>dc</sub>	μm	p = 20%, q = 80%, Filtre gaussien, 0.8 mm	3.502	0.412	2.506	4.777

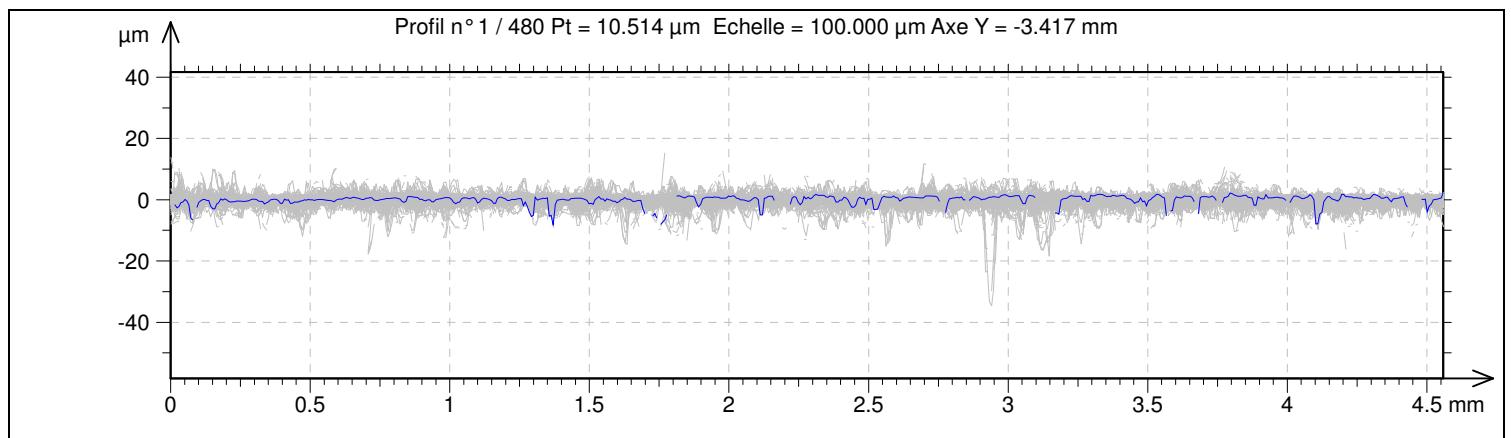
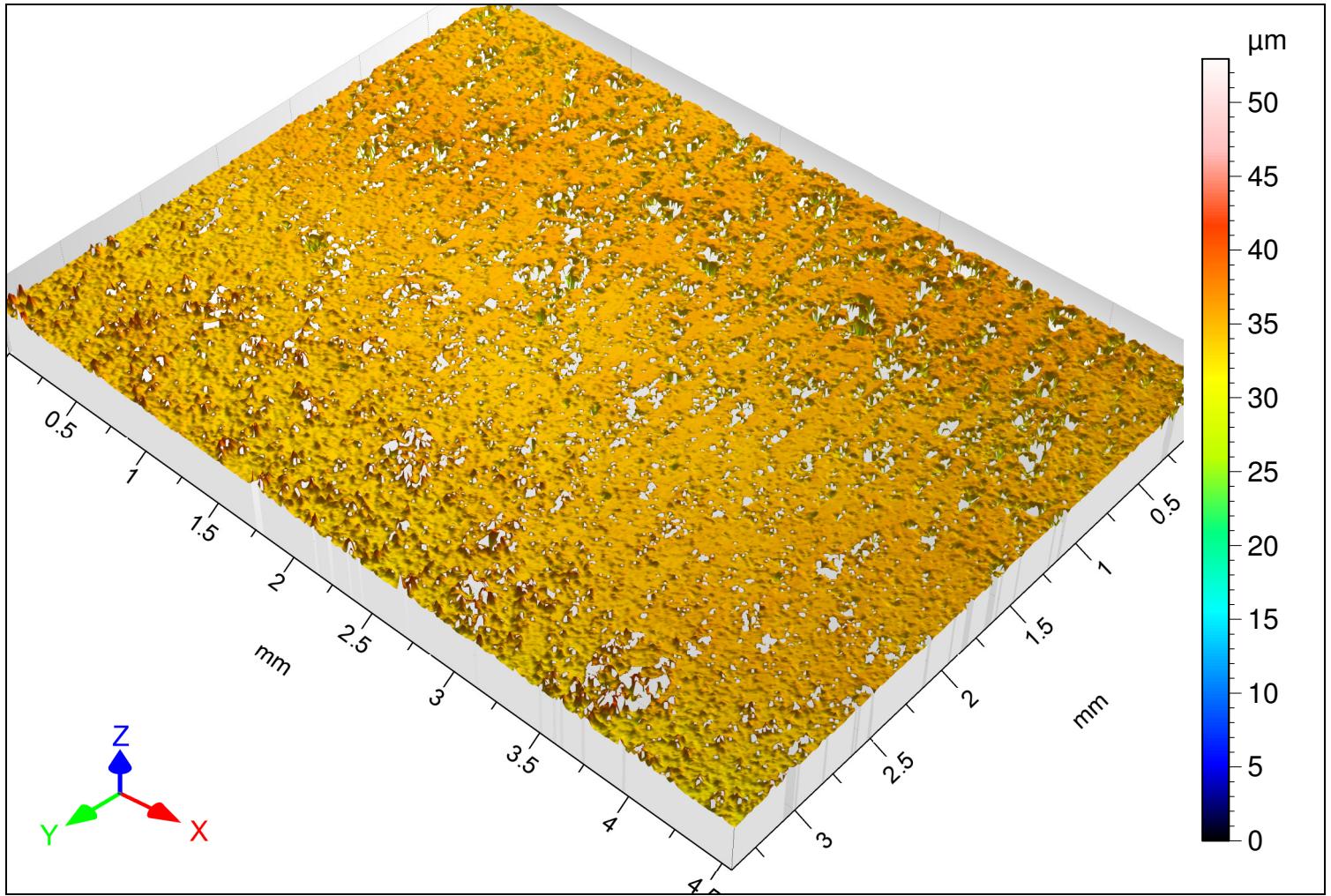


## ISO 4287

		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
R <sub>a</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.774	0.278	1.230	2.966
R <sub>p</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	5.384	0.933	3.385	8.490
R <sub>v</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	7.342	3.195	3.547	21.955
R <sub>z</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	12.727	3.666	7.262	27.926
R <sub>c</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	5.558	1.140	3.481	14.210
R <sub>t</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	18.326	8.162	8.611	56.867
R <sub>q</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	2.364	0.503	1.538	4.739
R <sub>sk</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	-0.306	0.534	-2.404	0.772
R <sub>ku</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	4.532	2.111	2.229	14.224
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
R <sub>mrr</sub>	%	c = 1 µm sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	1.197	0.881	0.272	4.891
R <sub>dc</sub>	µm	p = 20%, q = 80%, Filtre gaussien, 0.8 mm	3.451	0.448	2.435	5.045

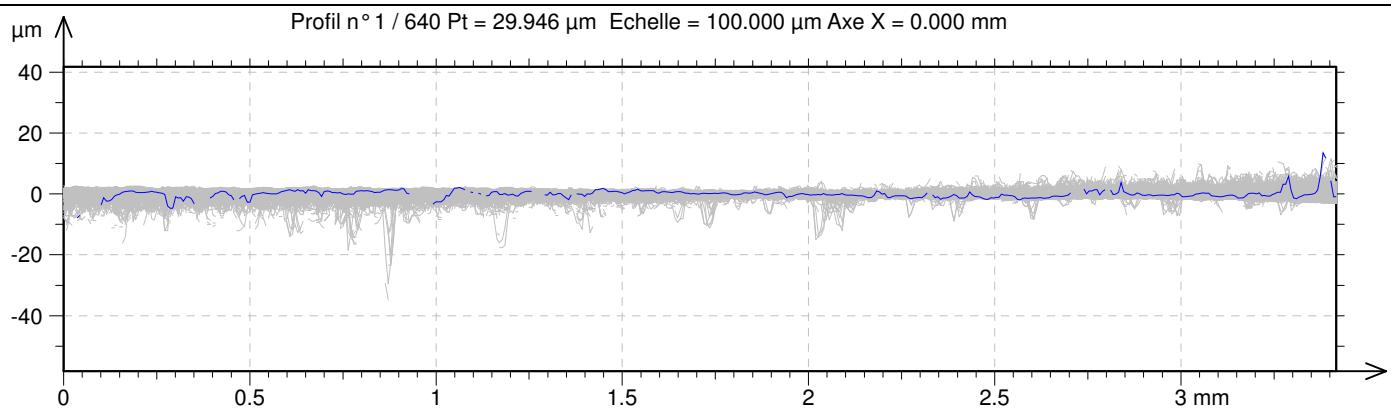






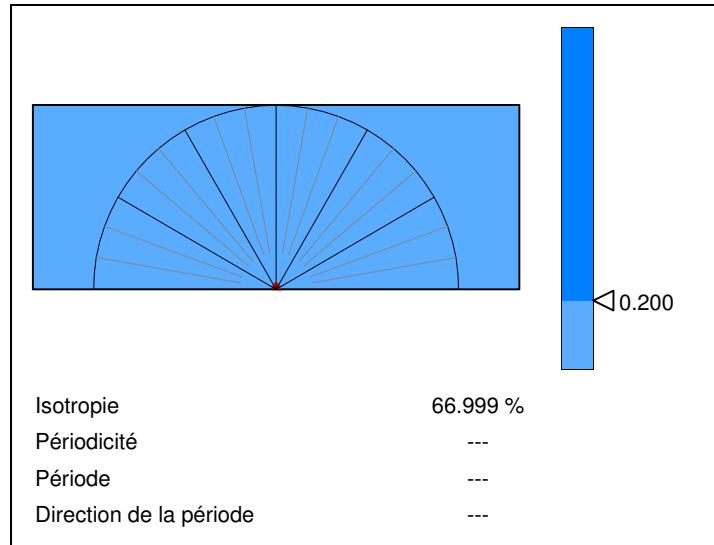
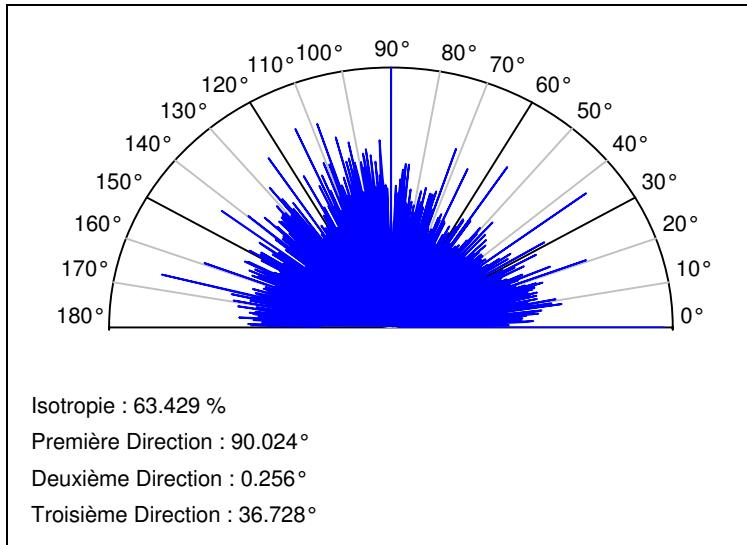
## ISO 4287

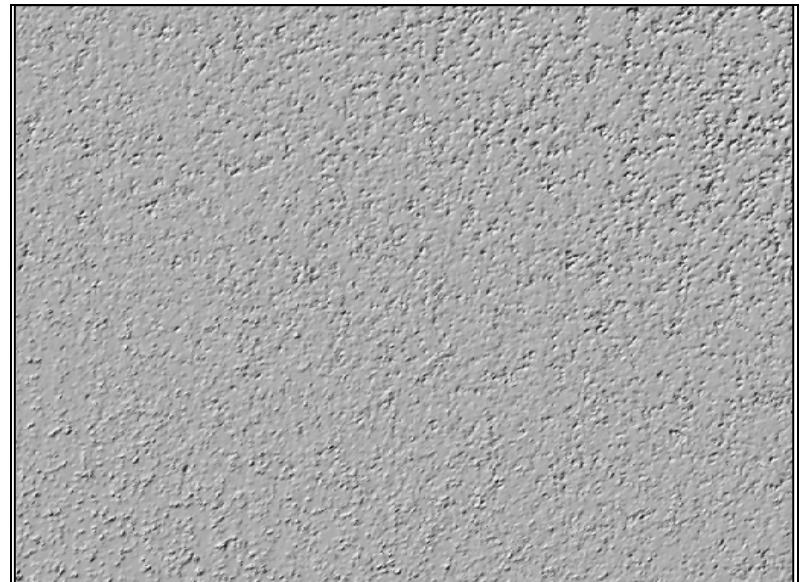
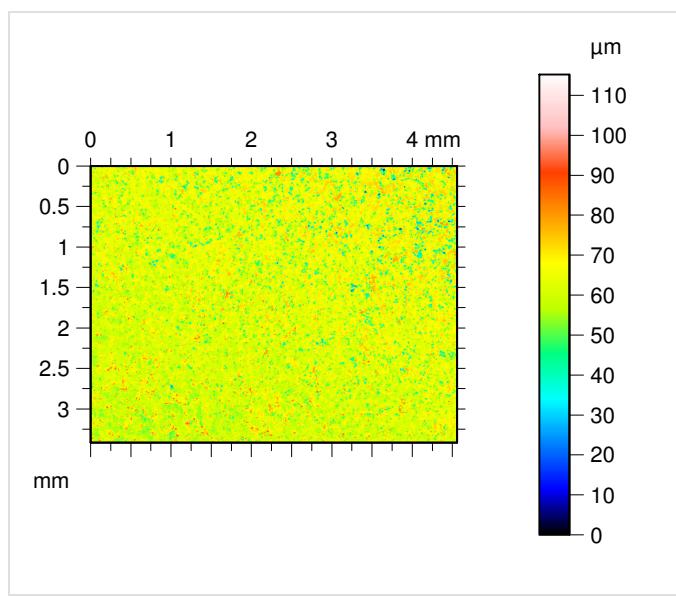
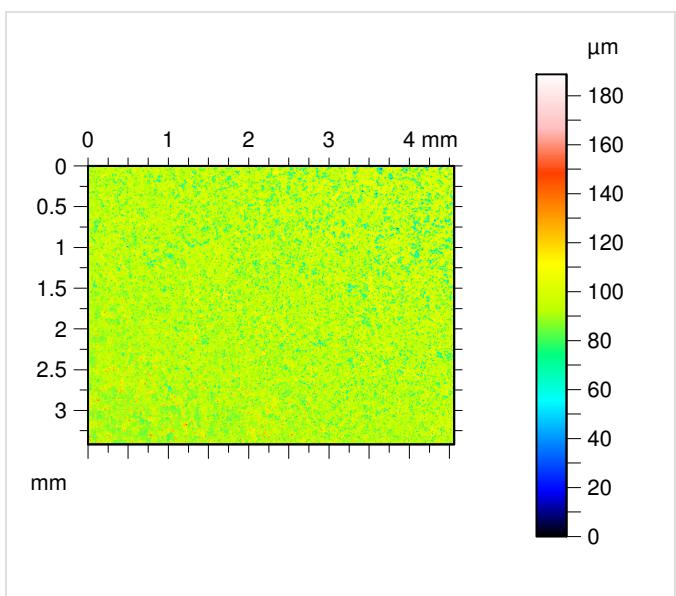
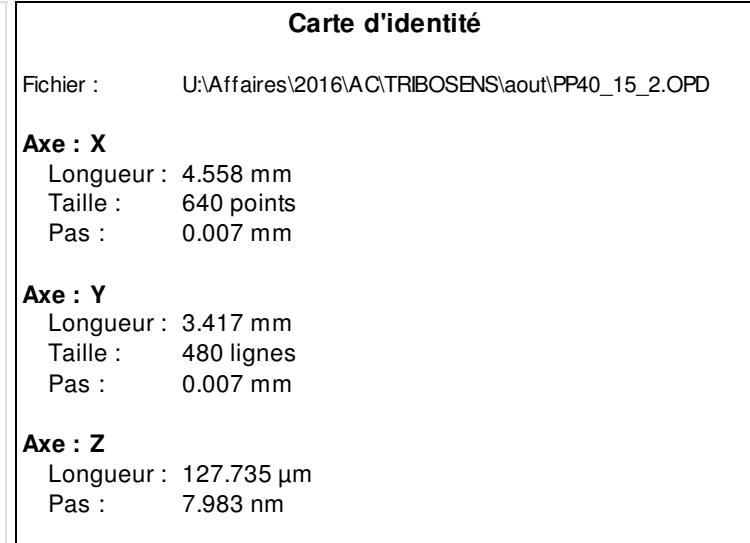
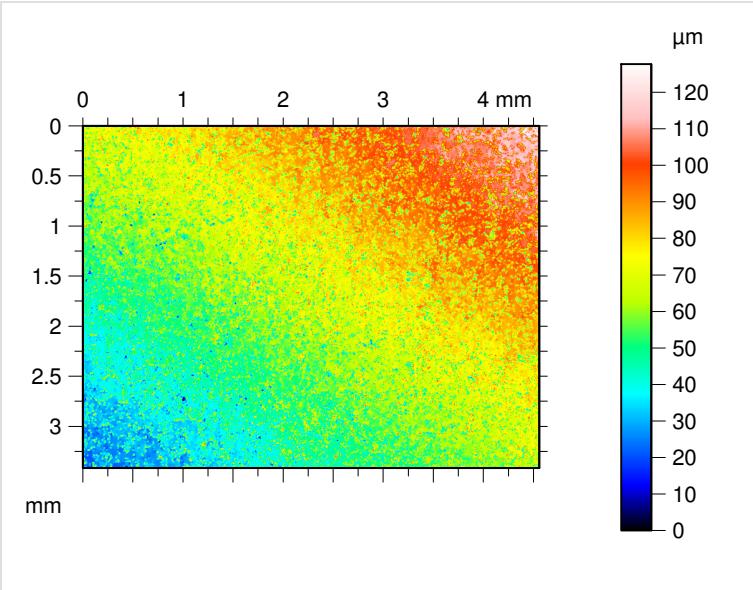
		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
<b>R<sub>a</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.615	0.228	0.229	1.296
<b>R<sub>p</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	2.095	1.248	0.700	8.175
<b>R<sub>v</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	3.036	1.962	0.657	12.227
<b>R<sub>z</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	5.132	1.956	1.611	14.327
<b>R<sub>c</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	2.271	0.914	0.849	6.654
<b>R<sub>t</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	8.216	3.672	2.174	35.075
<b>R<sub>q</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.891	0.343	0.333	2.434
<b>R<sub>sk</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	-0.476	1.601	-3.144	2.772
<b>R<sub>k<sub>u</sub></sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	7.694	2.509	2.568	16.685
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
<b>R<sub>mr</sub></b>	%	<i>c = 1 µm sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	10.138	14.024	0.195	71.278
<b>R<sub>dc</sub></b>	µm	<i>p = 20%, q = 80%, Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	1.032	0.365	0.450	1.969

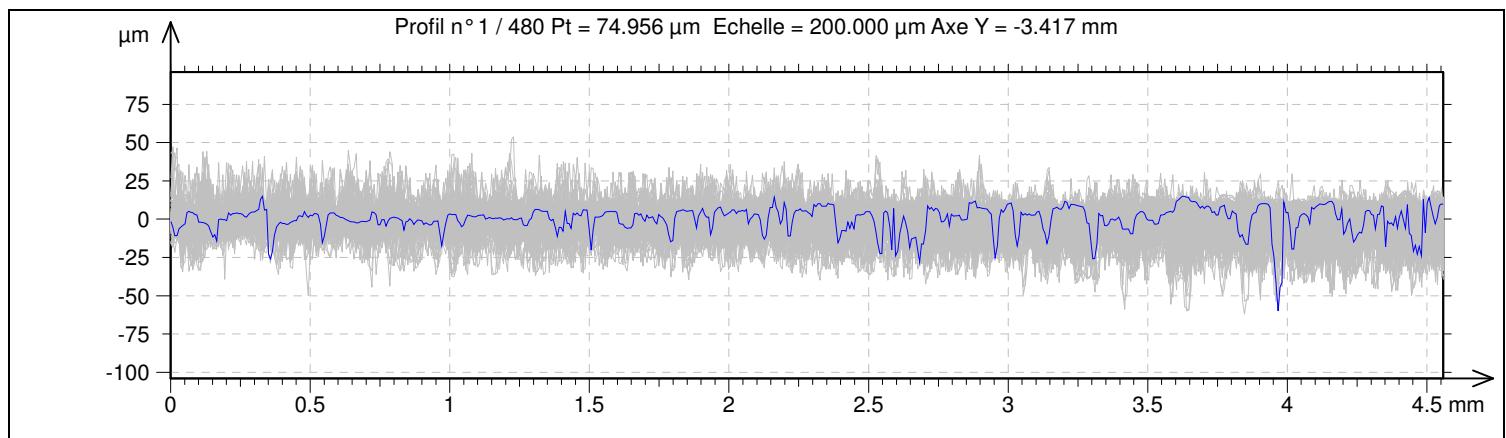
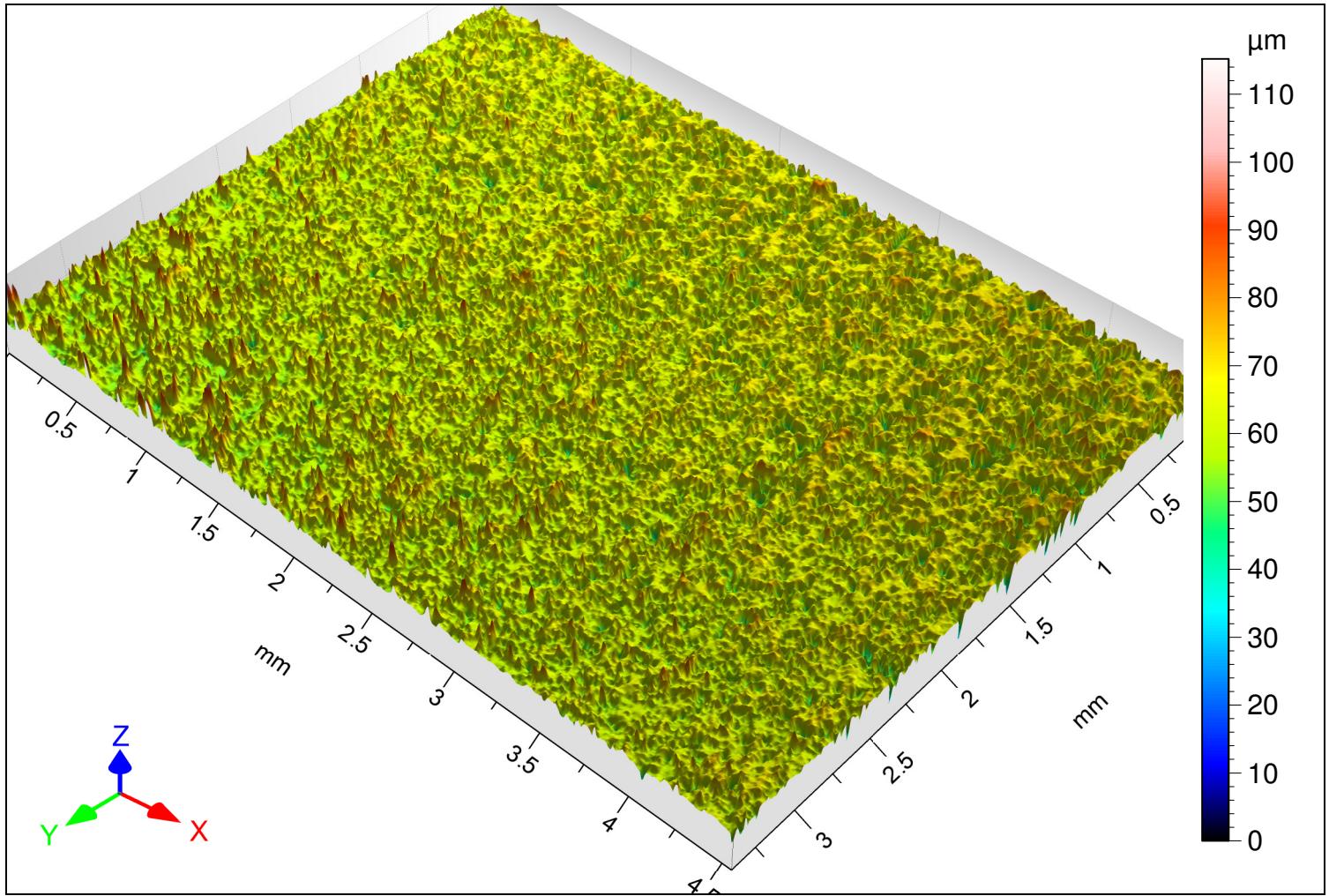


## ISO 4287

		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
<b>R<sub>a</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.529	0.115	0.254	1.042
<b>R<sub>p</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.565	0.472	0.653	6.140
<b>R<sub>v</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	2.823	1.189	0.868	10.992
<b>R<sub>z</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	4.388	1.371	1.631	12.813
<b>R<sub>c</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.970	0.576	0.903	6.827
<b>R<sub>t</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	7.706	3.355	2.722	32.851
<b>R<sub>q</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.752	0.197	0.324	1.829
<b>R<sub>sk</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	-0.841	0.688	-3.434	2.267
<b>R<sub>ku</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	6.960	2.854	2.660	23.595
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
<b>R<sub>mr</sub></b>	%	$c = 1 \mu\text{m}$ sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	6.765	9.630	0.276	76.826
<b>R<sub>dc</sub></b>	µm	$p = 20\%$ , $q = 80\%$ , Filtre gaussien, 0.8 mm	0.956	0.183	0.537	1.672

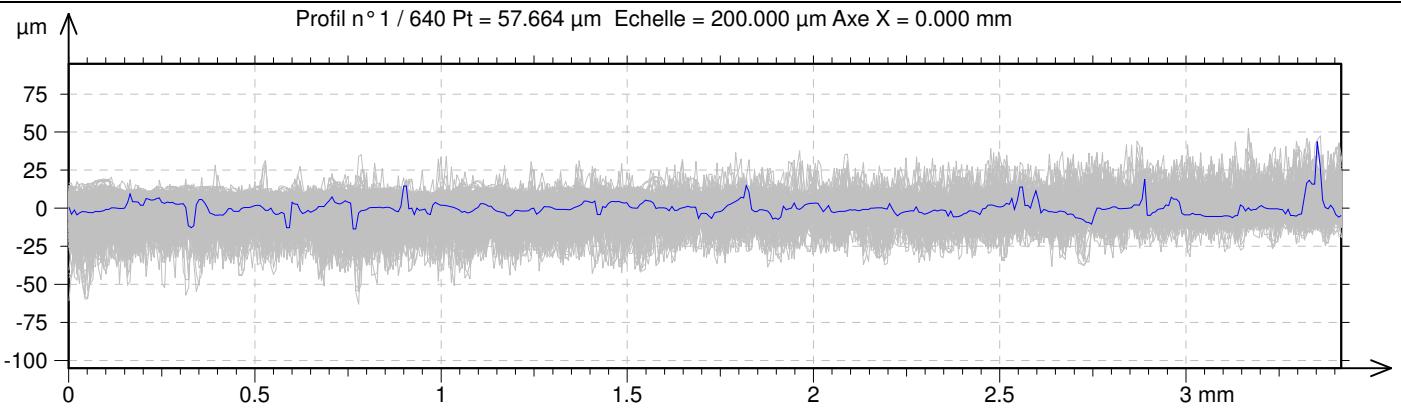






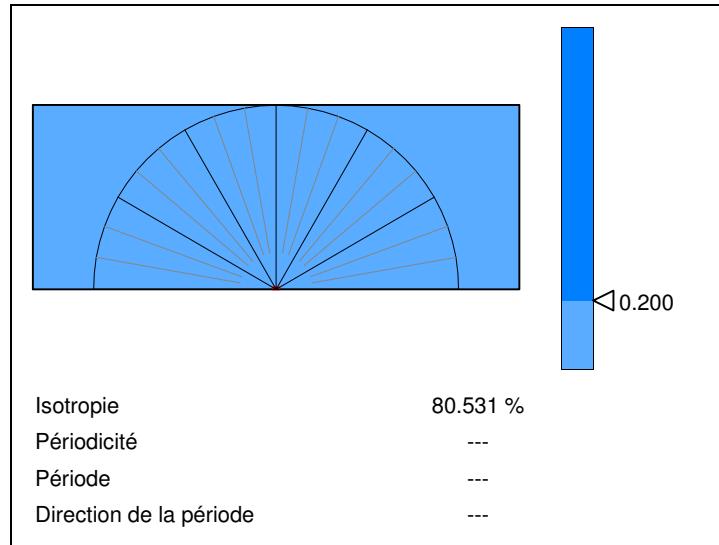
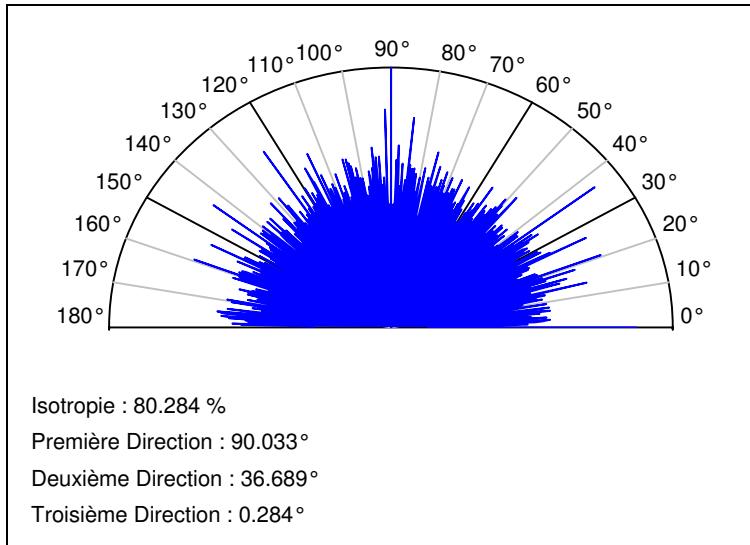
## ISO 4287

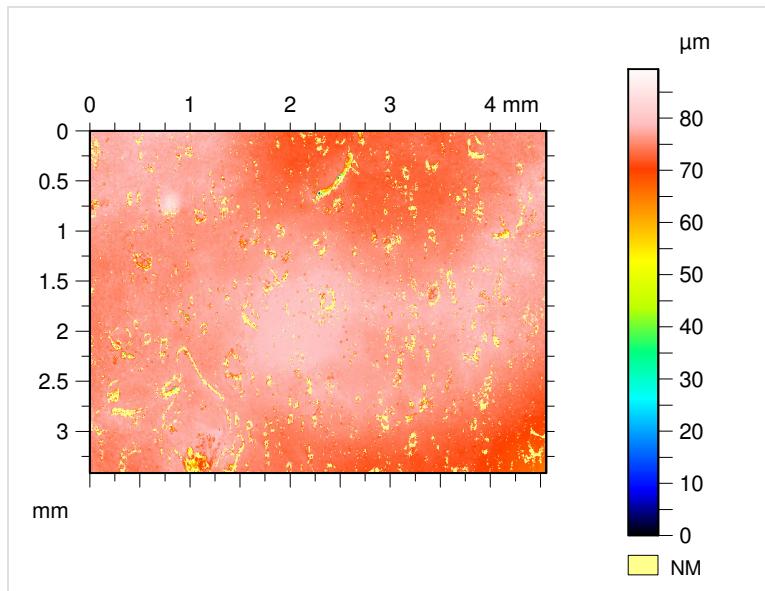
		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
<b>R<sub>a</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	4.021	0.529	2.955	6.515
<b>R<sub>p</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	13.766	4.286	8.066	32.262
<b>R<sub>v</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	17.303	5.012	6.826	32.375
<b>R<sub>z</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	31.069	4.170	20.072	44.124
<b>R<sub>c</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	14.659	2.422	9.872	24.567
<b>R<sub>t</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	45.647	7.389	26.401	86.245
<b>R<sub>q</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	5.427	0.716	3.821	8.635
<b>R<sub>sk</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	-0.365	0.854	-2.347	2.094
<b>R<sub>k<sub>u</sub></sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	5.375	1.322	2.654	11.333
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
<b>R<sub>mr</sub></b>	%	$c = 1 \mu\text{m}$ sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	0.383	0.336	0.189	2.462
<b>R<sub>dc</sub></b>	μm	$p = 20\%$ , $q = 80\%$ , Filtre gaussien, 0.8 mm	7.691	1.053	5.371	11.474



## ISO 4287

		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
<b>R<sub>a</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	3.988	0.770	2.318	6.872
<b>R<sub>p</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	11.888	2.561	6.923	23.940
<b>R<sub>v</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	18.190	5.036	7.824	34.154
<b>R<sub>z</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	30.077	5.048	18.383	44.481
<b>R<sub>c</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	13.757	2.495	8.486	22.743
<b>R<sub>t</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	41.462	7.388	23.567	70.166
<b>R<sub>q</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	5.373	1.010	3.023	8.806
<b>R<sub>sk</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	-0.668	0.631	-2.028	1.422
<b>R<sub>ku</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	5.360	1.555	2.705	12.520
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
<b>R<sub>mrr</sub></b>	%	$c = 1 \mu\text{m}$ sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	0.523	0.416	0.272	3.028
<b>R<sub>dc</sub></b>	µm	$p = 20\%$ , $q = 80\%$ , Filtre gaussien, 0.8 mm	7.455	1.301	4.511	13.368





Carte d'identité

Fichier : U:\Affaires\2016\AC\TRIBOSENS\août\PP40\_500\_1.OPD

Axe : X

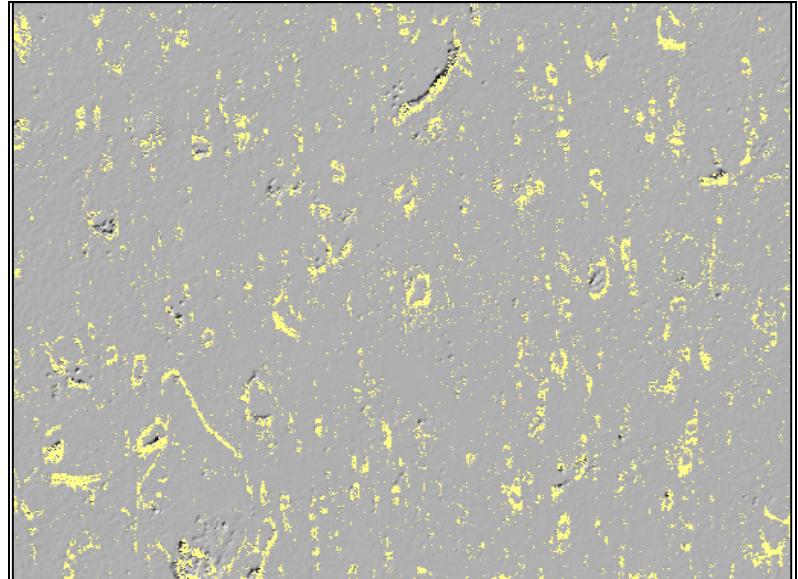
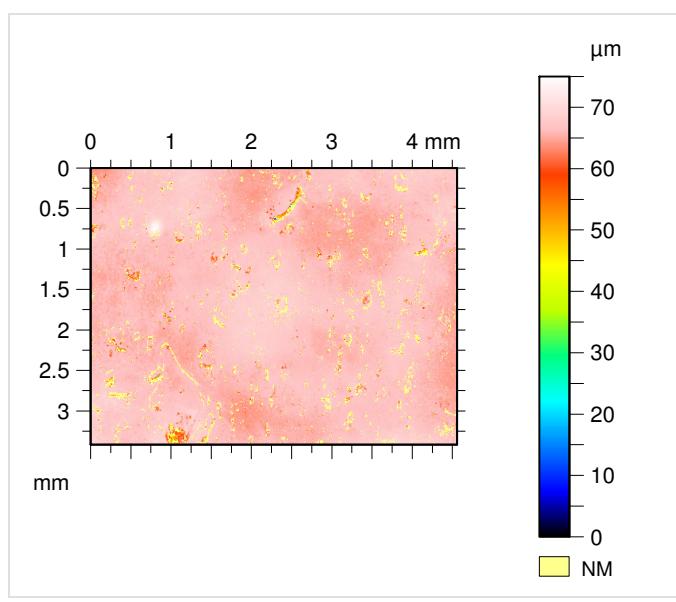
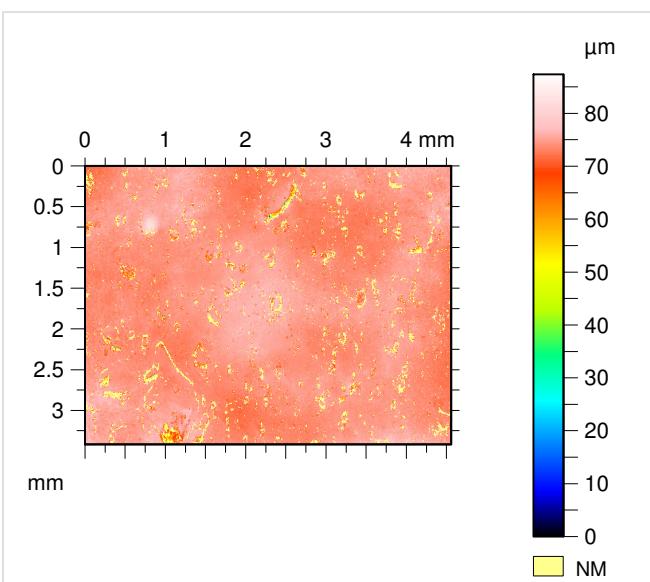
Longueur : 4.558 mm  
Taille : 640 points  
Pas : 0.007 mm

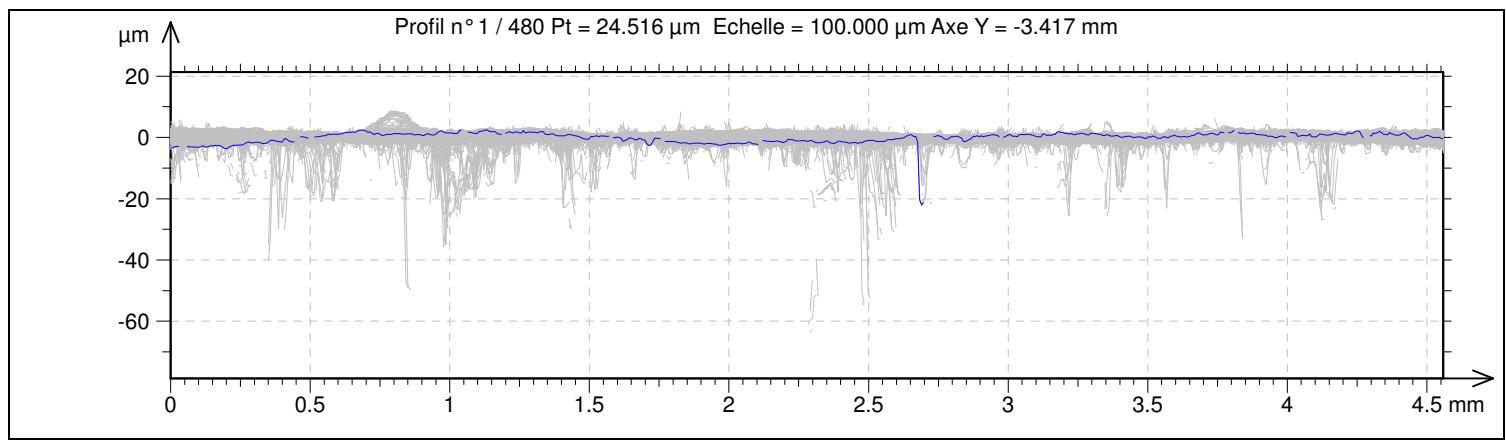
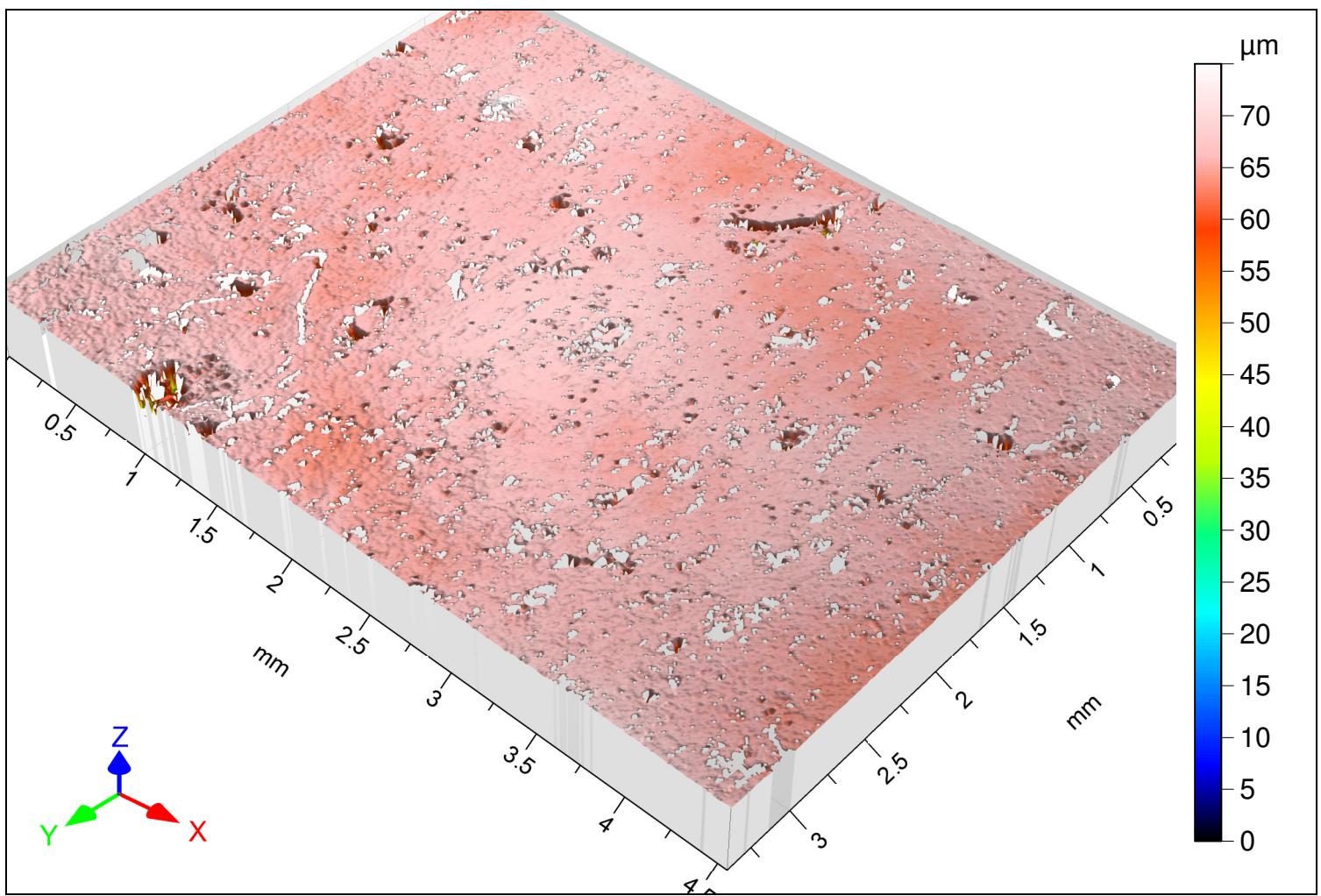
## Axe : Y

Longueur : 3.417 mm  
Taille : 480 lignes  
Pas : 0.007 mm

Axe : Z

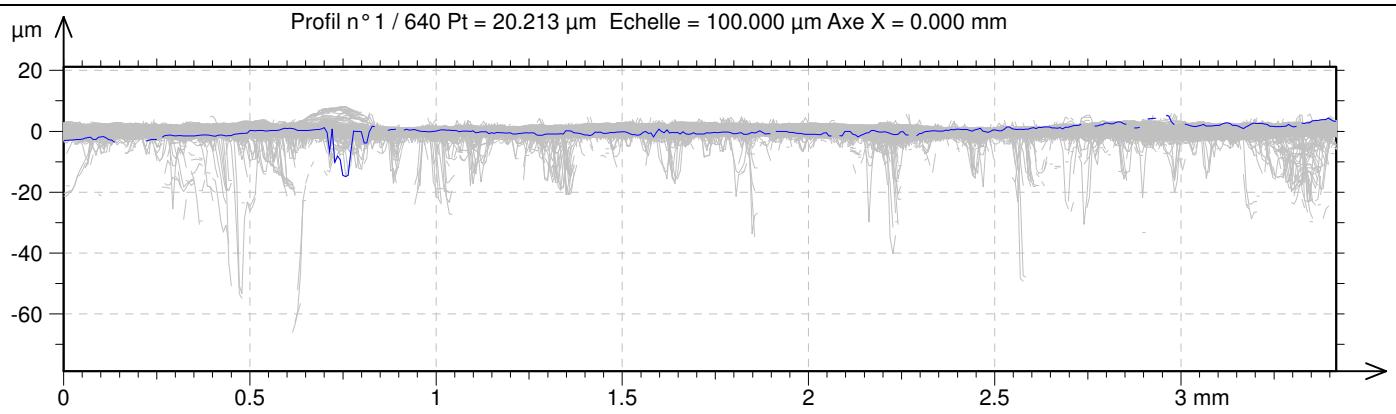
Longueur : 89.413 µm  
Pas : 5.588 nm





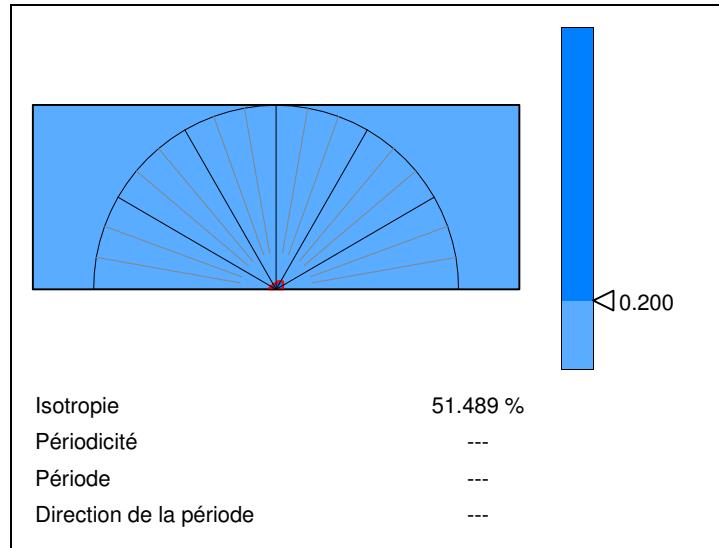
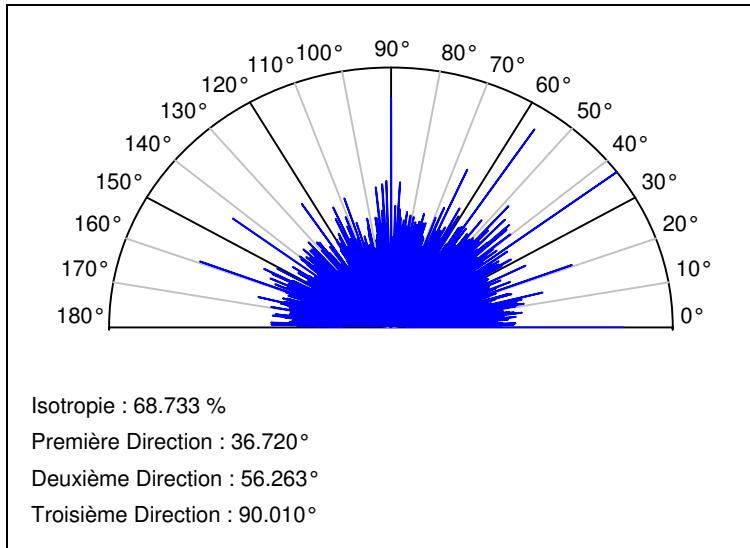
## ISO 4287

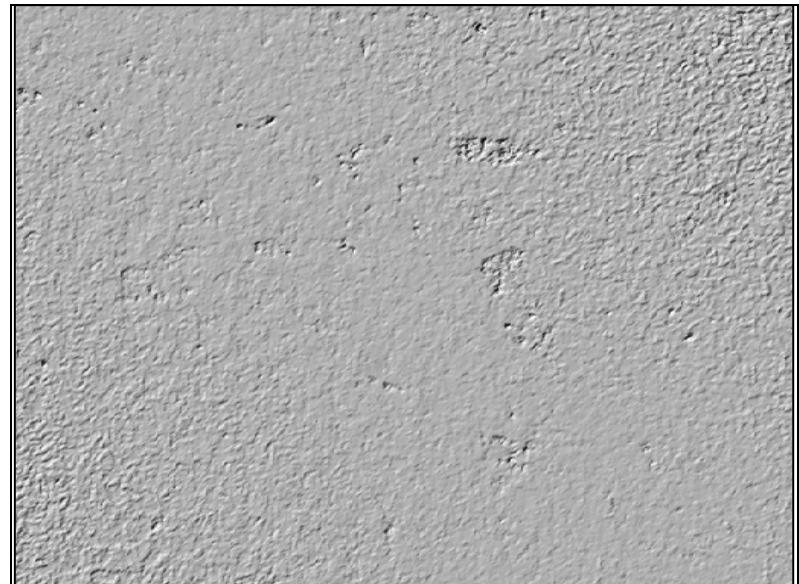
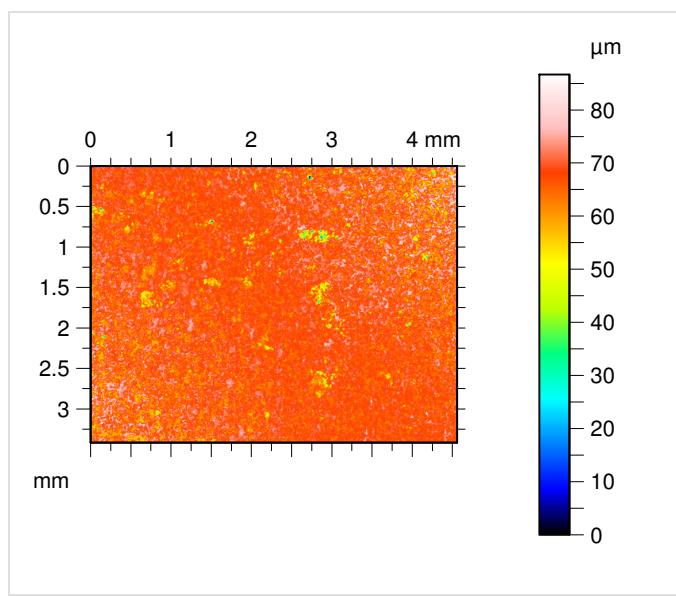
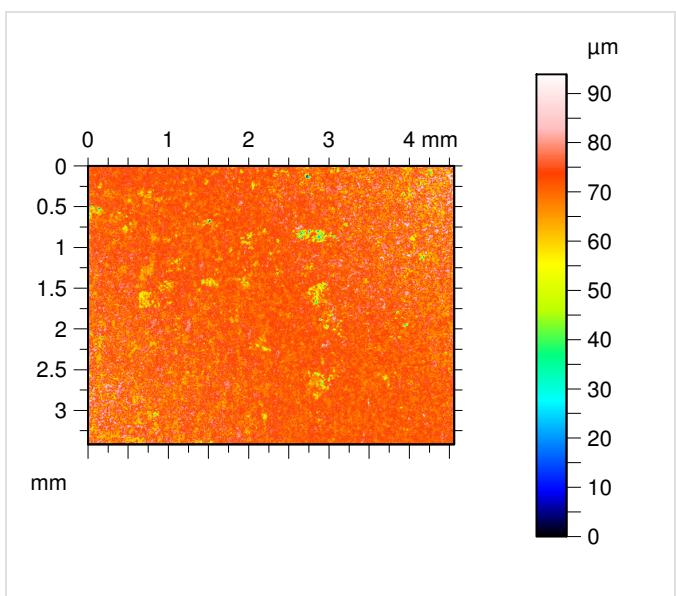
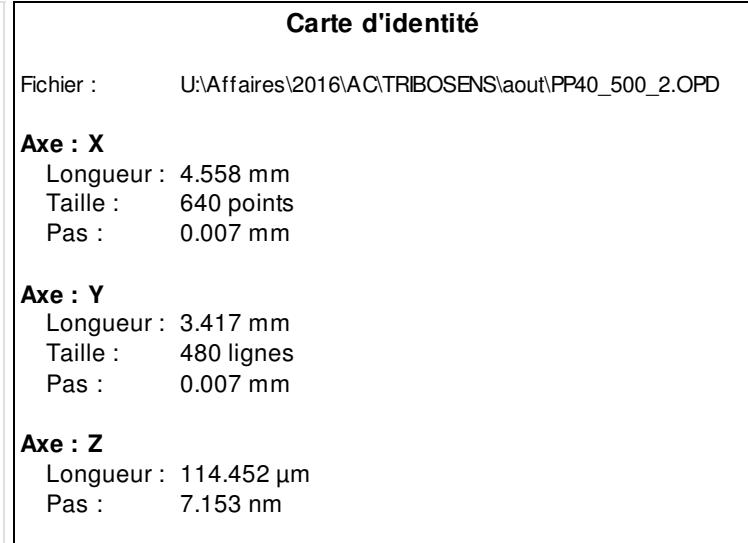
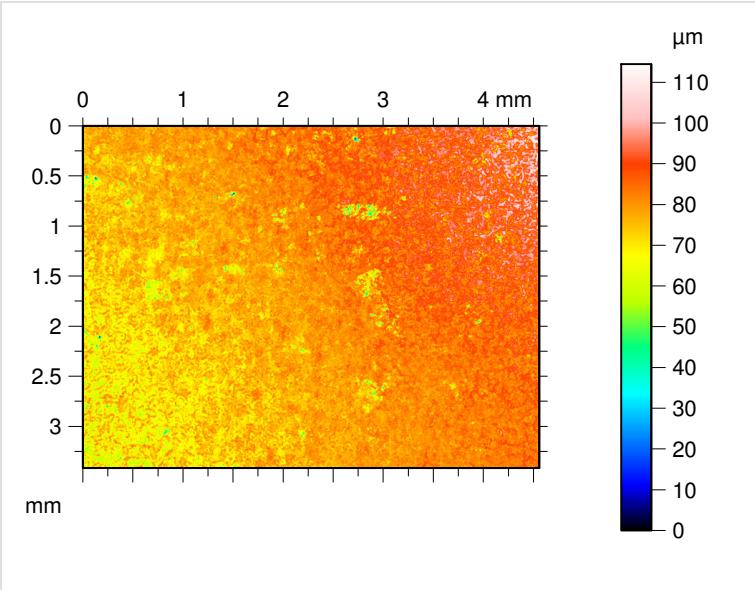
		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
R <sub>a</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.487	0.225	0.199	1.766
R <sub>p</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.449	0.627	0.585	4.587
R <sub>v</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	4.157	2.448	0.694	15.728
R <sub>z</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	5.606	2.869	1.512	18.305
R <sub>c</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	2.320	1.501	0.713	12.973
R <sub>t</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	13.694	9.644	2.766	64.417
R <sub>q</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.829	0.433	0.260	3.326
R <sub>sk</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	-1.753	0.941	-4.588	1.355
R <sub>k</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	12.416	5.813	3.443	35.086
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
R <sub>mr</sub>	%	c = 1 µm sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	8.089	14.226	0.195	82.336
R <sub>dc</sub>	µm	p = 20%, q = 80%, Filtre gaussien, 0.8 mm	0.668	0.137	0.410	1.263

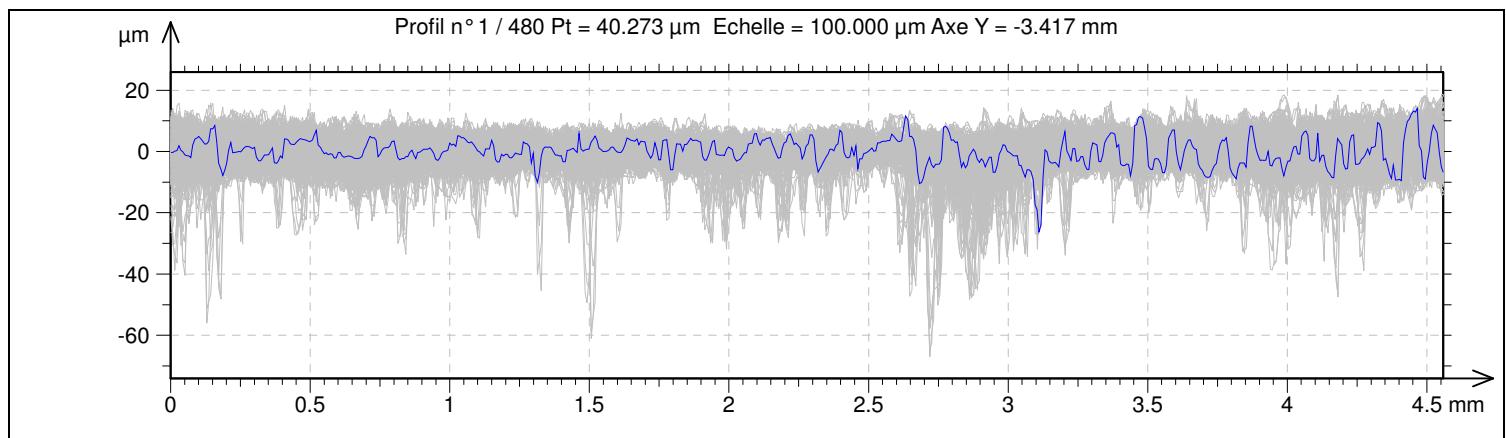
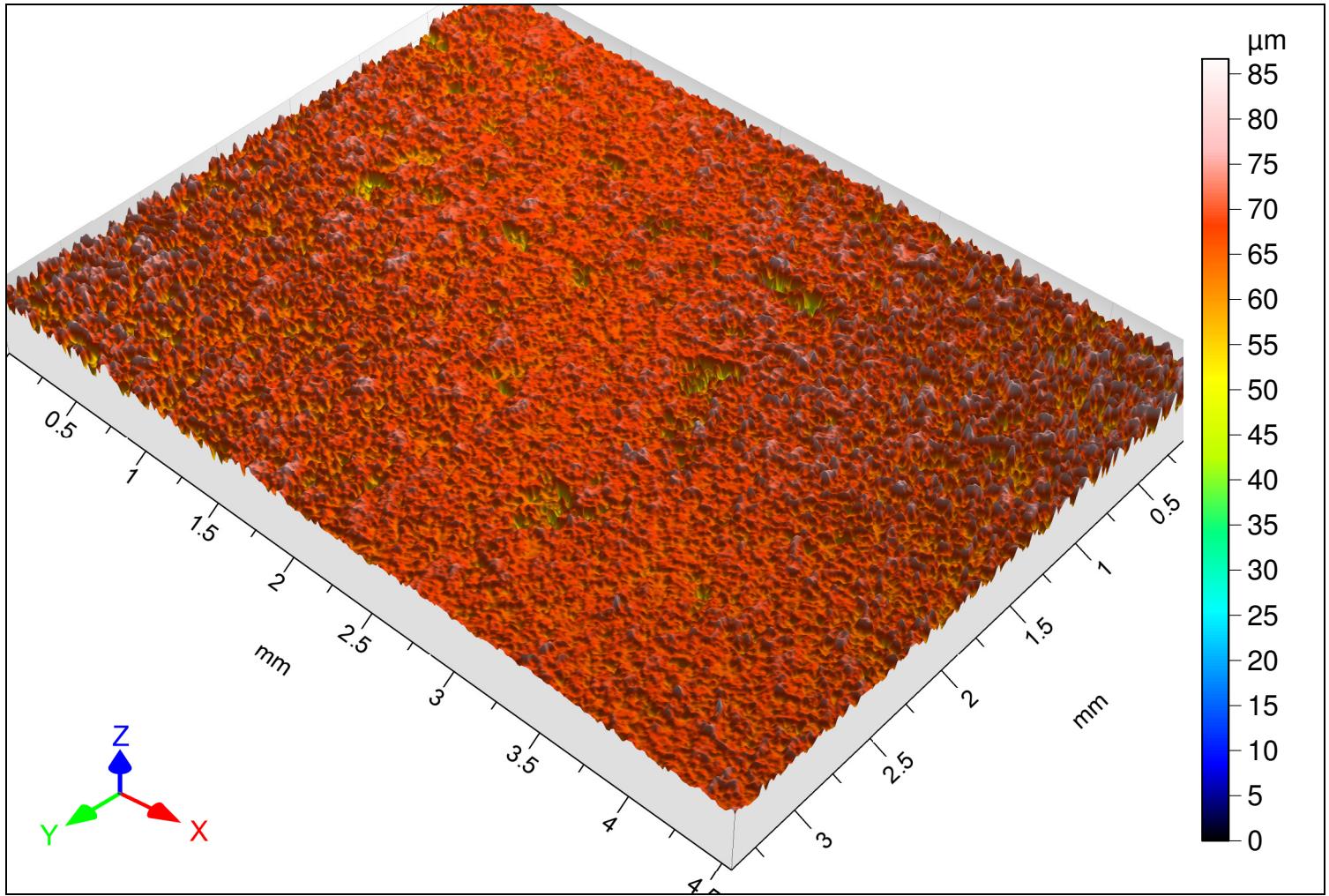


## ISO 4287

		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
<b>R<sub>a</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.445	0.218	0.178	1.905
<b>R<sub>p</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.302	0.539	0.440	4.295
<b>R<sub>v</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	3.540	3.028	0.459	21.793
<b>R<sub>z</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	4.842	3.421	1.051	24.563
<b>R<sub>c</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	2.418	2.529	0.419	27.970
<b>R<sub>t</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	9.816	8.933	1.207	63.757
<b>R<sub>q</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.742	0.481	0.221	4.197
<b>R<sub>sk</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	-1.305	1.015	-4.793	1.810
<b>R<sub>ku</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	10.029	5.780	2.379	39.079
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
<b>R<sub>mR</sub></b>	%	$c = 1 \mu\text{m}$ sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	17.458	23.298	0.272	98.319
<b>R<sub>dc</sub></b>	µm	$p = 20\%$ , $q = 80\%$ , Filtre gaussien, 0.8 mm	0.696	0.228	0.348	2.404

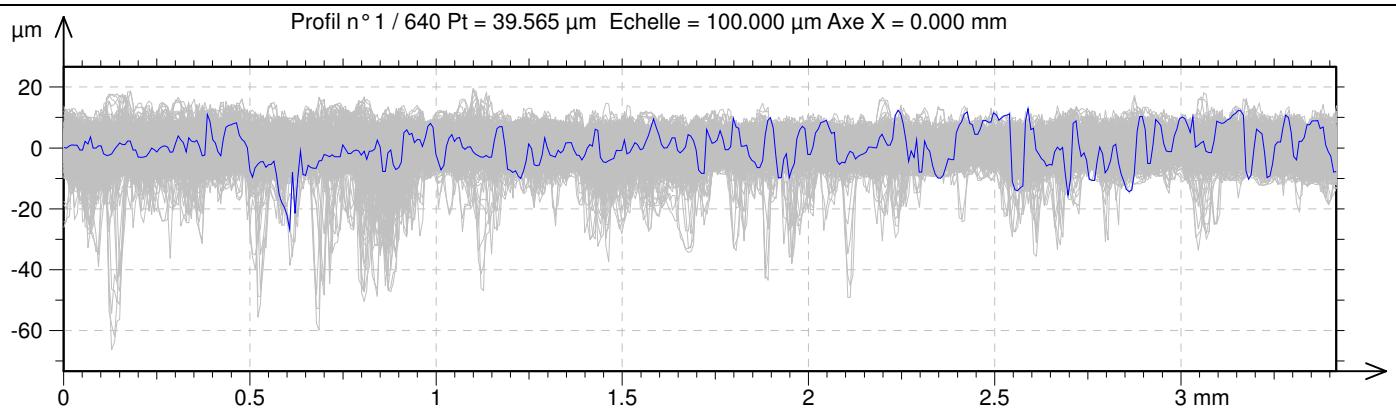






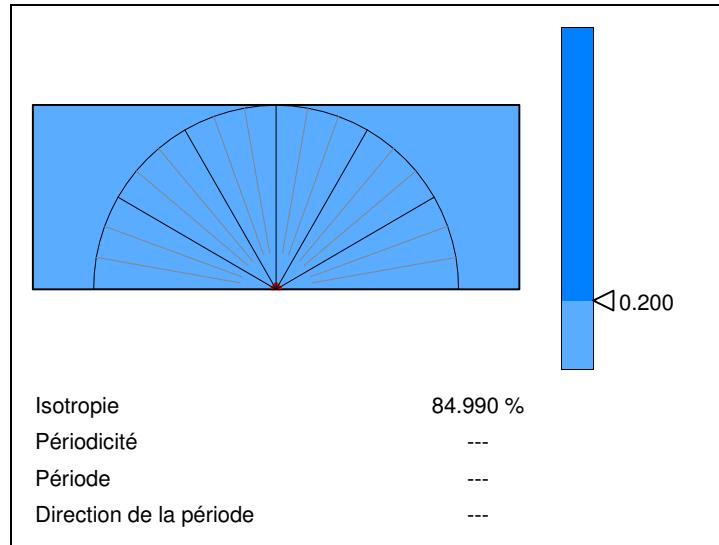
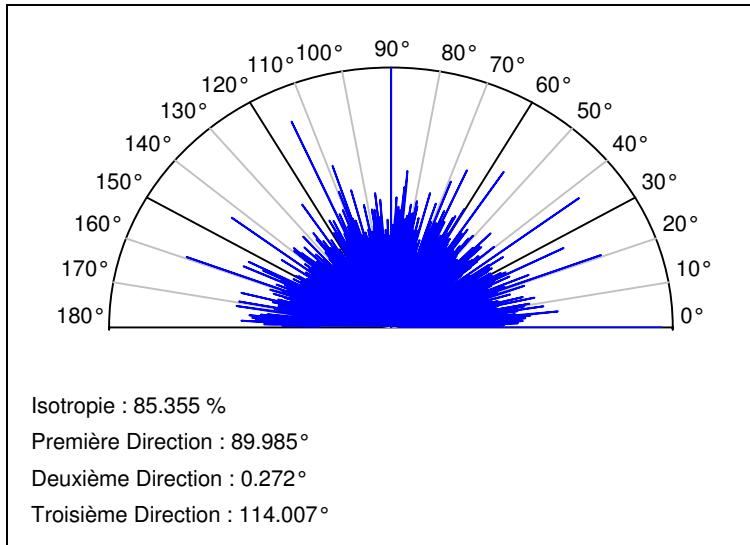
## ISO 4287

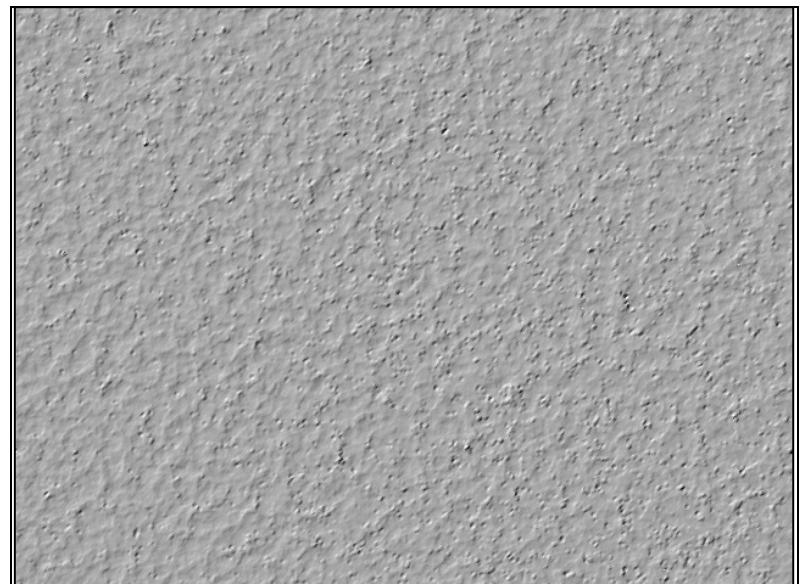
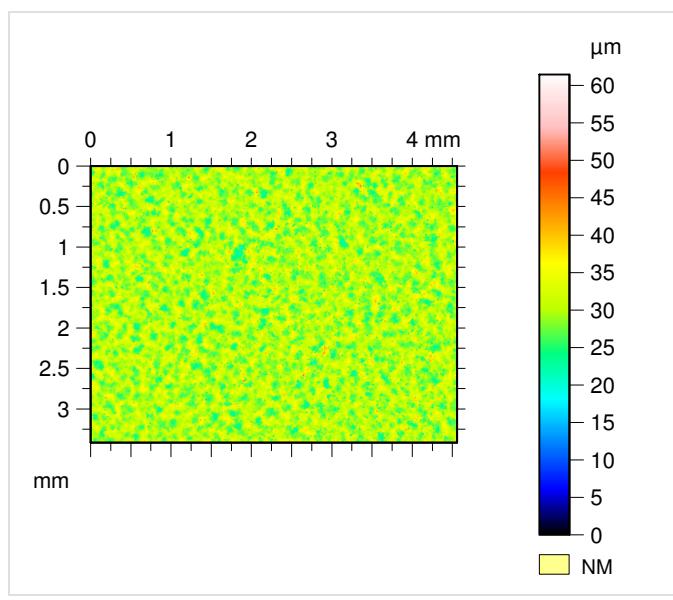
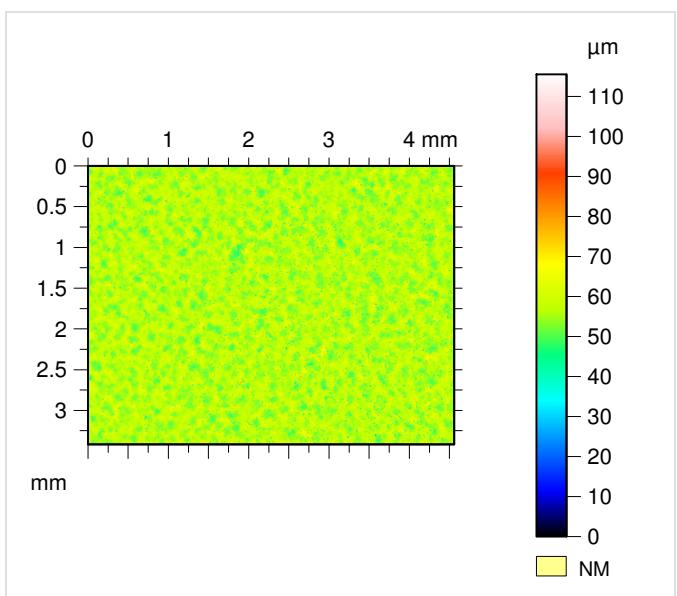
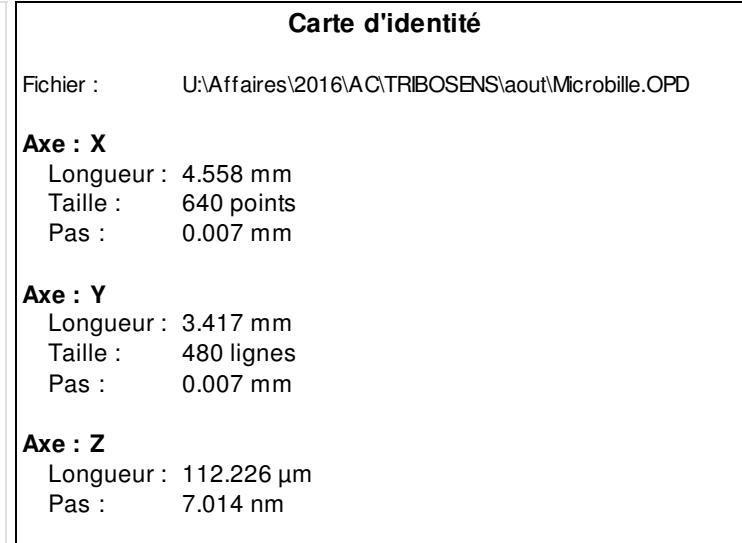
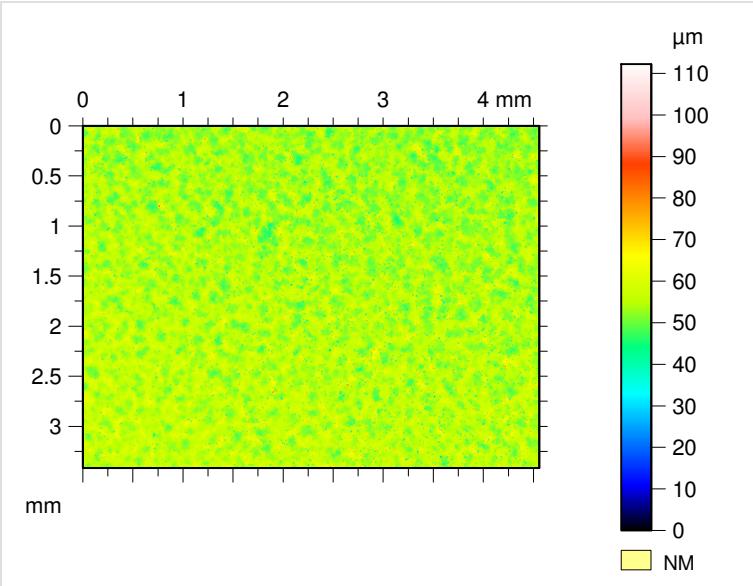
		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
R <sub>a</sub>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	2.409	0.340	1.823	4.058
R <sub>p</sub>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	6.692	0.945	4.478	10.626
R <sub>v</sub>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	9.375	3.291	4.902	23.879
R <sub>z</sub>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	16.068	3.773	9.880	34.506
R <sub>c</sub>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	7.721	1.527	5.040	14.528
R <sub>t</sub>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	26.351	9.091	12.690	71.454
R <sub>q</sub>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	3.139	0.551	2.319	5.738
R <sub>sk</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	-0.385	0.419	-2.268	0.707
R <sub>k</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	4.172	1.482	2.243	13.066
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
R <sub>mr</sub>	%	c = 1 μm sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	0.639	0.449	0.189	2.651
R <sub>dc</sub>	μm	p = 20%, q = 80%, Filtre gaussien, 0.8 mm	4.820	0.606	3.494	7.590

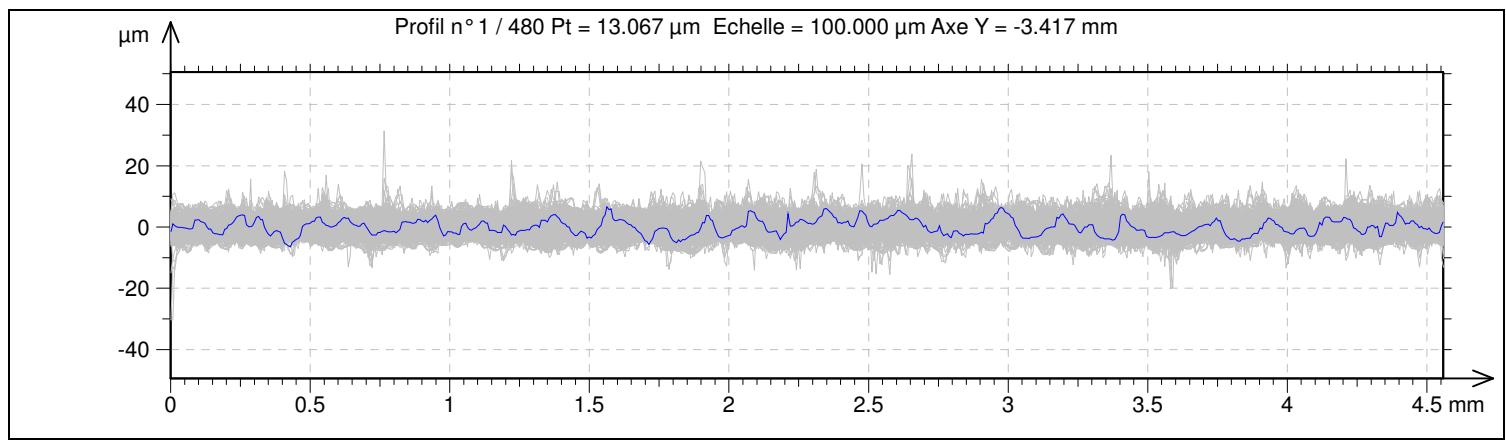
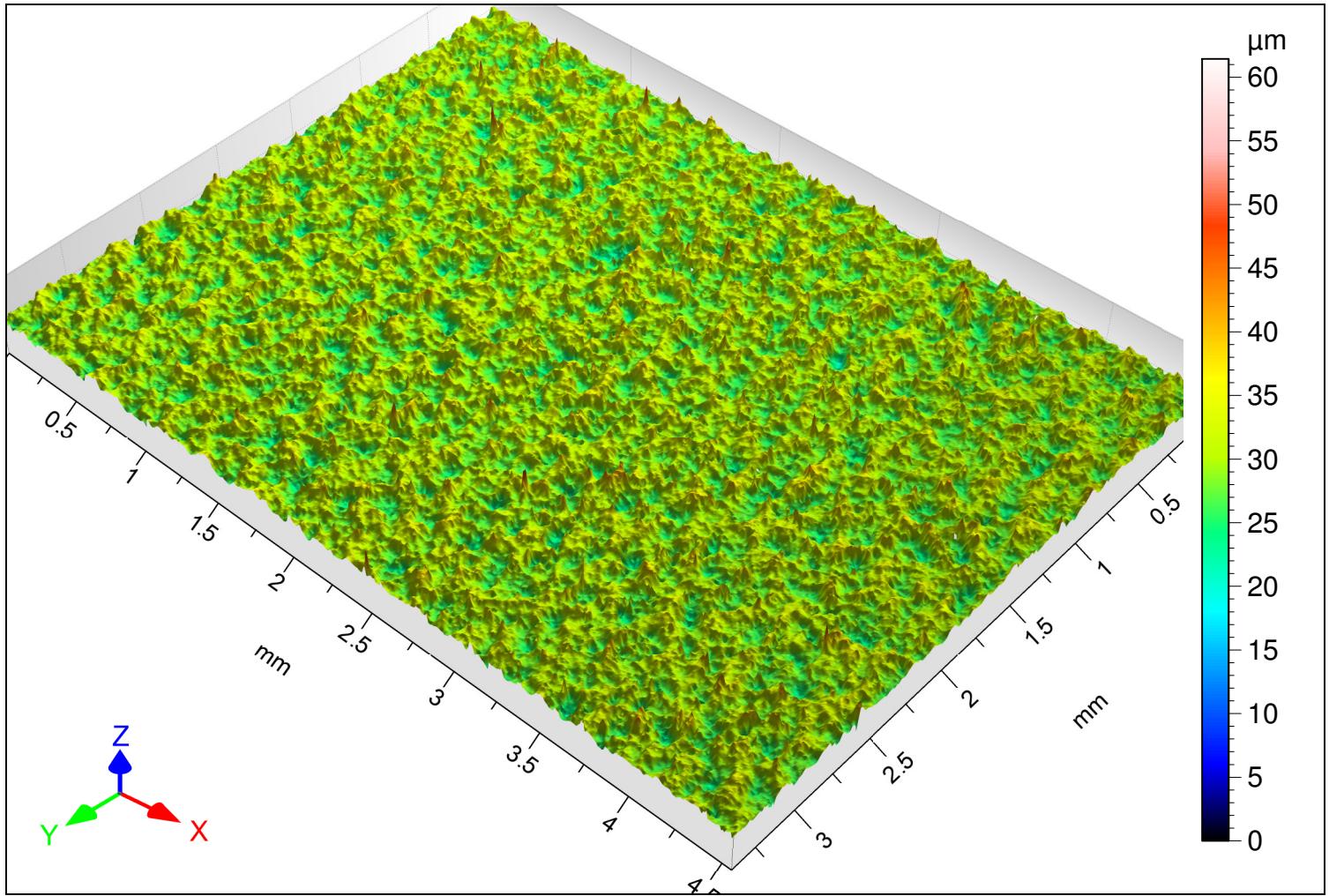


## ISO 4287

Contexte			Mean	Std dev	Min	Max
<b>Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité</b>						
<b>R<sub>a</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	2.556	0.636	1.335	4.682
<b>R<sub>p</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	6.903	1.685	3.419	11.655
<b>R<sub>v</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	9.591	4.231	3.715	26.724
<b>R<sub>z</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	16.494	5.029	7.790	36.329
<b>R<sub>c</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	7.771	2.036	3.783	20.058
<b>R<sub>t</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	23.374	9.020	8.577	58.013
<b>R<sub>q</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	3.300	0.888	1.658	6.785
<b>R<sub>sk</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	-0.385	0.596	-2.543	0.749
<b>R<sub>ku</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	4.019	1.851	2.062	14.079
<b>Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité</b>						
<b>R<sub>mrr</sub></b>	%	$c = 1 \mu\text{m}$ sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	0.991	0.692	0.272	3.856
<b>R<sub>dc</sub></b>	µm	$p = 20\%$ , $q = 80\%$ , Filtre gaussien, 0.8 mm	5.034	1.204	2.511	9.612

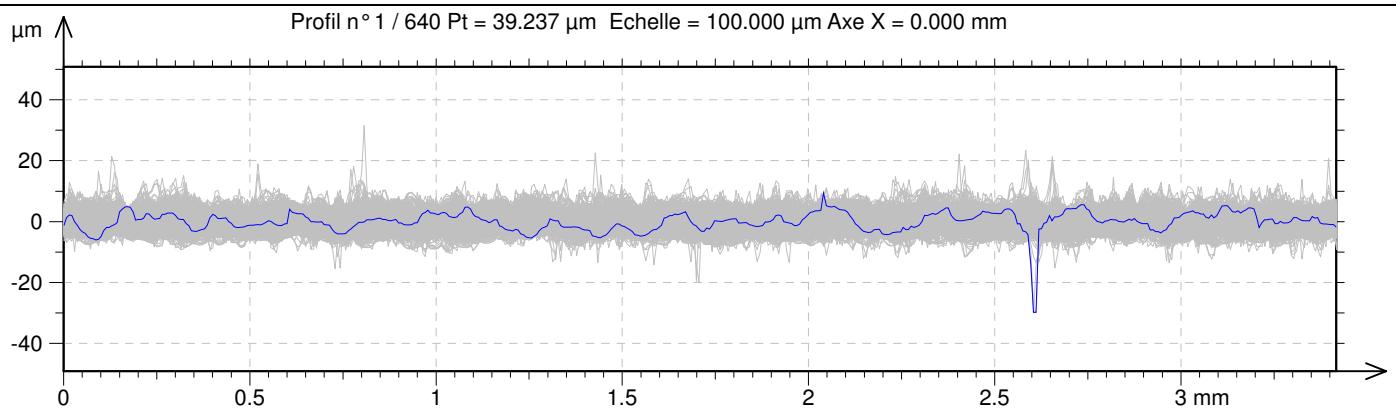






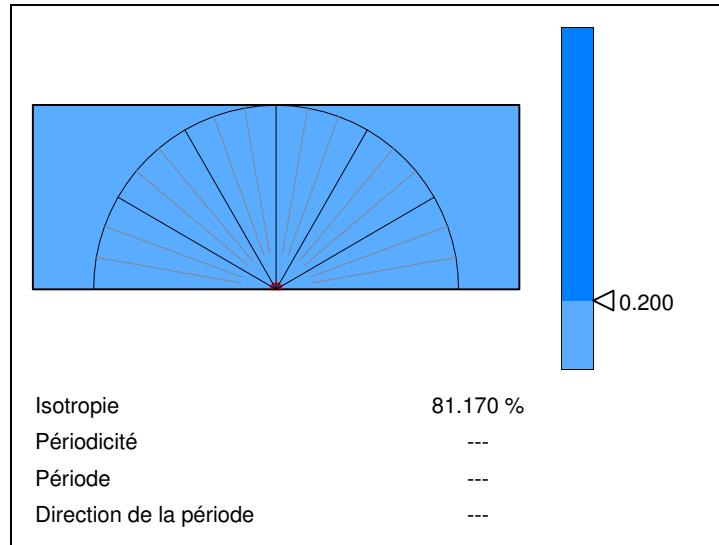
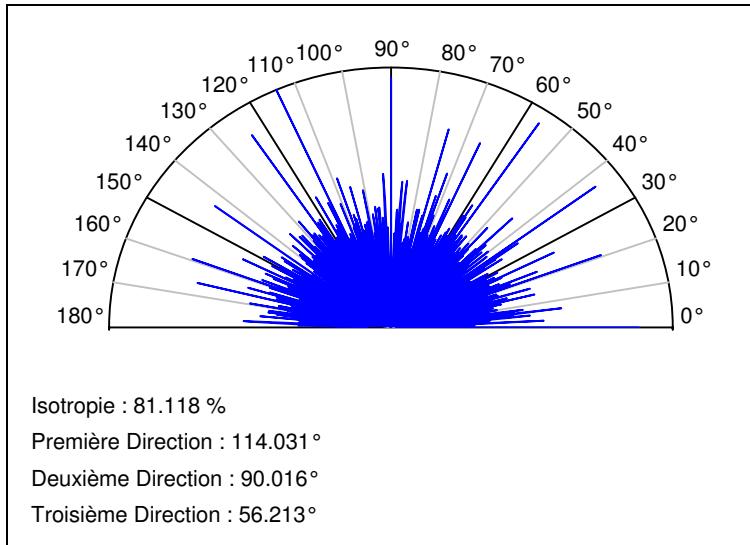
## ISO 4287

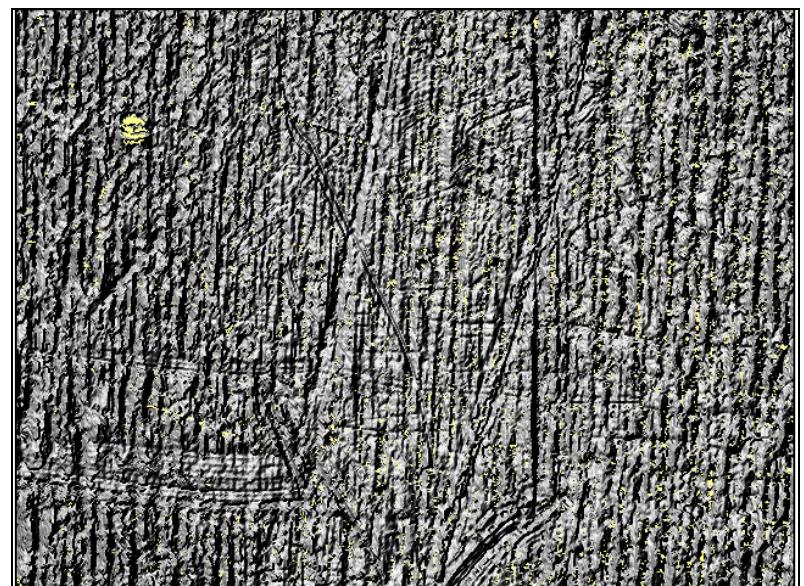
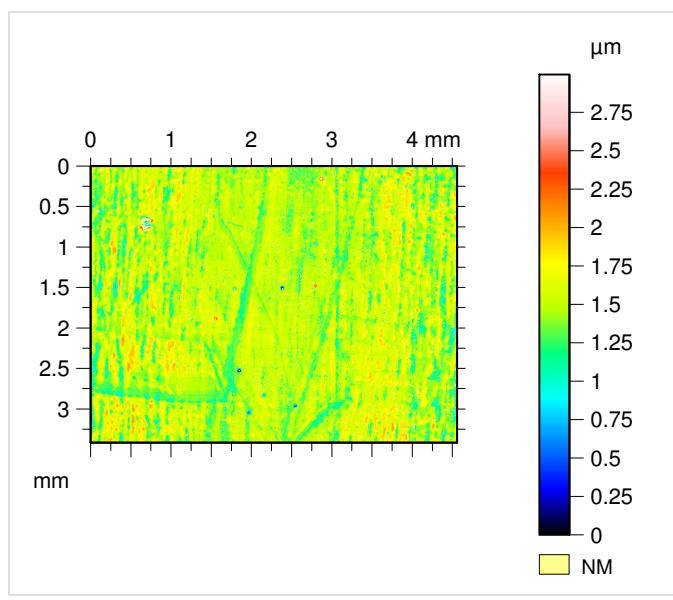
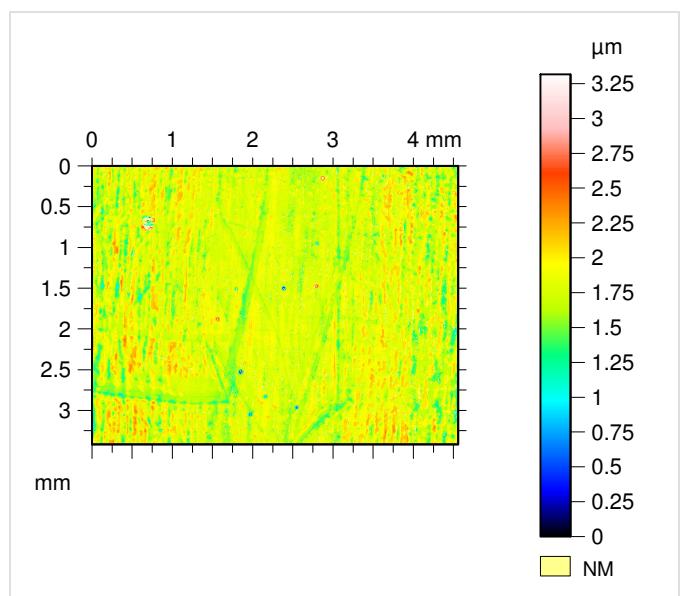
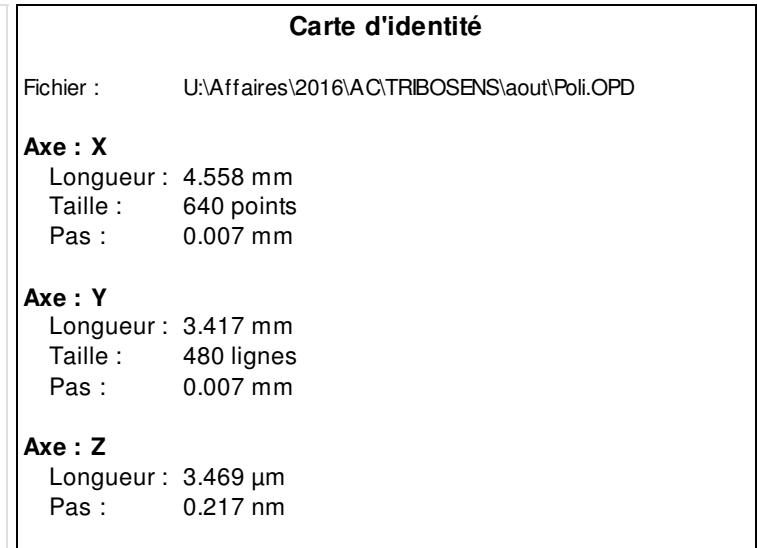
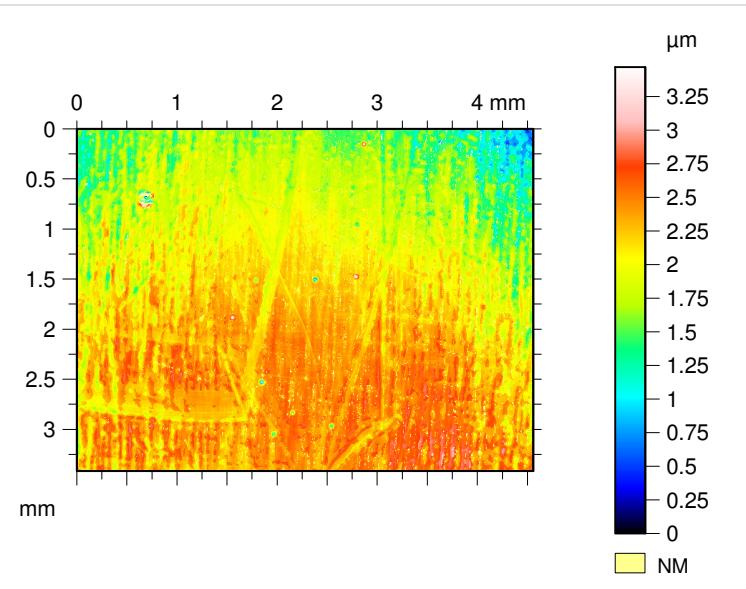
		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
R <sub>a</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.948	0.189	1.517	2.697
R <sub>p</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	6.171	1.061	4.221	12.258
R <sub>v</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	5.306	0.733	3.653	7.689
R <sub>z</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	11.477	1.359	8.112	17.747
R <sub>c</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	6.309	0.695	4.771	8.993
R <sub>t</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	15.626	2.920	10.128	33.345
R <sub>q</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	2.439	0.230	1.885	3.278
R <sub>sk</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	0.164	0.262	-0.486	1.188
R <sub>k</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	3.082	0.601	2.186	6.407
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
R <sub>mr</sub>	%	c = 1 µm sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	0.731	0.615	0.189	3.664
R <sub>dc</sub>	µm	p = 20%, q = 80%, Filtre gaussien, 0.8 mm	4.063	0.392	3.099	5.374

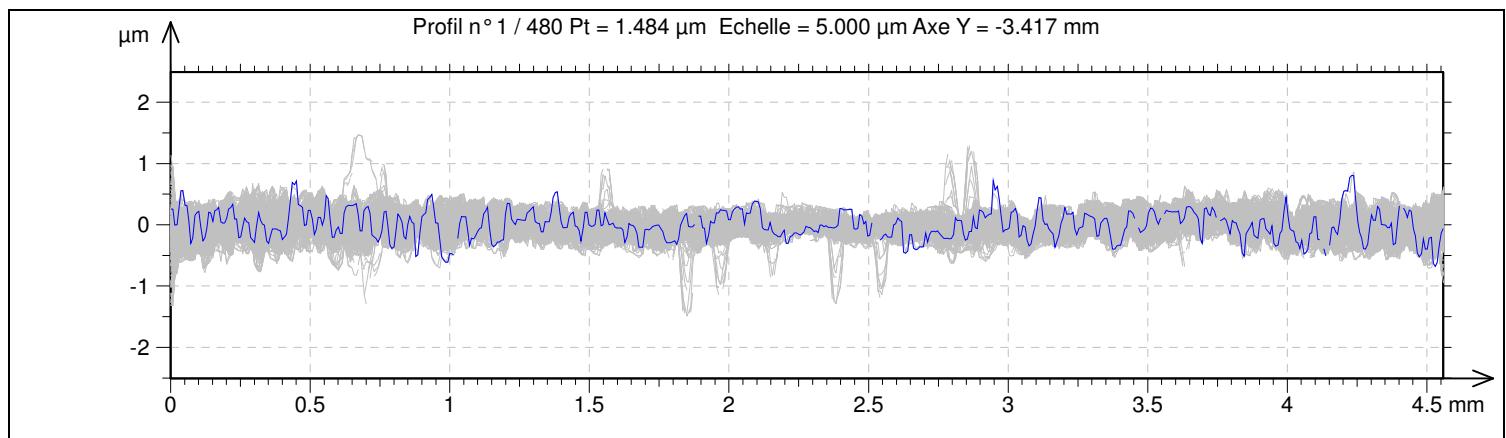
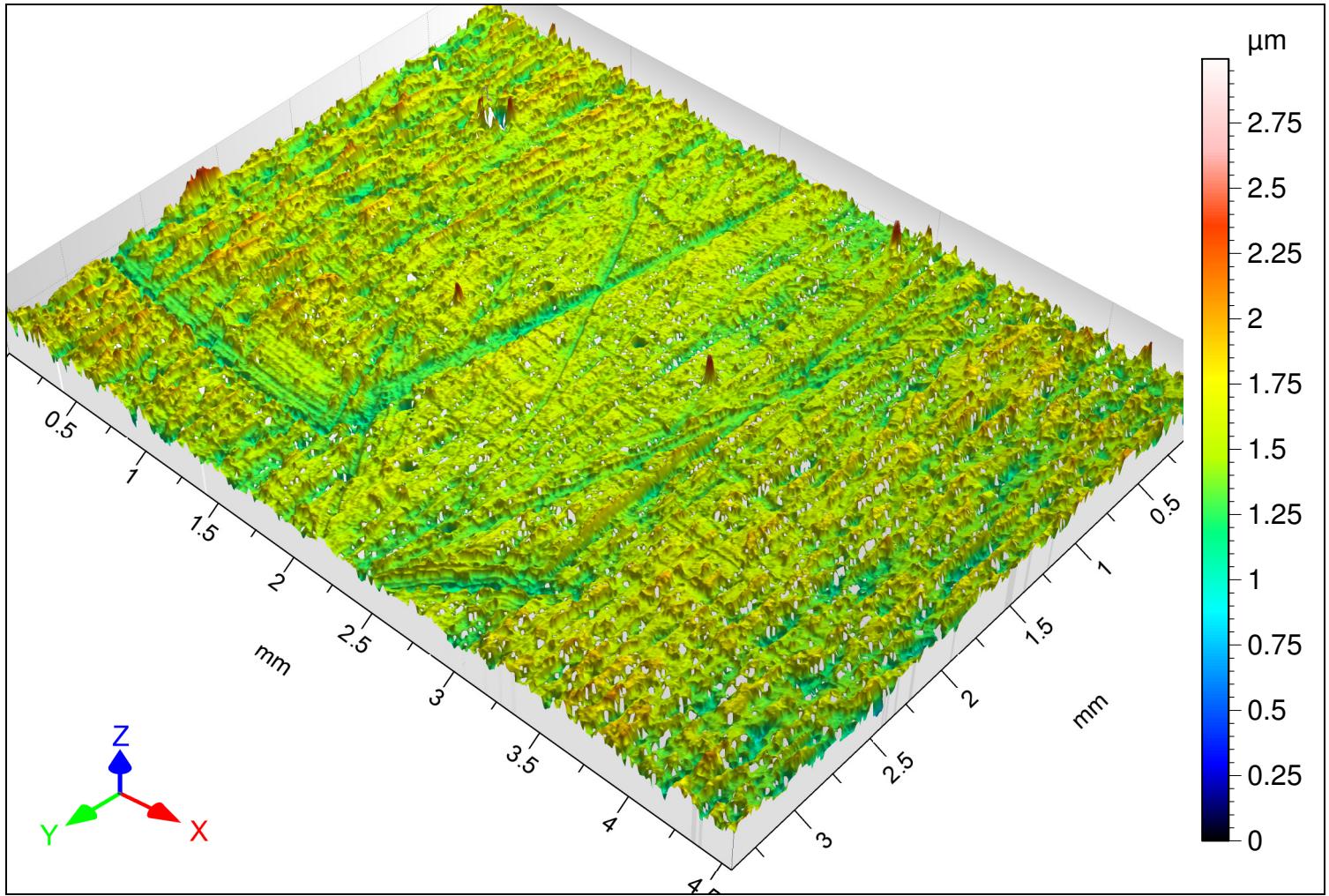


## ISO 4287

		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
R <sub>a</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.871	0.203	1.386	2.478
R <sub>p</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	5.879	0.997	3.676	10.563
R <sub>v</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	5.075	0.880	3.204	11.286
R <sub>z</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	10.954	1.400	7.984	16.717
R <sub>c</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	6.165	0.849	4.088	8.902
R <sub>t</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	13.961	2.742	8.901	34.215
R <sub>q</sub>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	2.336	0.240	1.777	3.023
R <sub>sk</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	0.172	0.287	-0.835	1.415
R <sub>ku</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	3.054	0.667	2.084	7.112
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
R <sub>mrr</sub>	%	$c = 1 \mu\text{m}$ sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	1.050	0.887	0.272	9.877
R <sub>dc</sub>	µm	$p = 20\%$ , $q = 80\%$ , Filtre gaussien, 0.8 mm	3.908	0.484	2.671	5.384

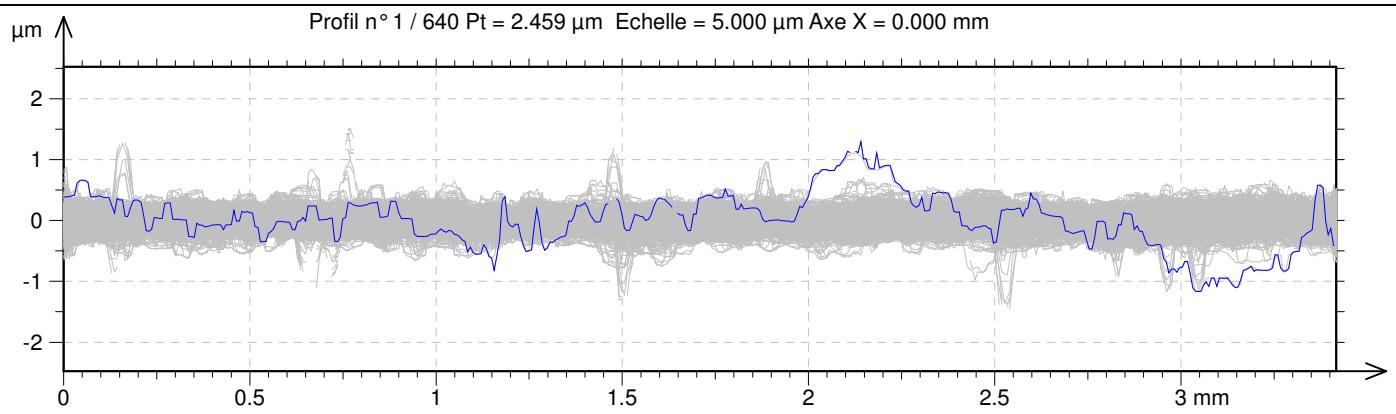






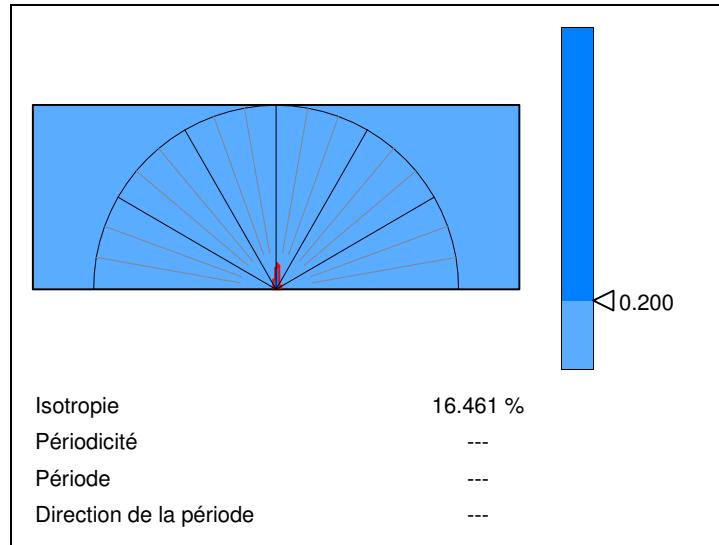
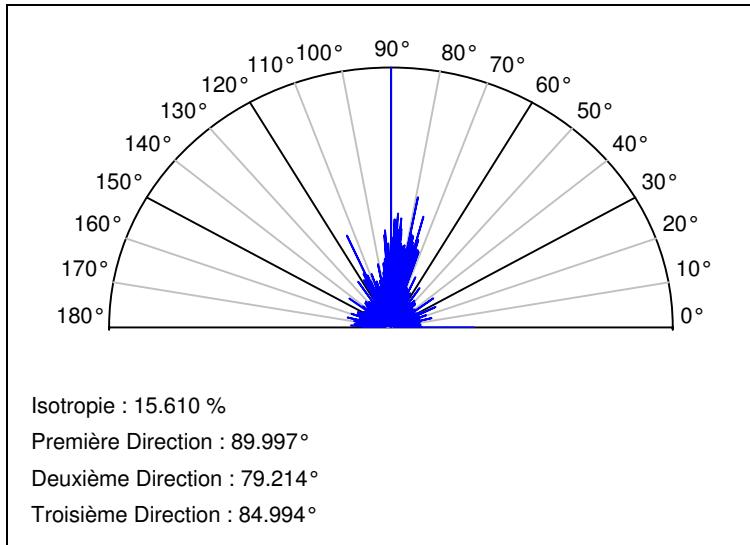
## ISO 4287

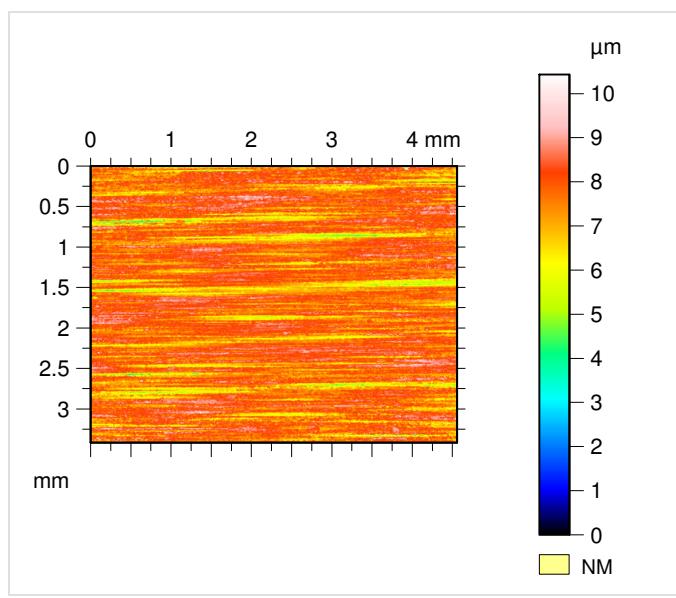
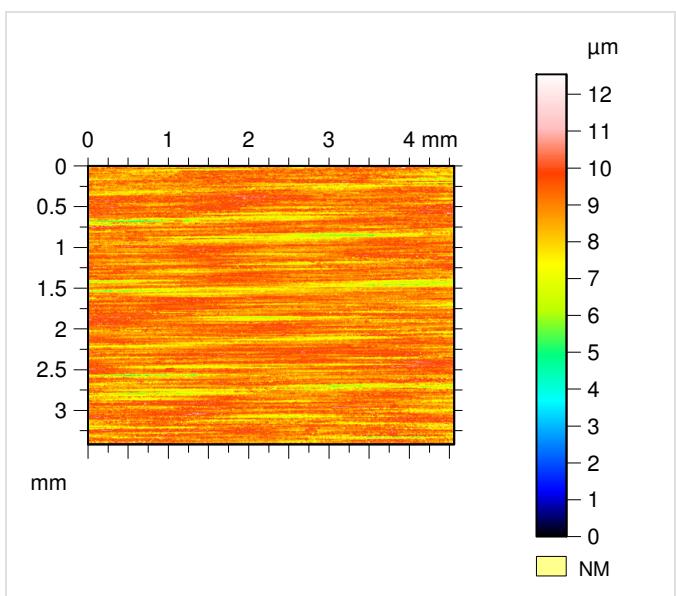
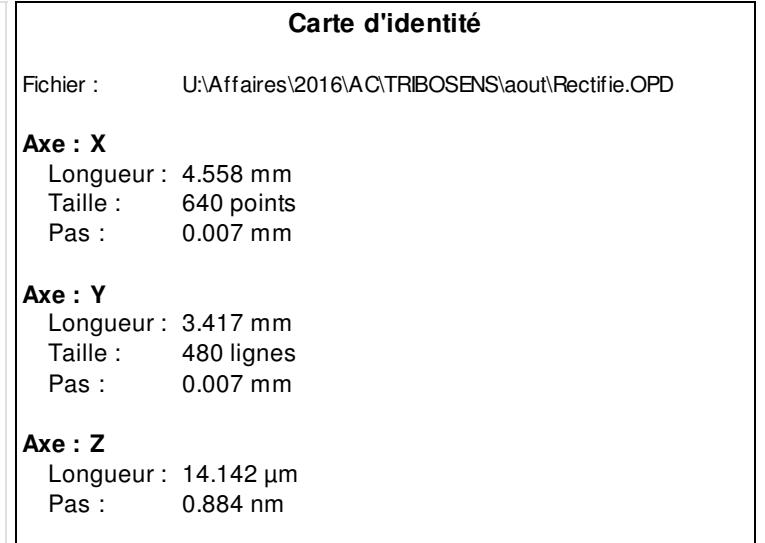
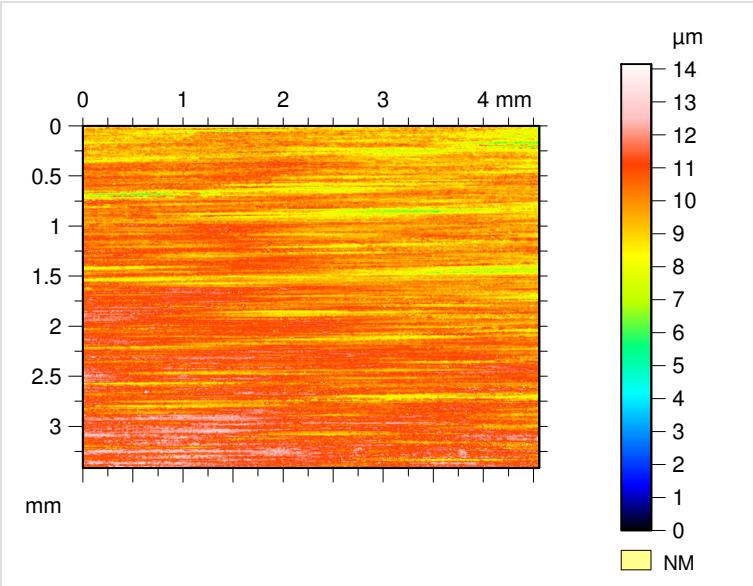
		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
<b>R<sub>a</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.093	0.013	0.068	0.156
<b>R<sub>p</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.271	0.057	0.180	0.624
<b>R<sub>v</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.306	0.057	0.199	0.598
<b>R<sub>z</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.576	0.095	0.405	1.072
<b>R<sub>c</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.318	0.045	0.228	0.489
<b>R<sub>t</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.846	0.234	0.564	2.161
<b>R<sub>q</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.120	0.017	0.091	0.197
<b>R<sub>sk</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	-0.242	0.318	-1.380	1.272
<b>R<sub>k</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	3.425	0.926	2.384	11.577
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
<b>R<sub>mr</sub></b>	%	$c = 1 \mu\text{m}$ sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	97.983	11.608	7.150	100.000
<b>R<sub>dc</sub></b>	μm	$p = 20\%$ , $q = 80\%$ , Filtre gaussien, 0.8 mm	0.188	0.030	0.136	0.331

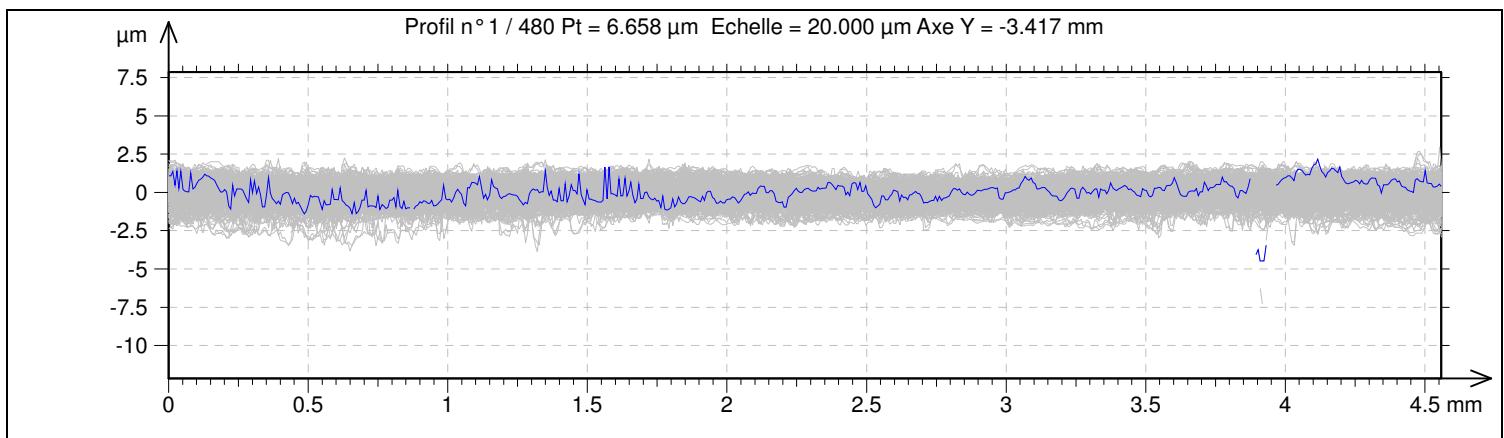
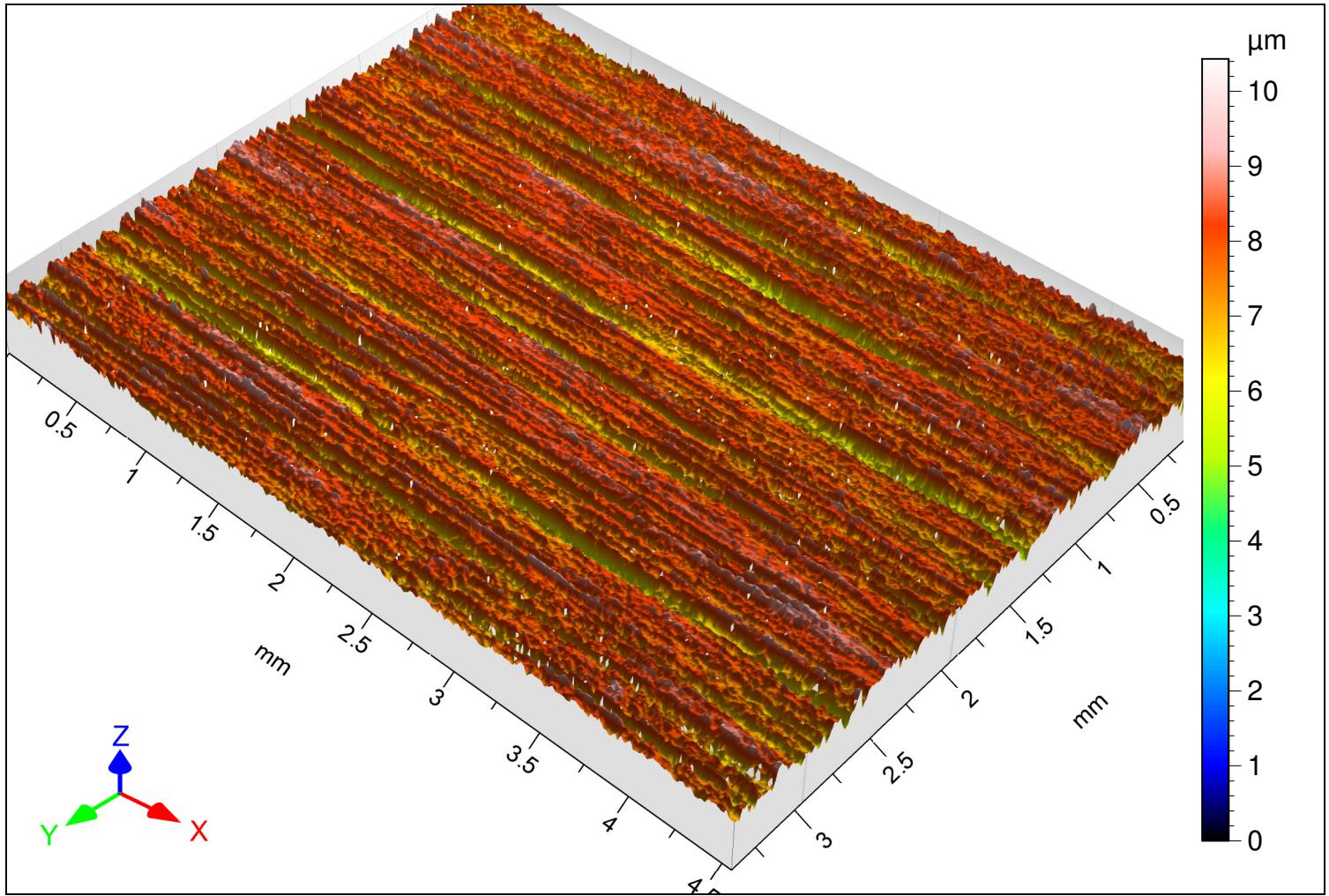


## ISO 4287

Contexte			Mean	Std dev	Min	Max
<b>Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité</b>						
<b>R<sub>a</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	0.071	0.024	0.029	0.182
<b>R<sub>p</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	0.209	0.083	0.066	0.674
<b>R<sub>v</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	0.220	0.084	0.077	0.583
<b>R<sub>z</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	0.429	0.151	0.166	1.123
<b>R<sub>c</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	0.246	0.088	0.084	0.805
<b>R<sub>t</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	0.613	0.295	0.197	2.376
<b>R<sub>q</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	0.092	0.030	0.037	0.218
<b>R<sub>sk</sub></b>		<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	-0.041	0.494	-2.194	1.345
<b>R<sub>ku</sub></b>		<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	3.687	1.453	1.888	11.232
<b>Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité</b>						
<b>R<sub>mr</sub></b>	%	<i>c = 1 µm sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	98.180	12.128	0.567	100.000
<b>R<sub>dc</sub></b>	µm	<i>p = 20%, q = 80%, Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	0.148	0.055	0.059	0.416

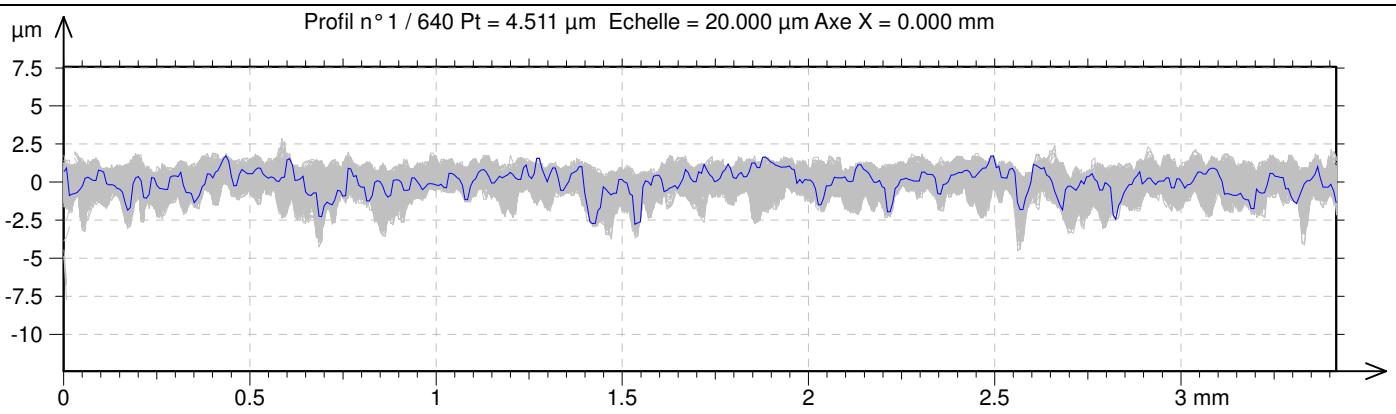






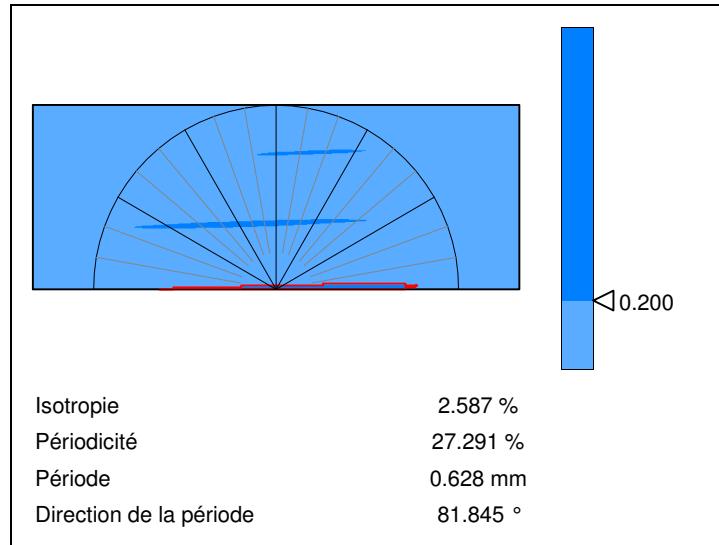
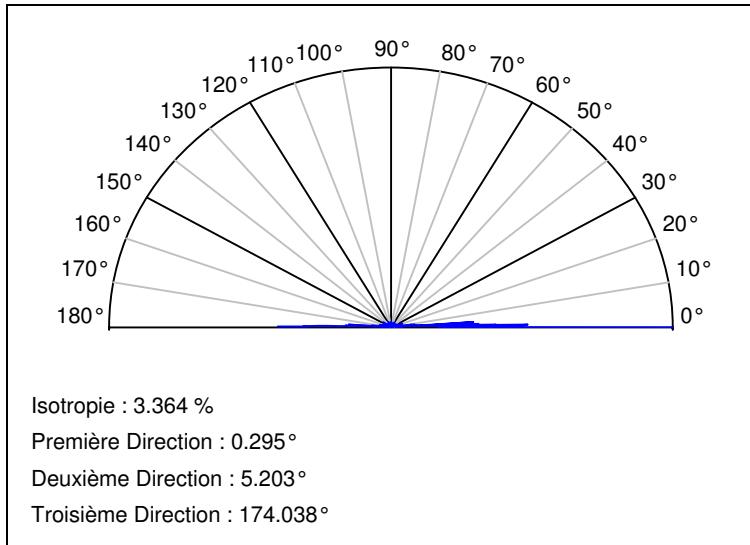
## ISO 4287

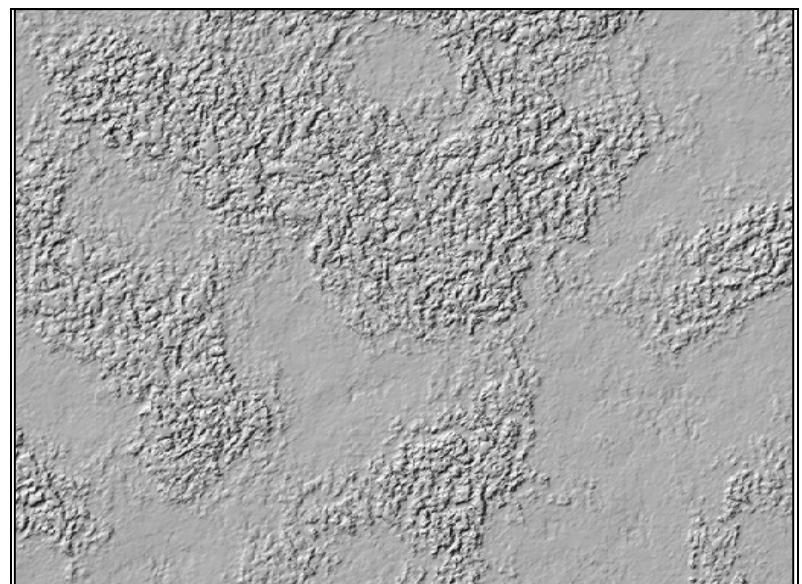
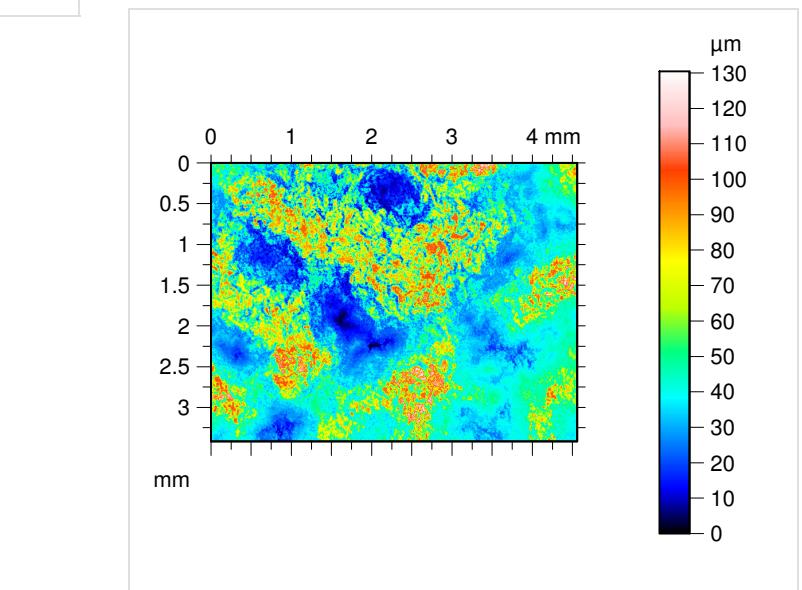
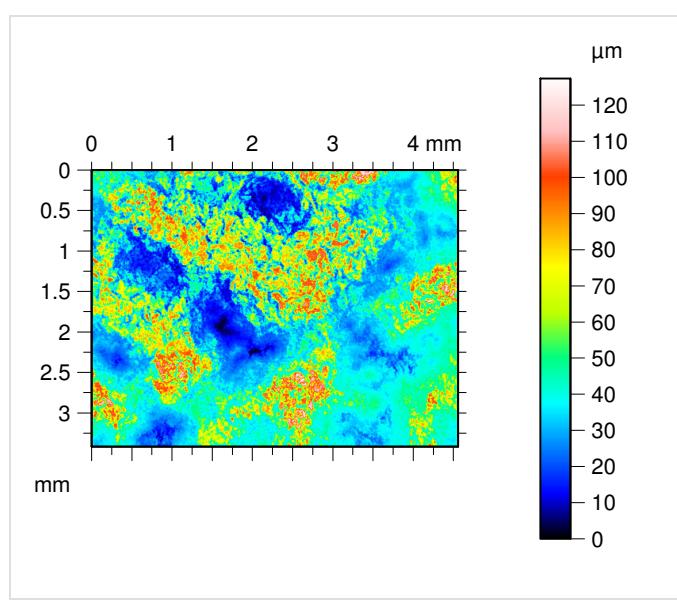
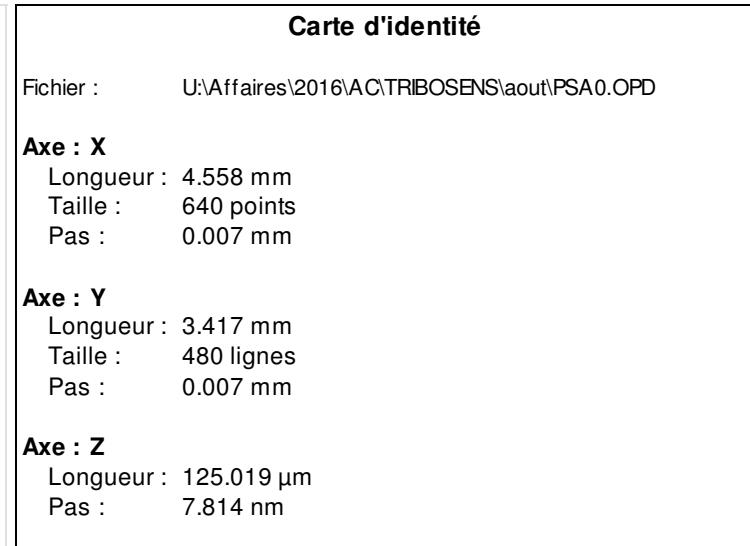
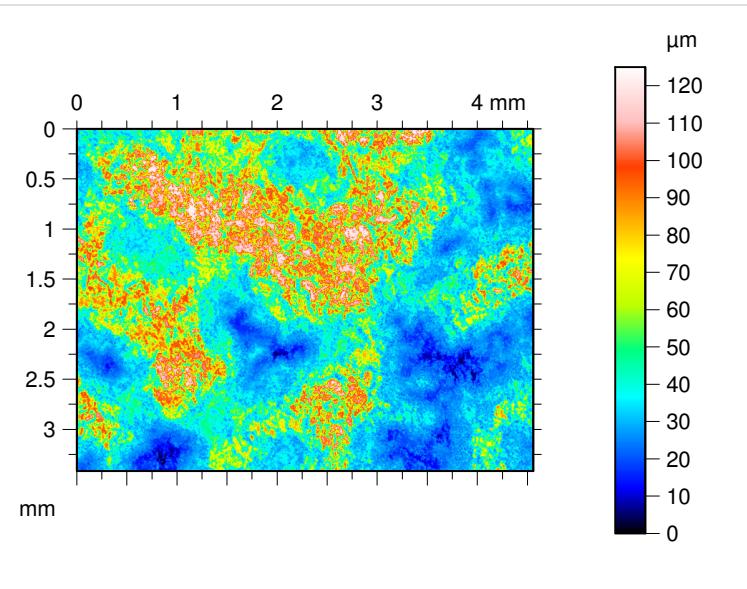
		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
R <sub>a</sub>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.187	0.042	0.102	0.373
R <sub>p</sub>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.587	0.148	0.297	1.198
R <sub>v</sub>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.595	0.142	0.338	1.329
R <sub>z</sub>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.183	0.261	0.684	2.078
R <sub>c</sub>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.581	0.135	0.337	1.568
R <sub>t</sub>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.729	0.598	0.922	8.187
R <sub>q</sub>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.238	0.053	0.133	0.478
R <sub>sk</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	-0.043	0.280	-0.953	0.911
R <sub>k</sub>		Filtre gaussien, 0.8 mm	3.268	0.533	2.321	5.512
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
R <sub>mr</sub>	%	c = 1 μm sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	70.963	29.231	0.569	100.000
R <sub>dc</sub>	μm	p = 20%, q = 80%, Filtre gaussien, 0.8 mm	0.383	0.085	0.216	0.662

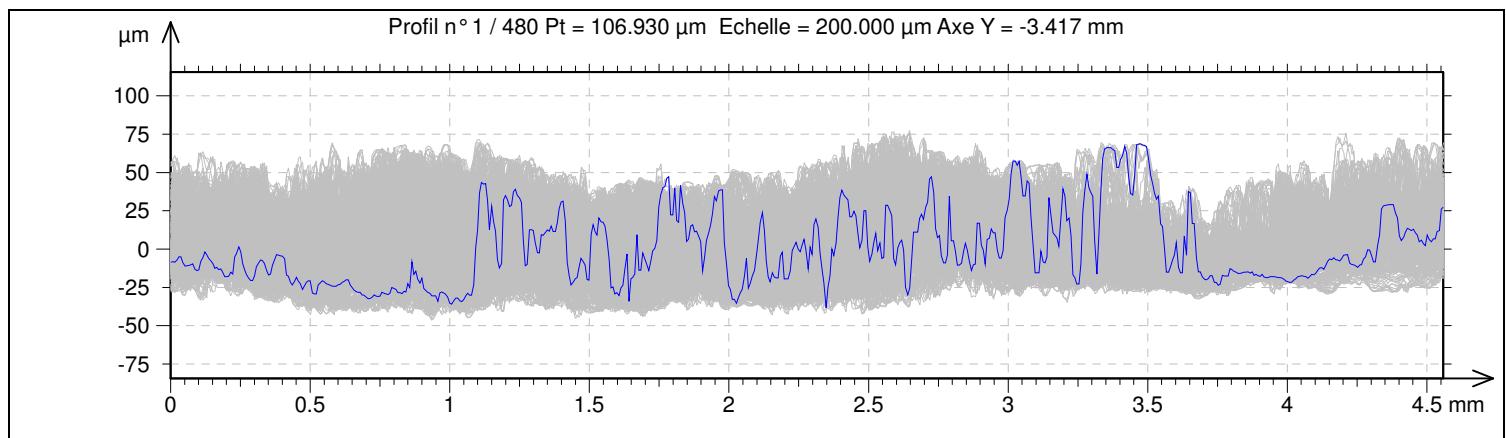
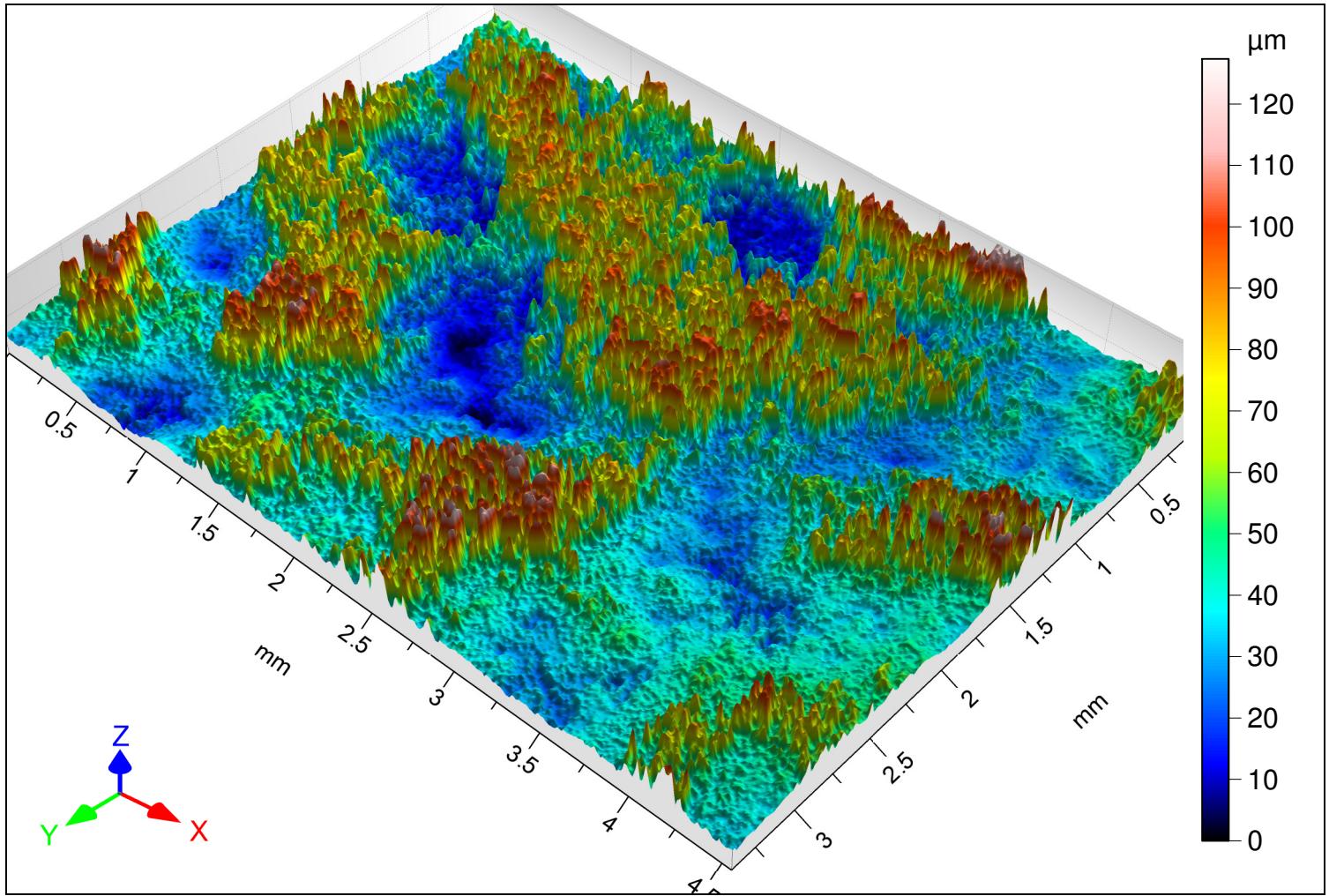


## ISO 4287

		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
<b>R<sub>a</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.505	0.029	0.426	0.583
<b>R<sub>p</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.123	0.113	0.858	1.666
<b>R<sub>v</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	2.044	0.321	1.531	3.080
<b>R<sub>z</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	3.167	0.346	2.580	4.468
<b>R<sub>c</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	1.555	0.161	1.096	2.135
<b>R<sub>t</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	3.707	0.503	2.761	6.091
<b>R<sub>q</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	0.654	0.032	0.559	0.768
<b>R<sub>sk</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	-0.952	0.309	-1.712	-0.285
<b>R<sub>ku</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	4.019	1.124	2.397	7.222
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
<b>R<sub>mr</sub></b>	%	$c = 1 \mu\text{m}$ sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	34.756	12.016	0.817	61.580
<b>R<sub>dc</sub></b>	µm	$p = 20\%$ , $q = 80\%$ , Filtre gaussien, 0.8 mm	0.998	0.107	0.741	1.249

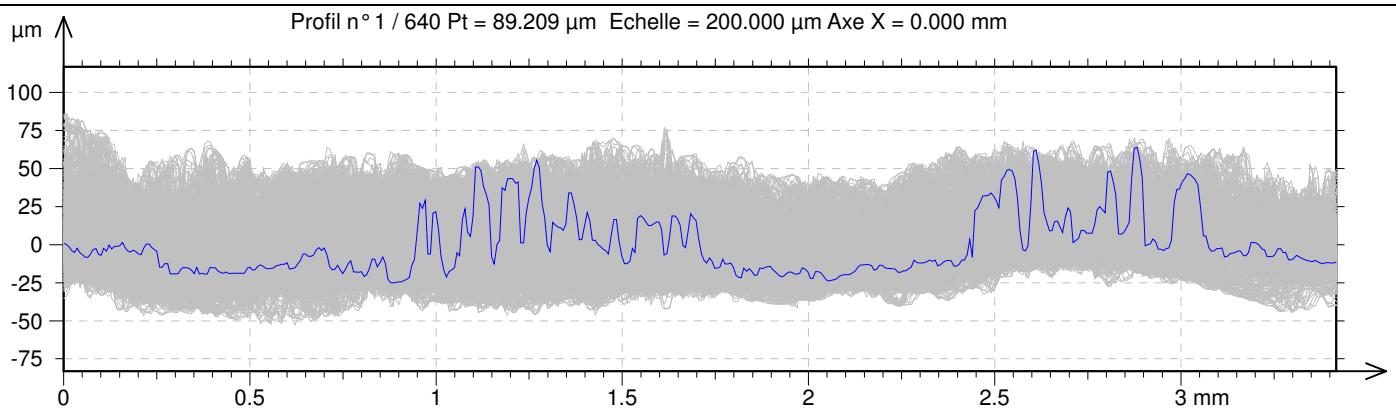






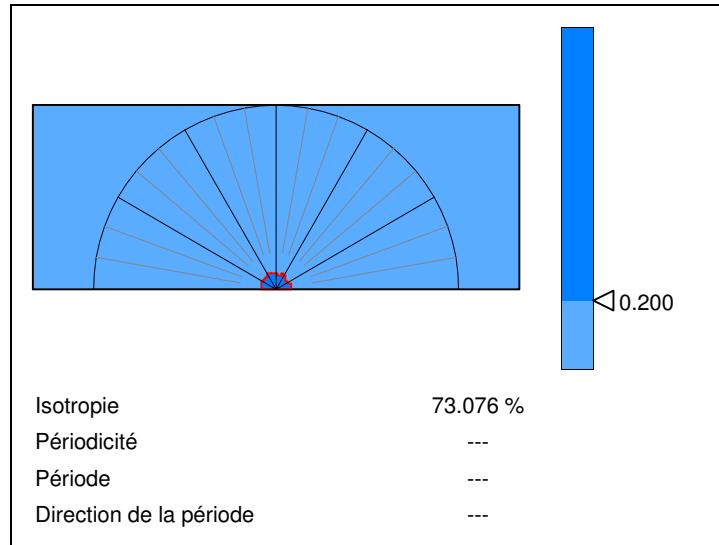
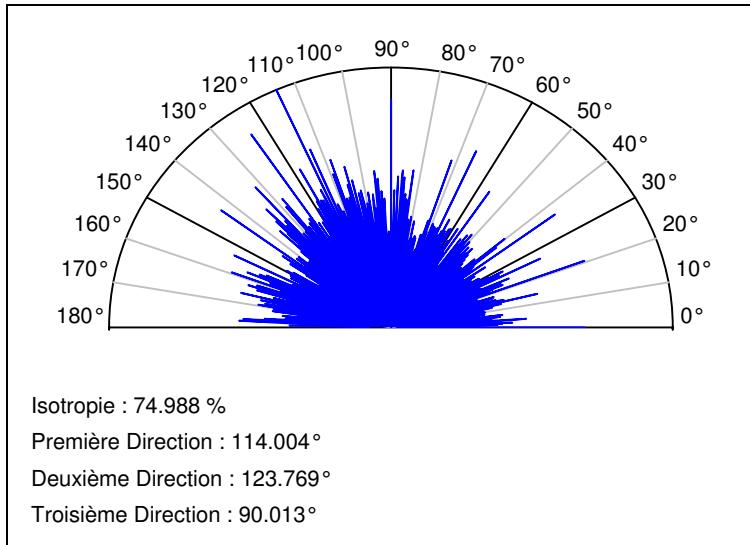
## ISO 4287

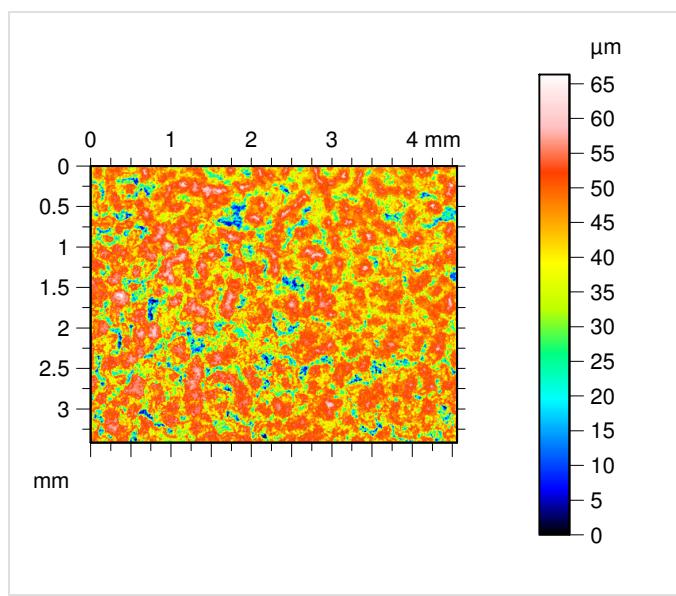
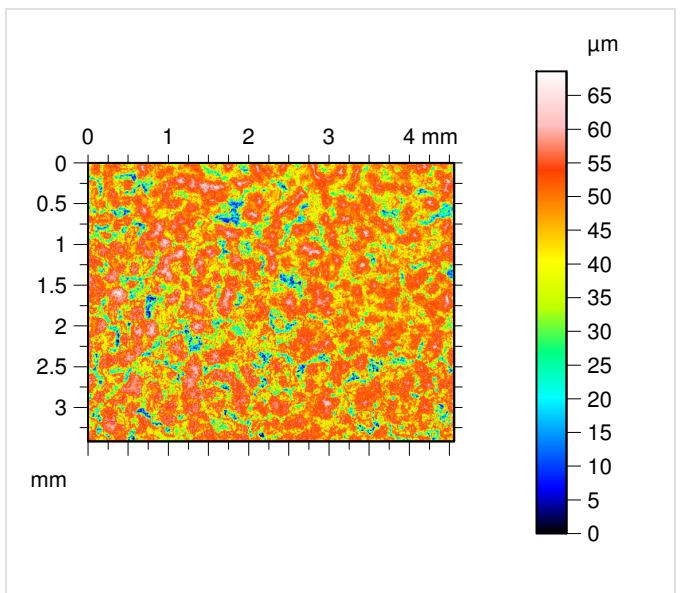
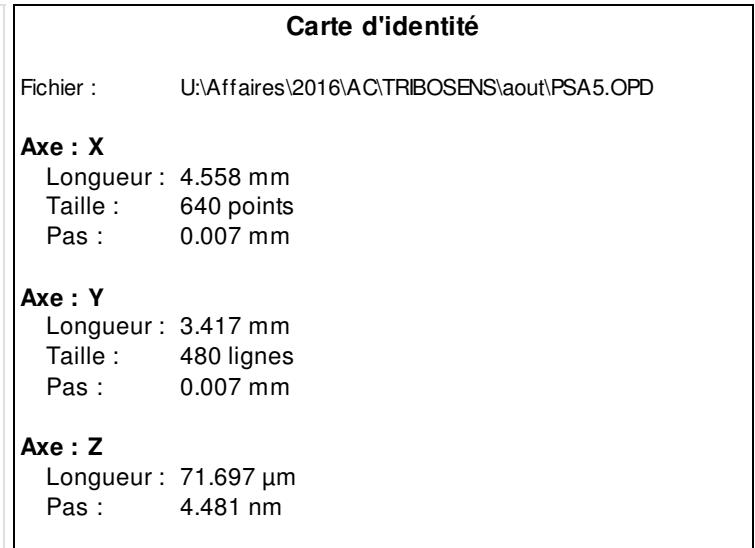
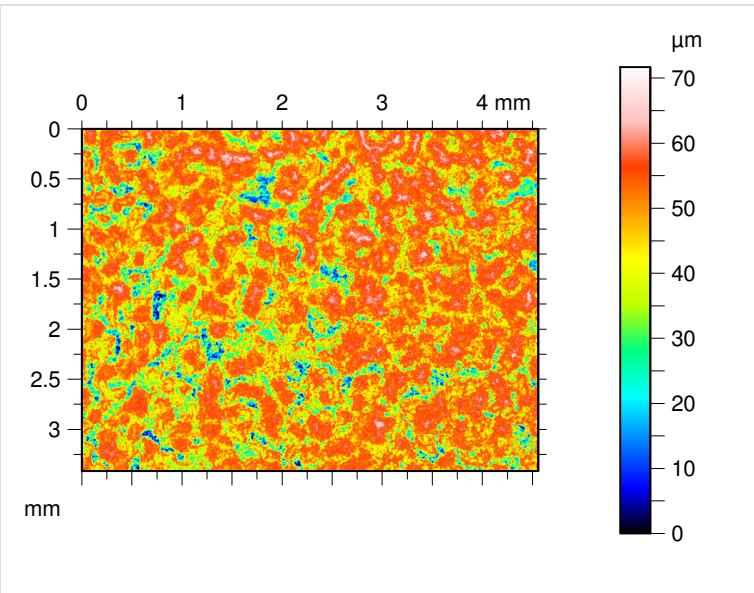
		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
<b>R<sub>a</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	10.345	2.753	5.056	15.687
<b>R<sub>p</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	30.108	4.990	15.869	42.021
<b>R<sub>v</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	25.168	7.168	10.668	45.184
<b>R<sub>z</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	55.277	10.880	27.774	75.797
<b>R<sub>c</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	28.182	6.584	14.196	46.329
<b>R<sub>t</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	74.379	10.153	45.280	106.547
<b>R<sub>q</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	12.832	3.027	6.508	18.558
<b>R<sub>sk</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	0.310	0.354	-0.471	1.563
<b>R<sub>ku</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	3.194	0.832	1.980	6.788
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
<b>R<sub>mr</sub></b>	%	$c = 1 \mu\text{m}$ sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	0.339	0.206	0.189	1.515
<b>R<sub>dc</sub></b>	μm	$p = 20\%$ , $q = 80\%$ , Filtre gaussien, 0.8 mm	18.799	6.706	7.394	33.579

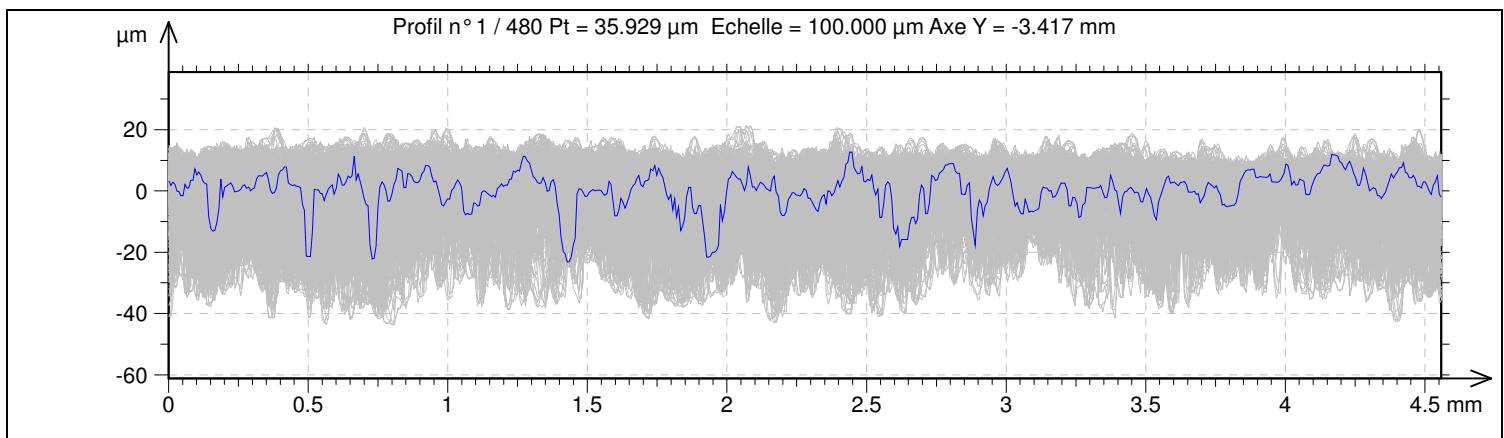
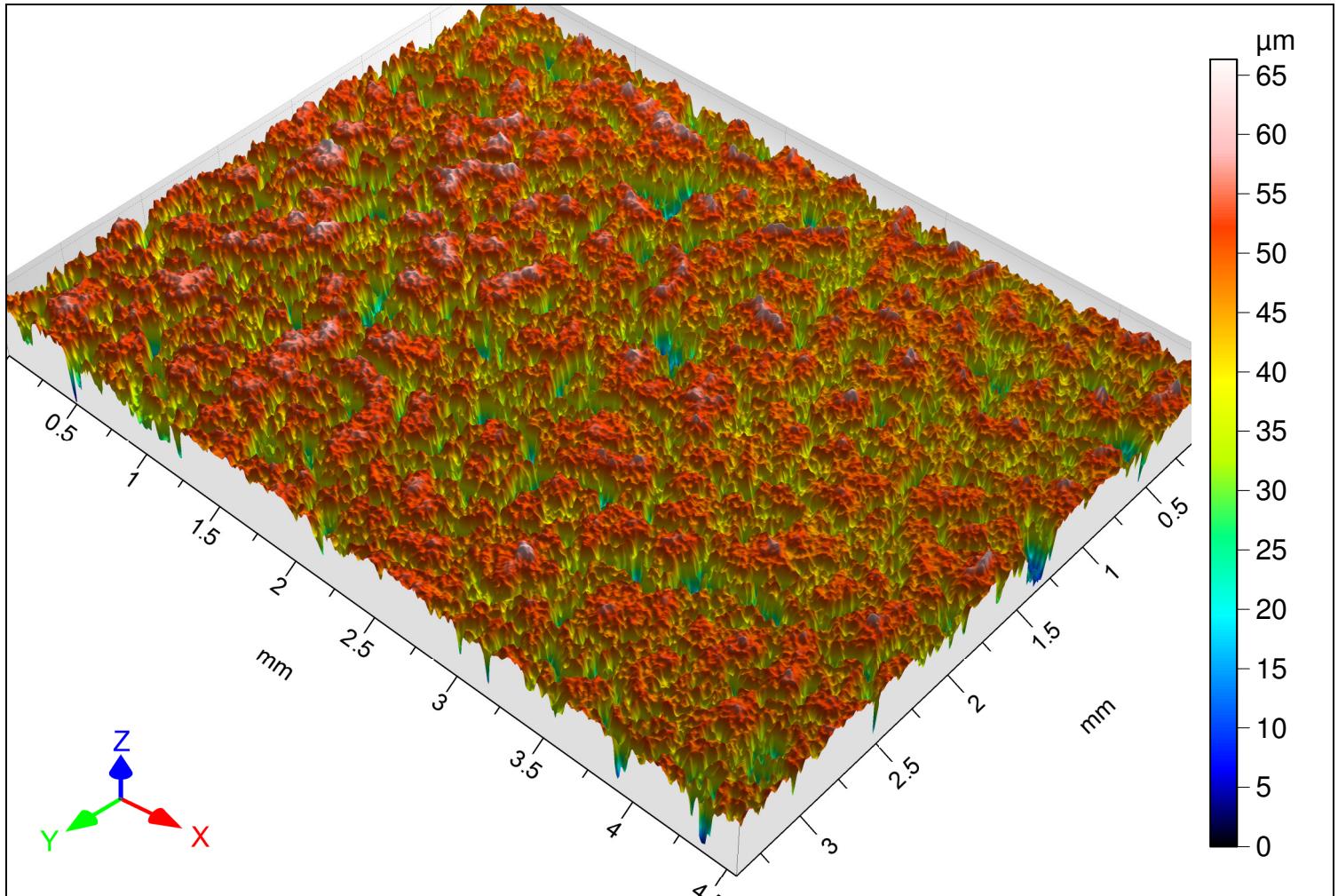


## ISO 4287

Contexte			Mean	Std dev	Min	Max
<b>Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité</b>						
<b>R<sub>a</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	9.666	2.870	3.859	16.889
<b>R<sub>p</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	28.174	6.388	11.338	43.519
<b>R<sub>v</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	23.286	7.215	8.464	39.227
<b>R<sub>z</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	51.459	12.217	21.738	78.223
<b>R<sub>c</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	28.679	8.054	10.051	47.022
<b>R<sub>t</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	68.681	11.162	23.949	92.865
<b>R<sub>q</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	11.978	3.196	4.908	19.387
<b>R<sub>sk</sub></b>		<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	0.319	0.440	-0.848	2.042
<b>R<sub>ku</sub></b>		<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	3.310	1.079	1.896	8.761
<b>Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité</b>						
<b>R<sub>mrr</sub></b>	%	<i>c = 1 µm sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	0.514	0.275	0.272	2.004
<b>R<sub>dc</sub></b>	µm	<i>p = 20%, q = 80%, Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	18.748	7.859	6.179	37.890

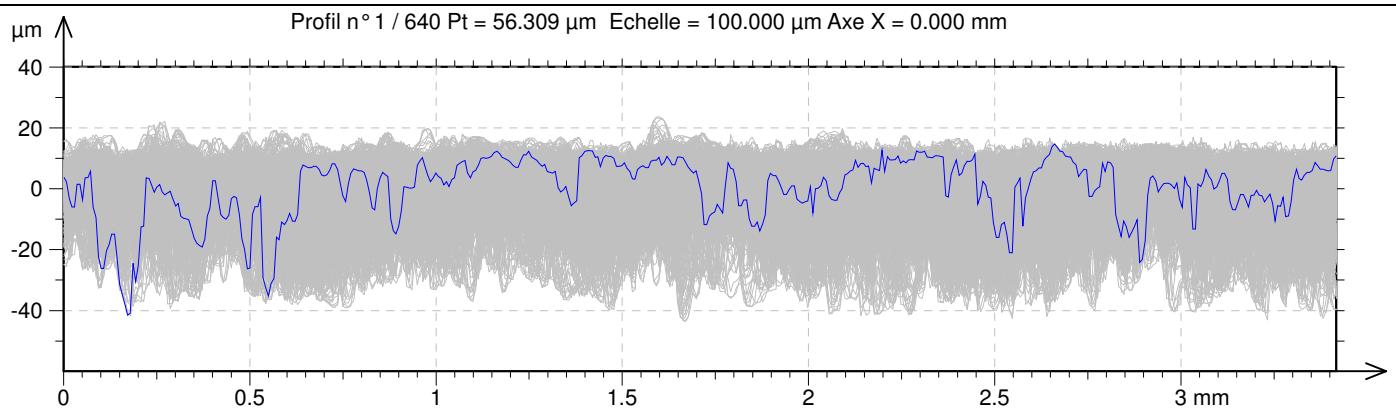






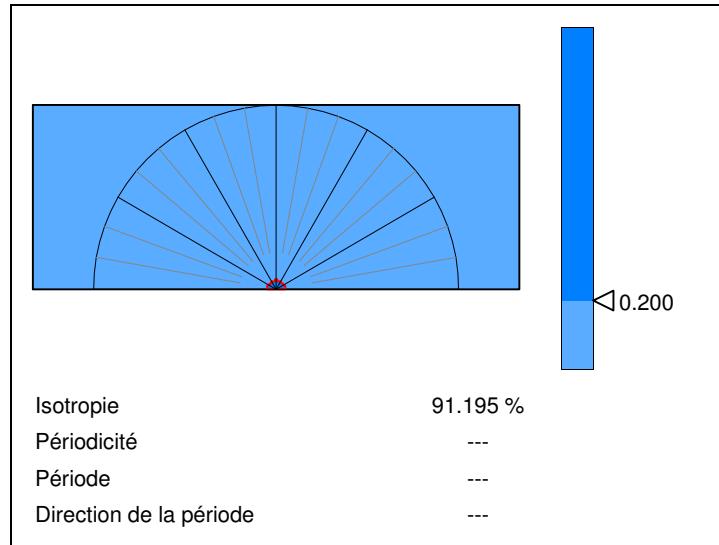
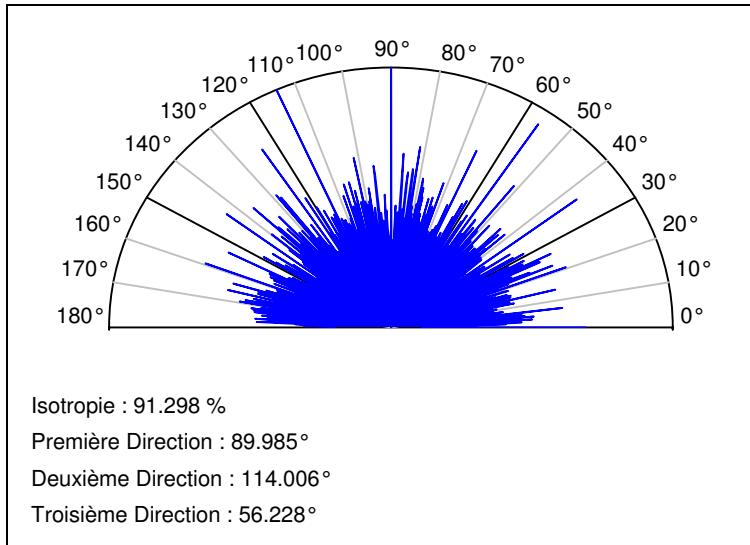
## ISO 4287

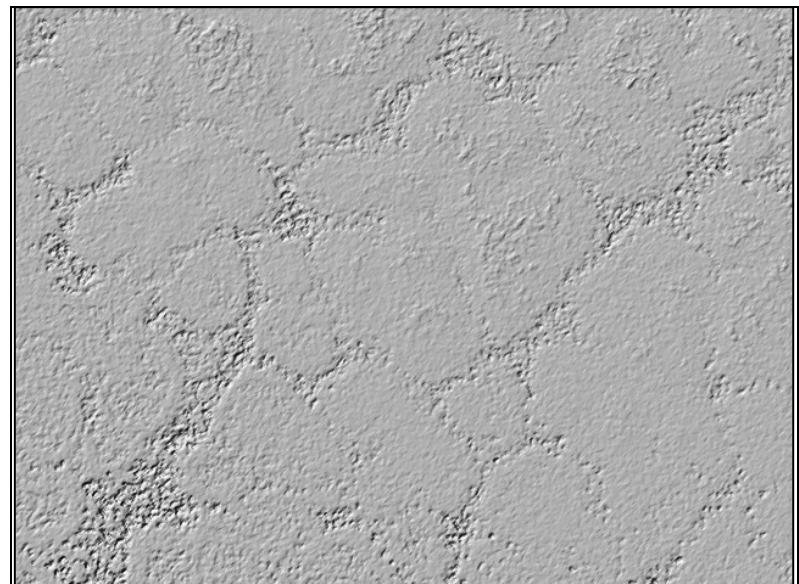
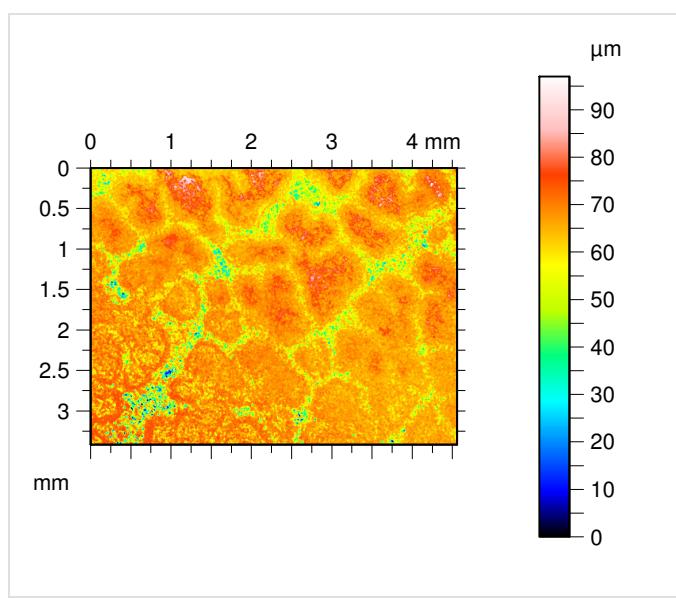
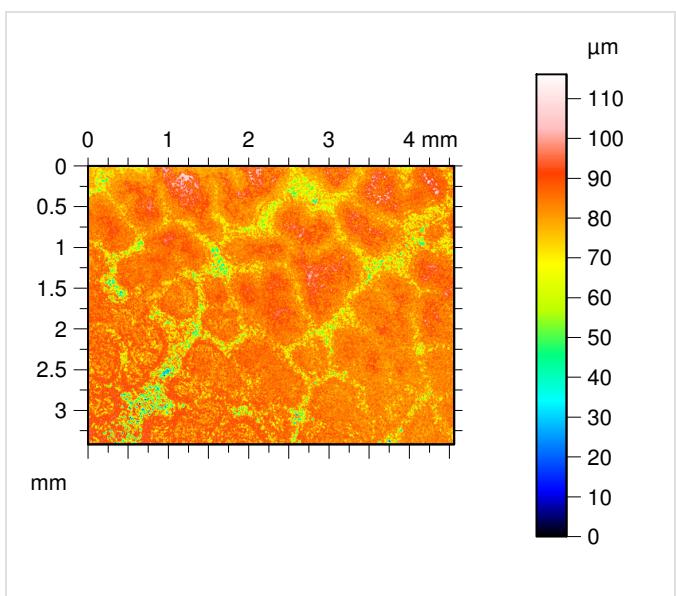
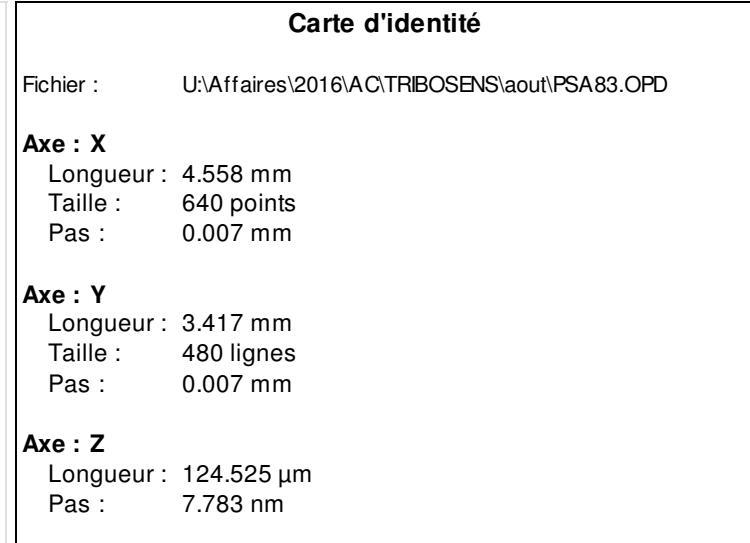
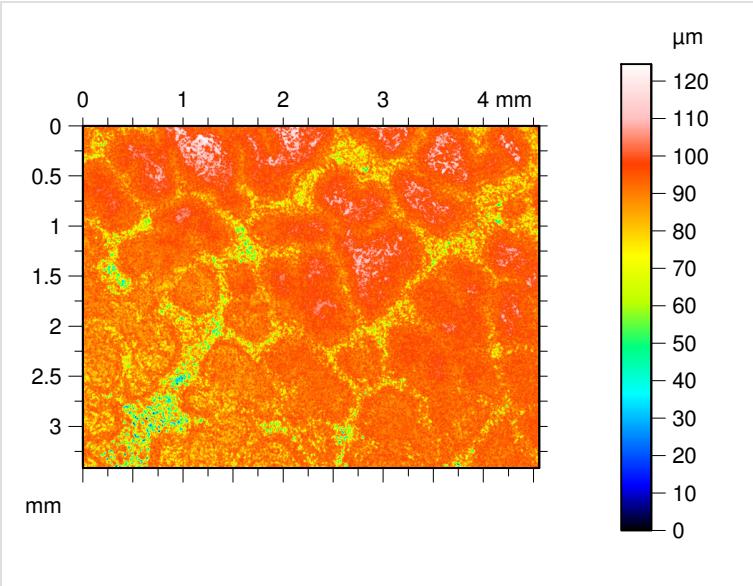
		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
<b>R<sub>a</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	5.851	0.779	4.250	8.491
<b>R<sub>p</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	11.291	1.247	8.232	14.637
<b>R<sub>v</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	21.842	3.131	13.977	31.013
<b>R<sub>z</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	33.133	3.712	24.426	44.526
<b>R<sub>c</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	16.961	2.490	11.280	24.612
<b>R<sub>t</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	42.697	4.415	31.435	54.091
<b>R<sub>q</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	7.445	0.937	5.426	10.769
<b>R<sub>sk</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	-0.947	0.260	-1.631	-0.228
<b>R<sub>k<sub>u</sub></sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	3.795	0.750	2.295	6.865
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
<b>R<sub>mr</sub></b>	%	$c = 1 \mu\text{m}$ sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	0.654	0.409	0.189	2.652
<b>R<sub>dc</sub></b>	μm	$p = 20\%$ , $q = 80\%$ , Filtre gaussien, 0.8 mm	10.873	1.604	7.533	16.577

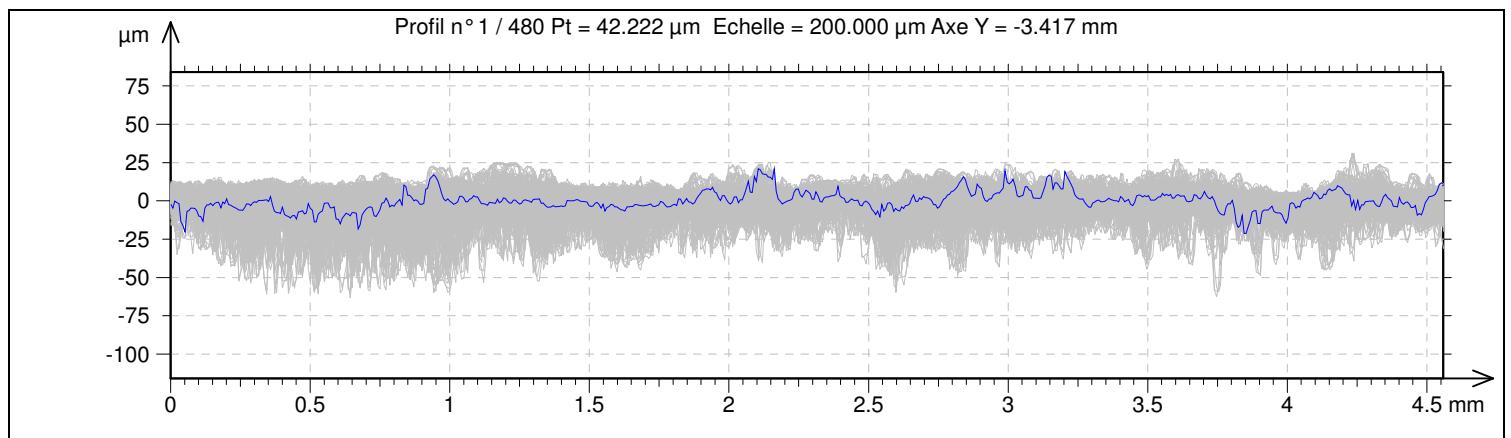
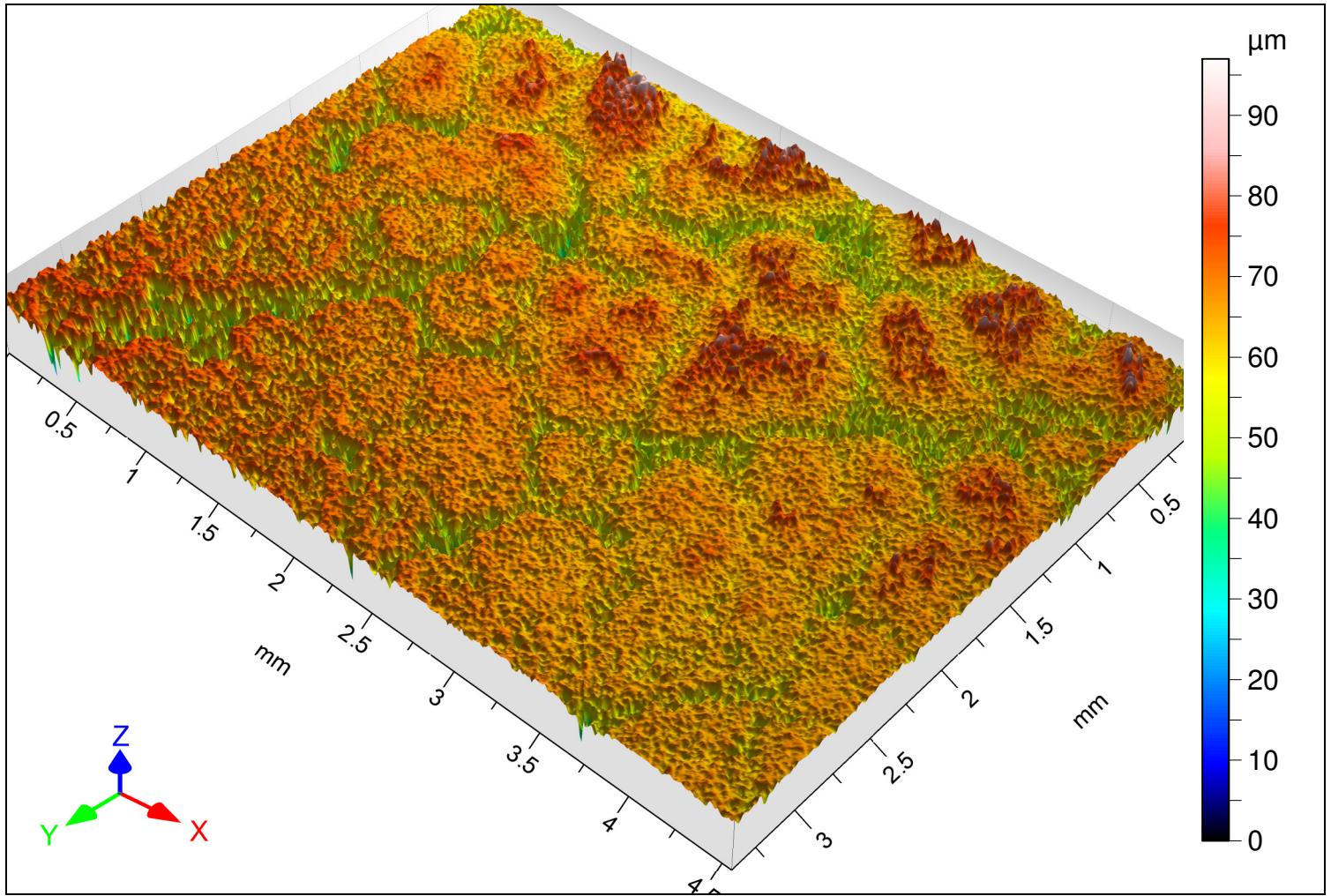


## ISO 4287

Contexte			Mean	Std dev	Min	Max
<b>Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité</b>						
<b>R<sub>a</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	5.730	1.125	3.097	8.569
<b>R<sub>p</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	10.923	1.832	6.652	16.597
<b>R<sub>v</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	21.443	3.616	11.455	30.496
<b>R<sub>z</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	32.366	4.737	18.347	43.780
<b>R<sub>c</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	17.732	3.531	8.637	29.676
<b>R<sub>t</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	40.095	5.225	20.568	53.778
<b>R<sub>q</sub></b>	µm	Filtre gaussien, 0.8 mm	7.313	1.301	3.913	10.496
<b>R<sub>sk</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	-1.015	0.327	-1.997	-0.103
<b>R<sub>ku</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	3.905	1.034	2.329	8.013
<b>Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité</b>						
<b>R<sub>mrr</sub></b>	%	$c = 1 \mu\text{m}$ sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	0.977	0.614	0.272	5.163
<b>R<sub>dc</sub></b>	µm	$p = 20\%$ , $q = 80\%$ , Filtre gaussien, 0.8 mm	10.948	2.484	5.824	17.264

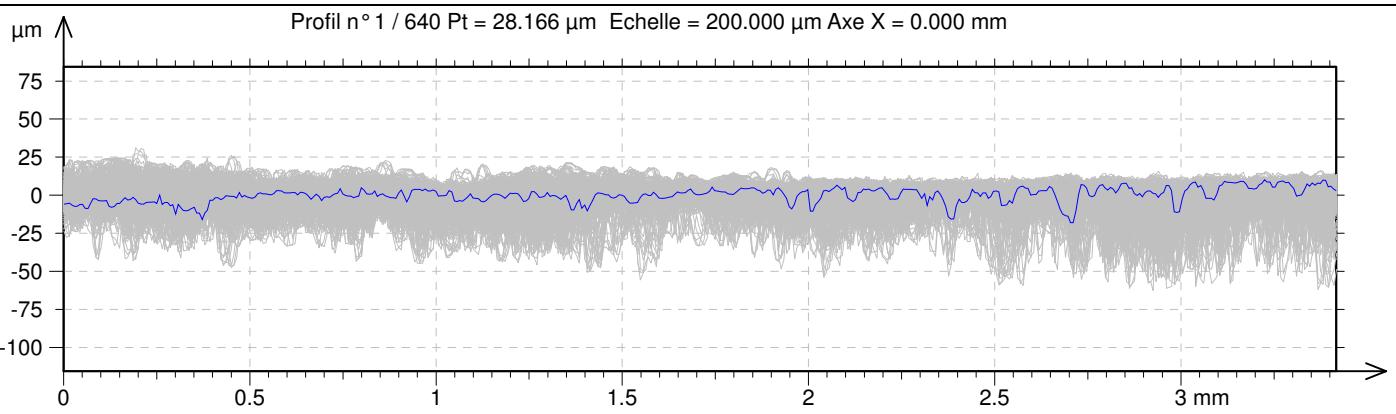






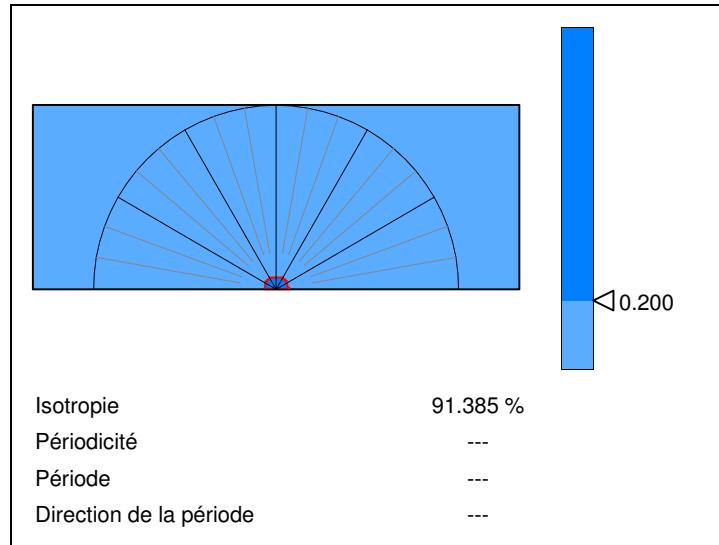
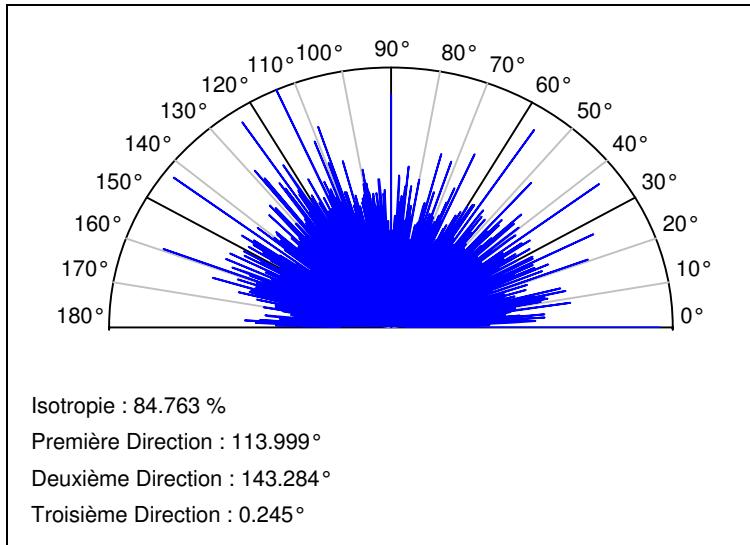
## ISO 4287

		Contexte	Mean	Std dev	Min	Max
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité						
<b>R<sub>a</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	3.553	0.704	2.328	6.211
<b>R<sub>p</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	8.939	1.723	6.016	15.157
<b>R<sub>v</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	16.810	4.636	7.383	31.159
<b>R<sub>z</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	25.749	4.755	15.570	42.177
<b>R<sub>c</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	10.626	2.153	5.799	20.288
<b>R<sub>t</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	41.220	10.061	22.570	71.672
<b>R<sub>q</sub></b>	μm	Filtre gaussien, 0.8 mm	4.887	0.926	3.014	8.299
<b>R<sub>sk</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	-0.855	0.637	-2.203	0.962
<b>R<sub>ku</sub></b>		Filtre gaussien, 0.8 mm	5.677	1.570	2.936	11.812
Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité						
<b>R<sub>mr</sub></b>	%	$c = 1 \mu\text{m}$ sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm	0.614	0.399	0.189	2.652
<b>R<sub>dc</sub></b>	μm	$p = 20\%$ , $q = 80\%$ , Filtre gaussien, 0.8 mm	5.785	0.966	3.891	9.696



## ISO 4287

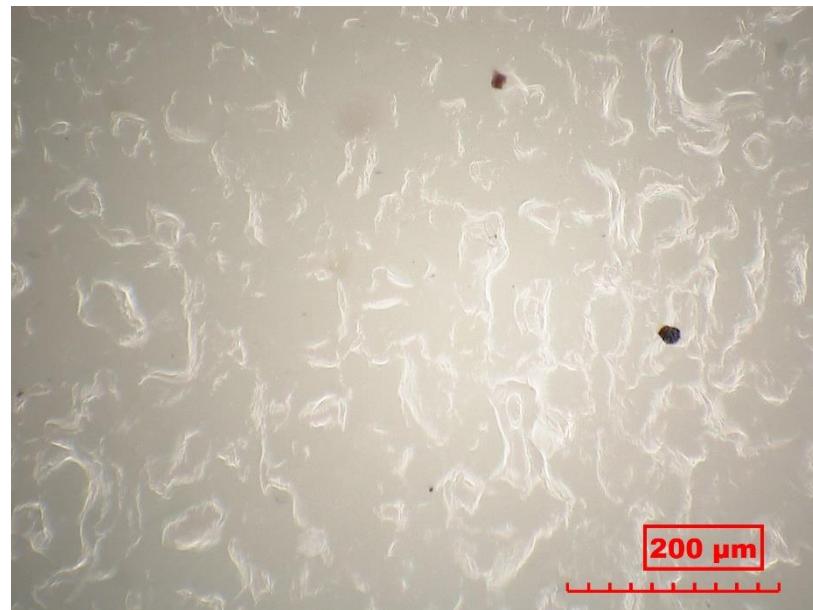
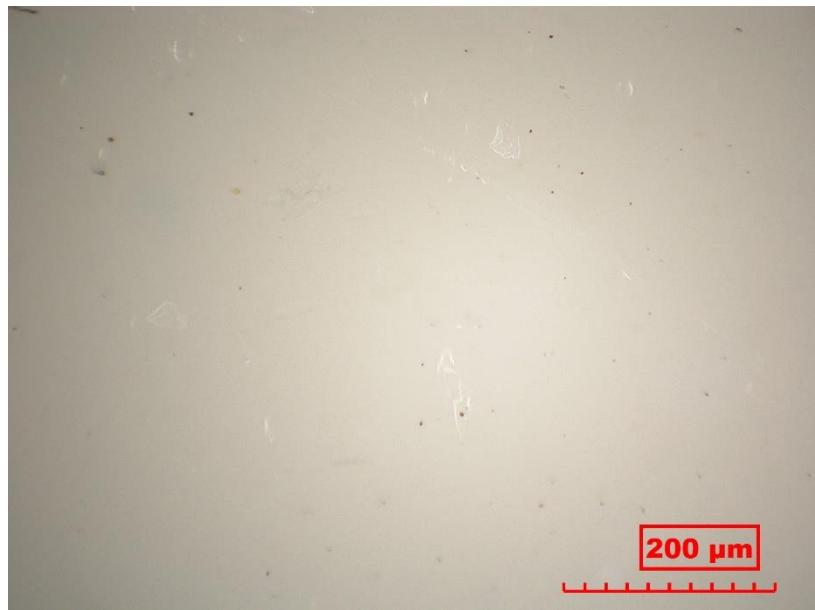
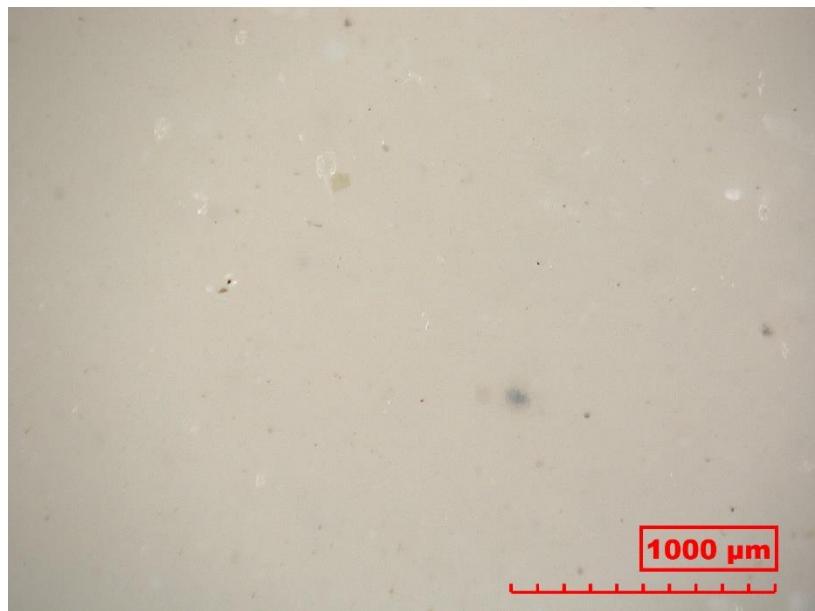
Contexte			Mean	Std dev	Min	Max
<b>Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité</b>						
<b>R<sub>a</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	3.141	0.770	1.866	5.834
<b>R<sub>p</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	7.750	1.514	4.361	12.486
<b>R<sub>v</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	15.286	4.730	6.338	31.776
<b>R<sub>z</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	23.036	5.629	11.550	42.289
<b>R<sub>c</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	10.632	3.375	5.352	26.078
<b>R<sub>t</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	35.218	9.921	16.360	69.314
<b>R<sub>q</sub></b>	µm	<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	4.356	1.088	2.500	8.378
<b>R<sub>sk</sub></b>		<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	-0.985	0.588	-2.627	0.861
<b>R<sub>ku</sub></b>		<i>Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	5.770	1.711	2.377	12.801
<b>Paramètres liés au taux de portance - Profil de rugosité</b>						
<b>R<sub>mrr</sub></b>	%	<i>c = 1 µm sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	0.874	0.627	0.272	7.039
<b>R<sub>dc</sub></b>	µm	<i>p = 20%, q = 80%, Filtre gaussien, 0.8 mm</i>	5.520	1.397	3.068	10.306



# Annexe E : Photographies des surfaces au microscope numérique

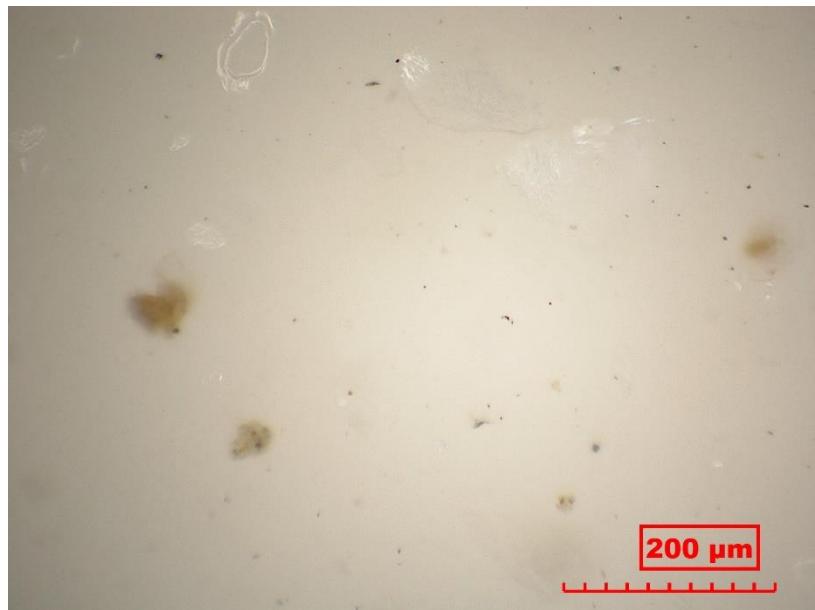
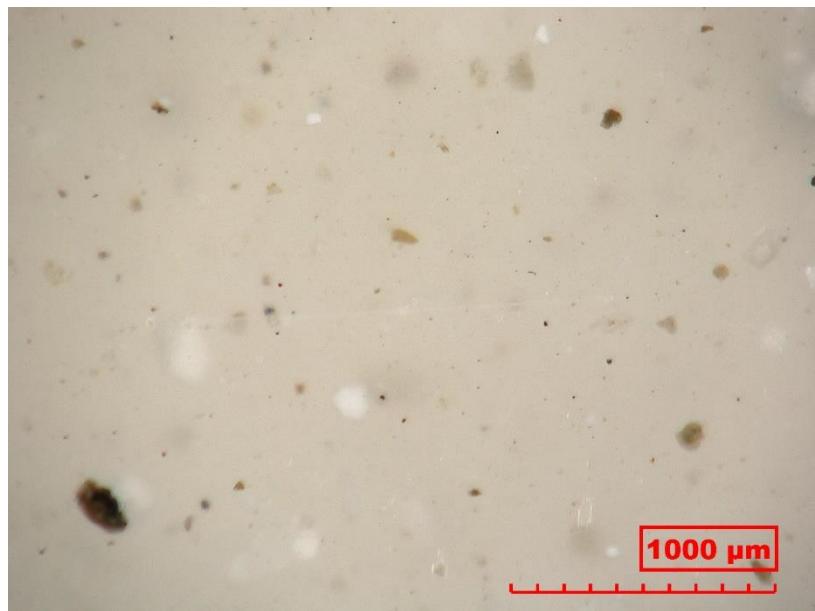
Sommaire :

EEP515_1.....	E-1
EEP515_2.....	E-1
EEP5500_1.....	E-2
EEP5500_2.....	E-2
EEP2015_1.....	E-3
EEP2015_2.....	E-3
EEP20500_1.....	E-4
EEP20500_2.....	E-4
EEP4015_1.....	E-5
EEP4015_2.....	E-5
EEP40500_1.....	E-6
EEP40500_2.....	E-6
MICRO.....	E-7
POLI.....	E-7
RECT.....	E-8
PSA0.....	E-8
PSA5.....	E-9
PSA83.....	E-9



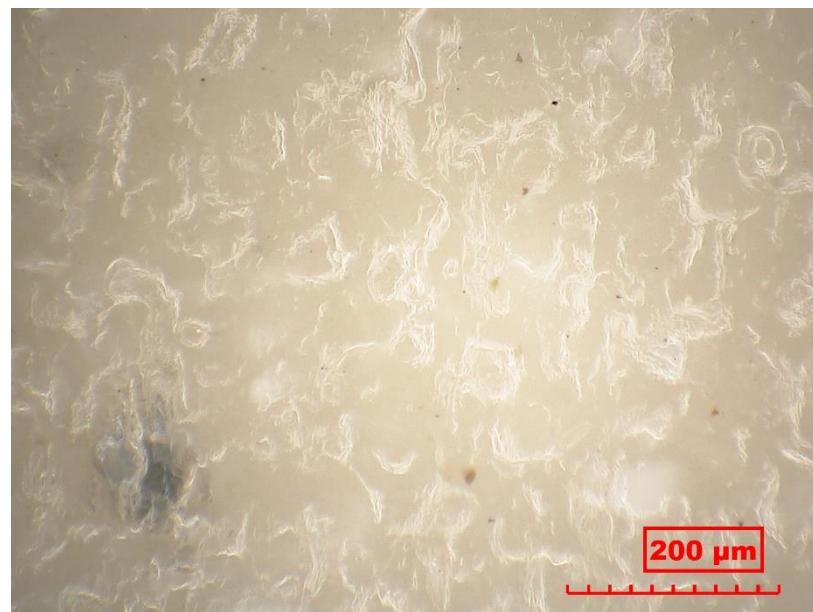
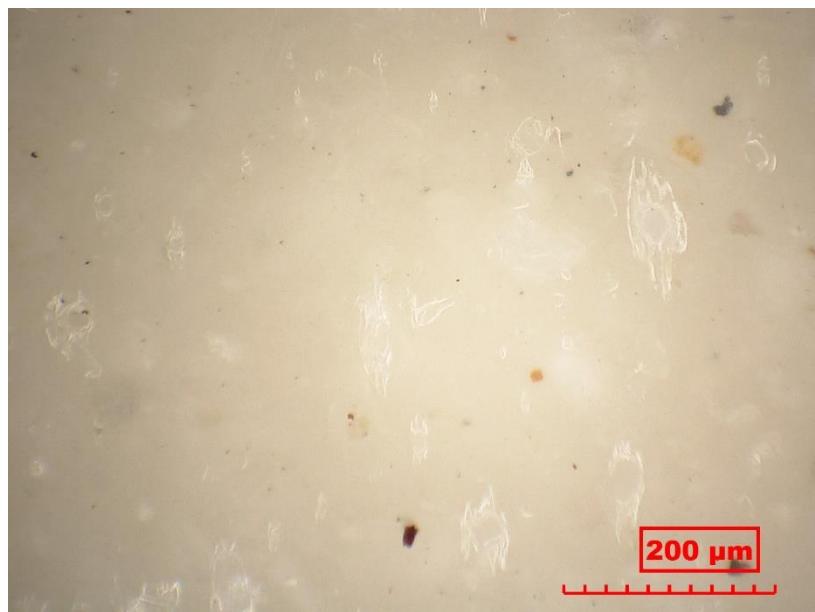
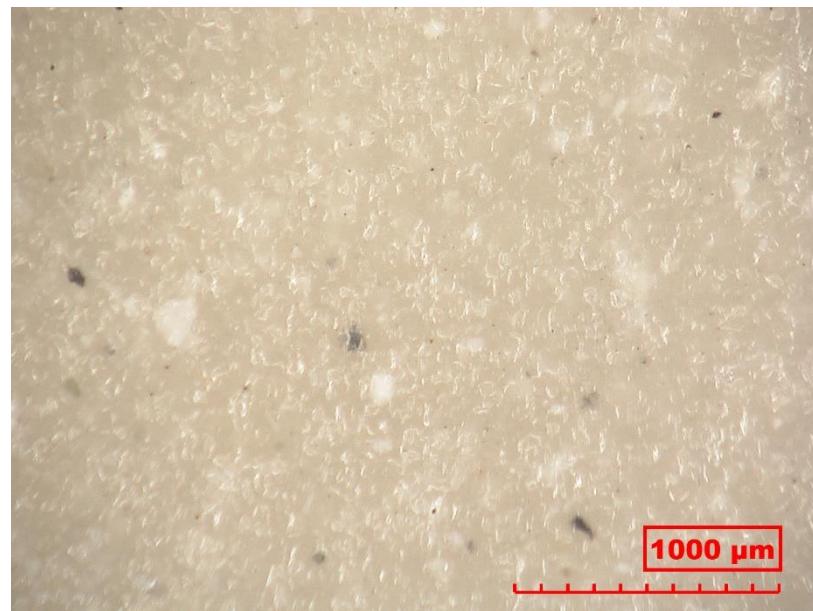
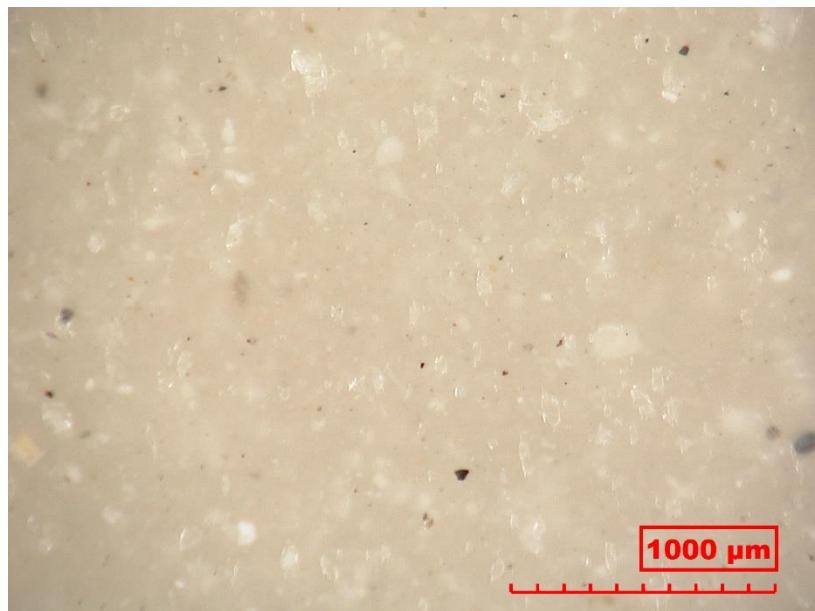
EEP515\_1

EEP515\_2



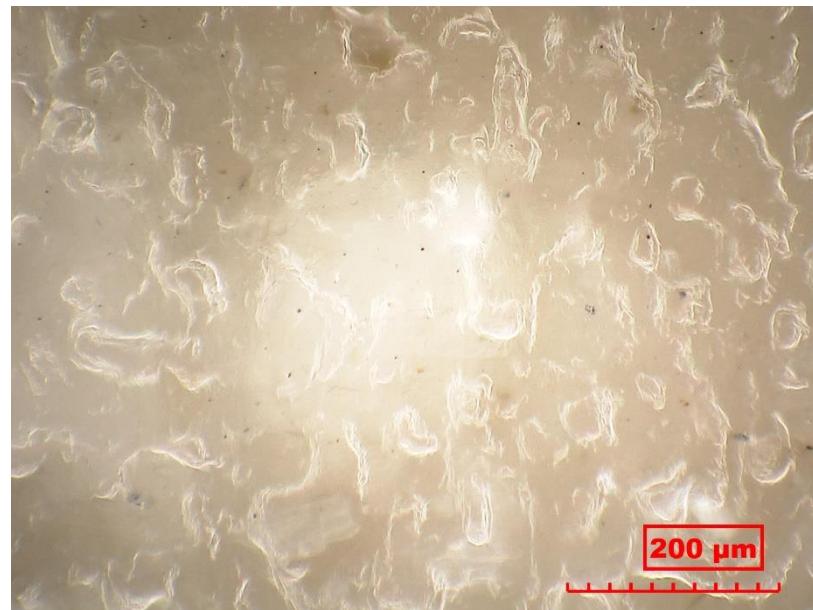
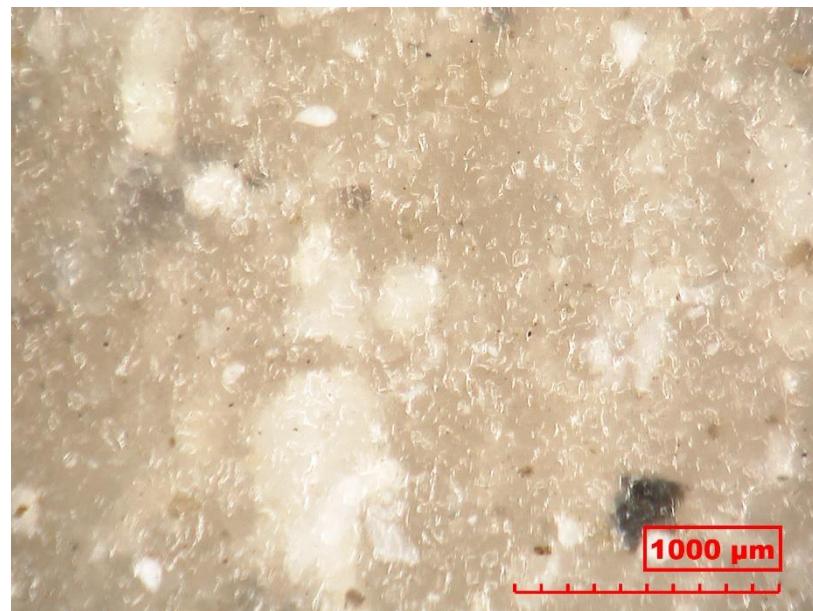
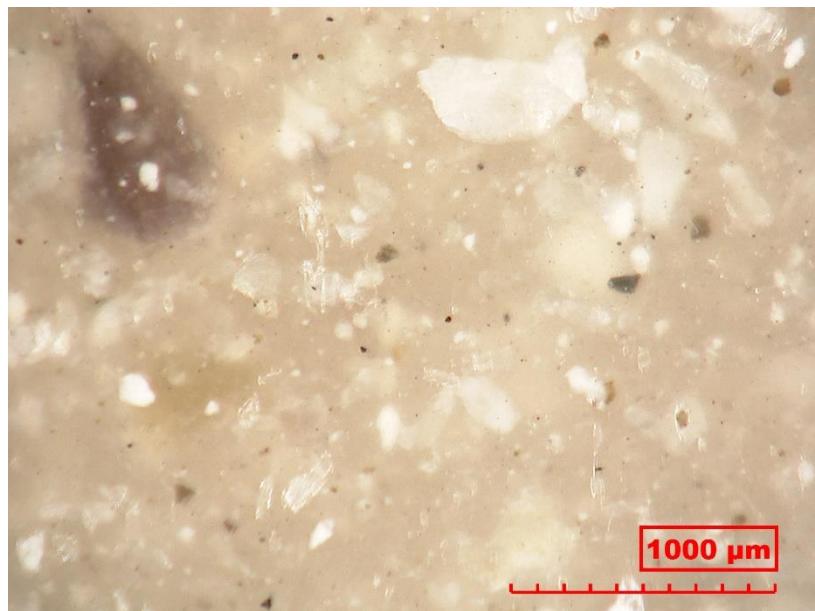
EEP5500\_1

EEP5500\_2



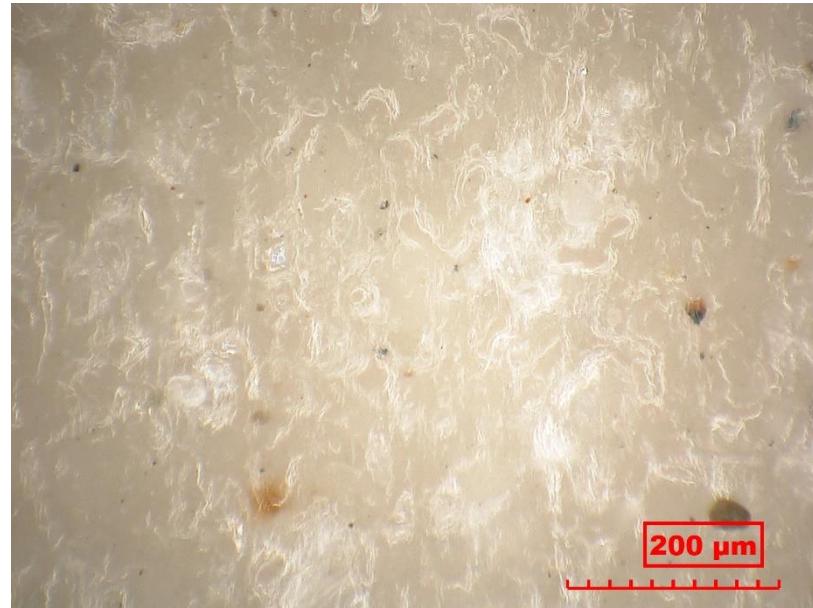
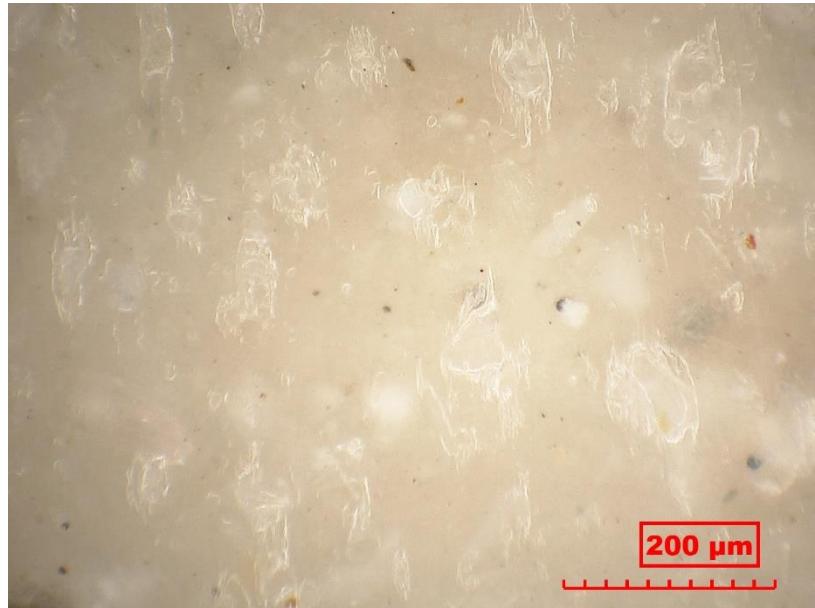
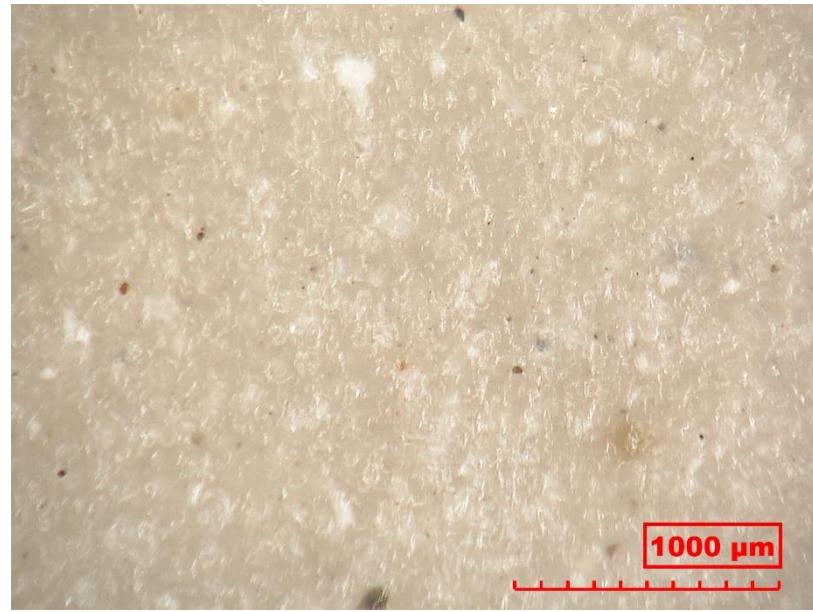
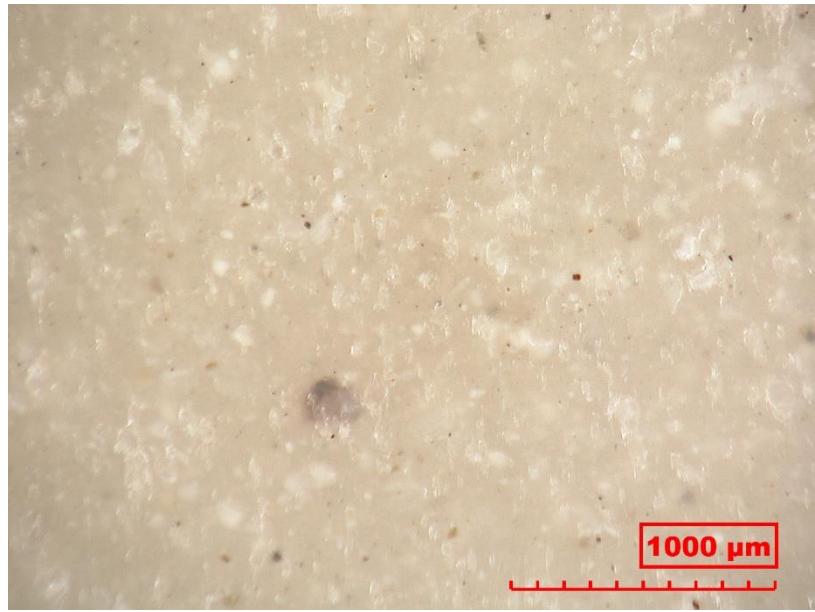
EEP2015\_1

EEP2015\_2



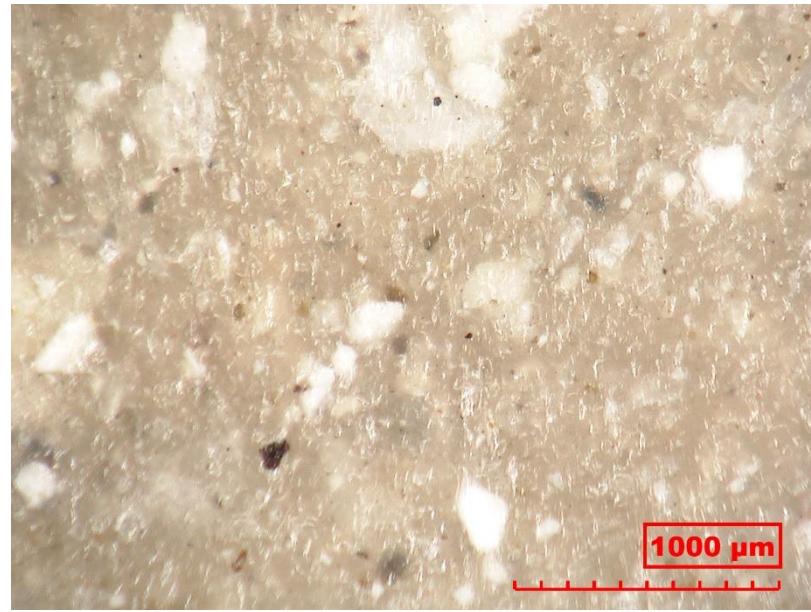
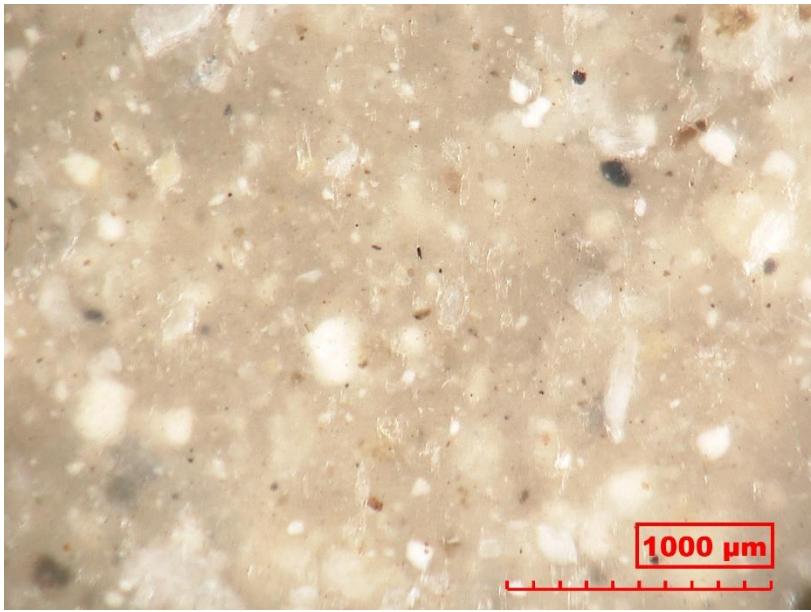
EEP20500\_1

EEP20500\_2



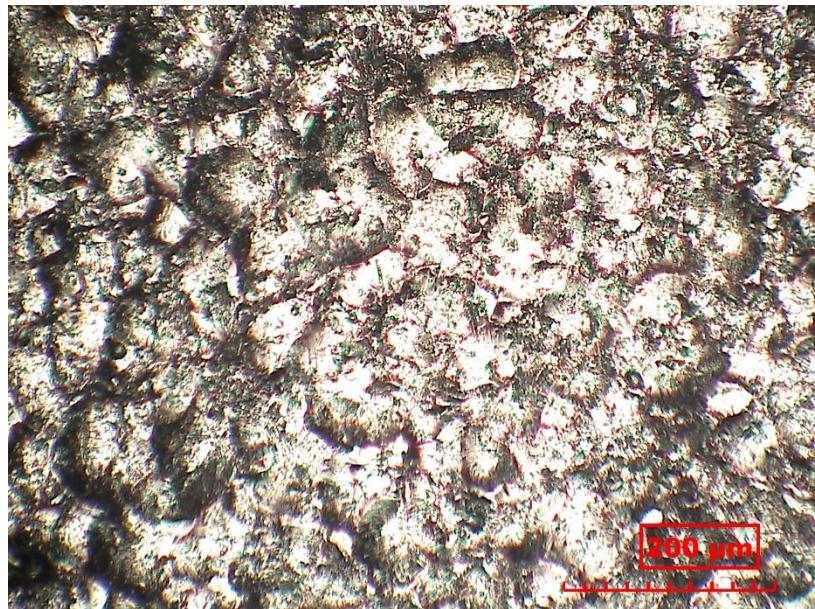
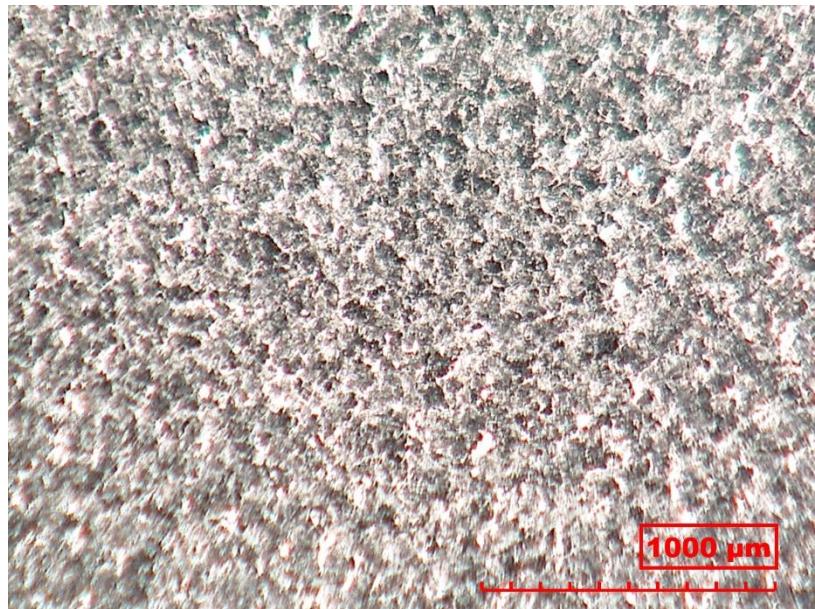
EEP4015\_1

EEP4015\_2



EEP40500\_1

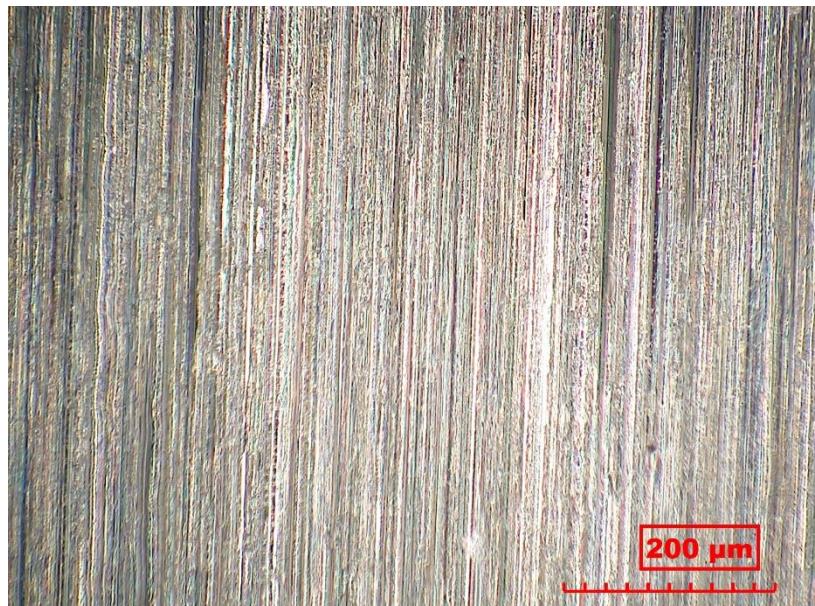
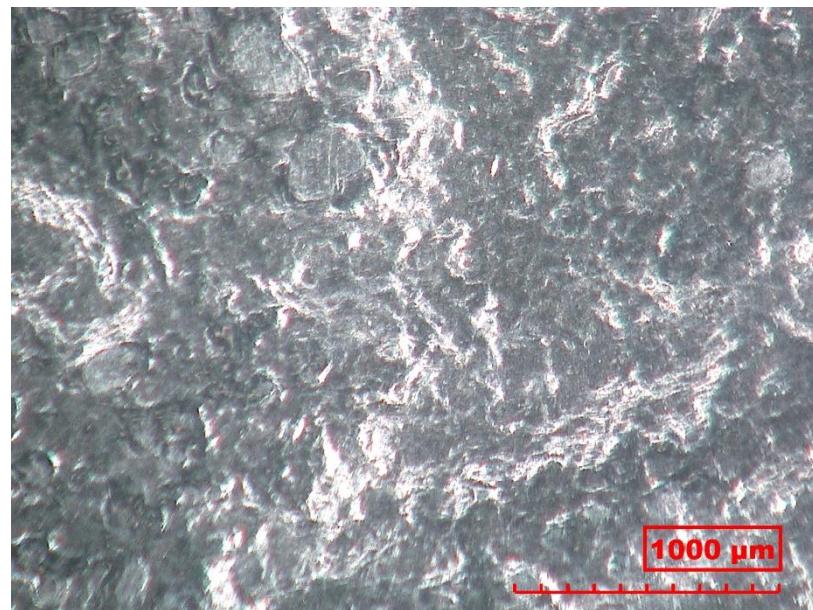
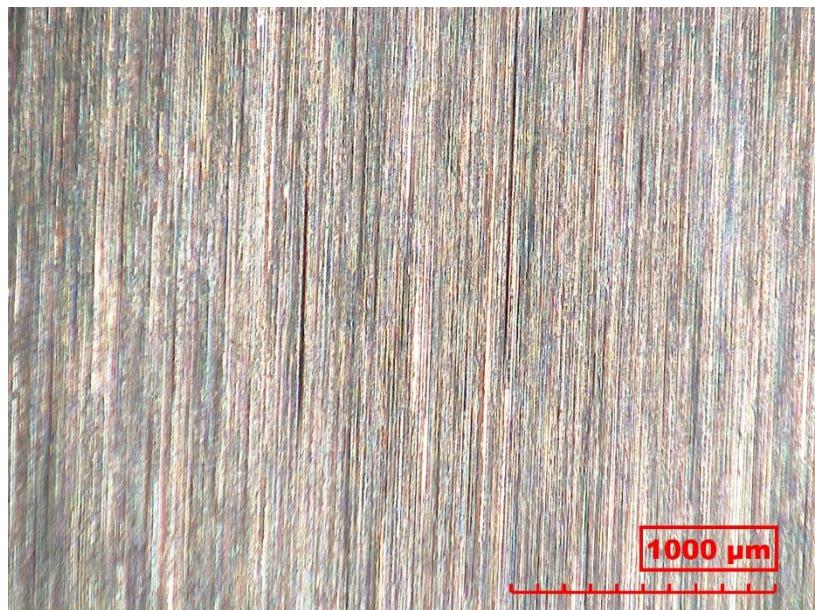
EEP40500\_2



MICRO

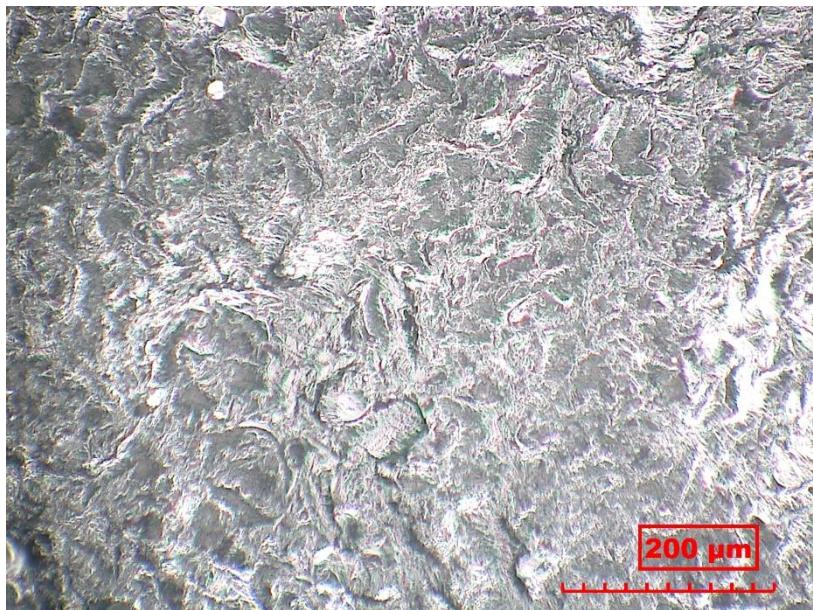
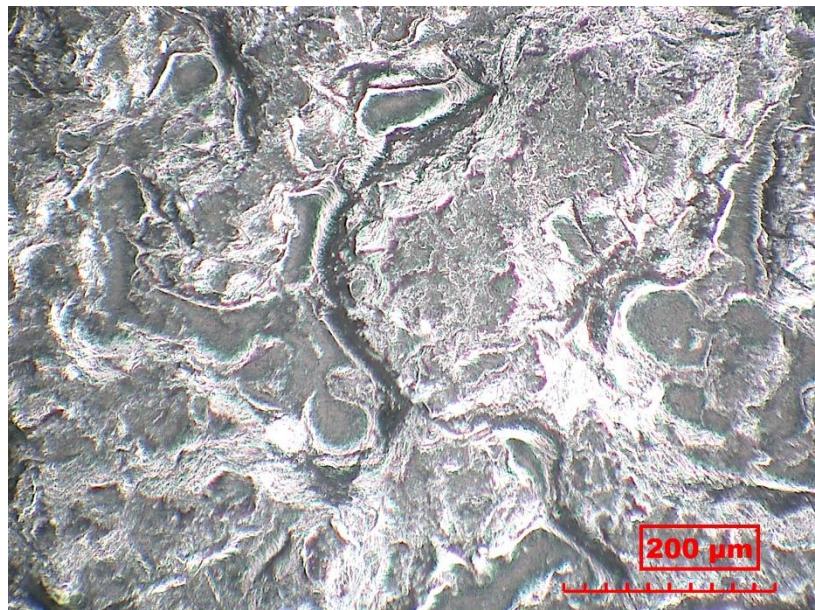
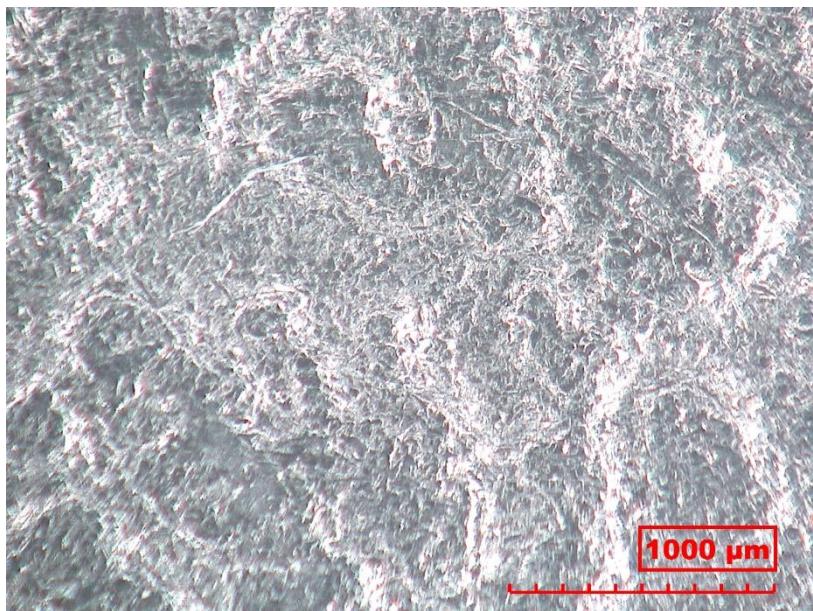
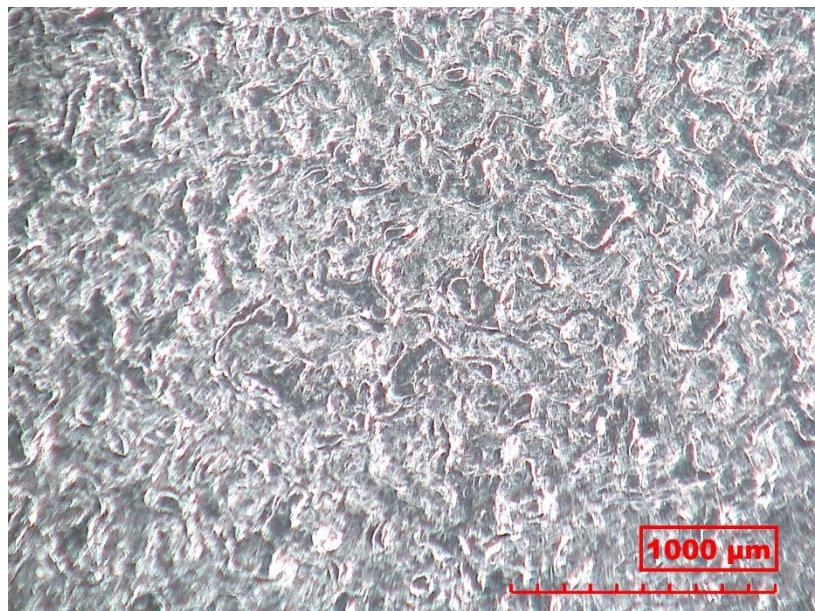
*Non disponible*

POLI



RECT

PSA0



PSA5

PSA83

## Annexe F : Instruction épreuve Napping

### Feuille d'instruction : Napping

**Durée du test :** 10 minutes

#### **Principe de l'évaluation :**

Il vous est demandé d'évaluer les ressemblances (ou dissemblances) entre plusieurs matériaux. Et ce, selon vos propres critères, ceux qui sont importants pour vous. Vous n'êtes pas tenu d'indiquer vos critères. Il n'y a pas de bonnes ou de mauvaises réponses.

#### **Mode opératoire :**

Vous placez les échantillons sur une feuille de papier : deux échantillons sont d'autant plus proches qu'ils vous paraissent semblables. Deux échantillons sont éloignés s'ils vous paraissent différents. Et, encore une fois, ceci selon vos critères. Prenez bien le temps d'explorer au toucher les surfaces proposées. Ne pas hésiter à marquer les différences, c'est-à-dire à utiliser toute la place disponible sur la feuille. Quand l'opération est terminée, vous écrivez sur la nappe le numéro de l'échantillon à l'emplacement qu'il occupe.

#### **Description complémentaire :**

Au cours de l'évaluation d'un échantillon, gardez en tête le ou les mots qui vous viennent à l'esprit pour le caractériser : puis, à la fin, reportez ces mots sur la nappe à côté de l'emplacement de ce produit. Merci d'indiquer votre âge sur un bord de la nappe à la fin du test.

N'hésitez pas à me demander si vous avez des questions supplémentaires.

*Merci de votre participation.*

## Annexe G : Données brutes essais tribologiques : deuxième exploration

Échantillons	Frottement statique	Frottement dynamique	Pente régime statique (N/s)	Amplitude oscillations (N)	Rq (µm)
EEP515_1	0,18	0,12	0,13	0,0062	0,6
EEP515_2	0,076	0,077	0,13	0,006	5,16
EEP2015_1	0,14	0,097	0,14	0,0056	0,417
EEP2015_2	0,11	0,07	0,12	0,0063	4,897
EEP4015_1	0,15	0,07	0,12	0,0072	0,752
EEP4015_2	0,21	0,12	0,14	0,0073	5,373
EEP5500_1	0,22	0,12	0,17	0,0063	0,262
EEP5500_2	0,19	0,1	0,17	0,0055	5,865
EEP20500_1	0,21	0,1	0,15	0,0051	0,429
EEP20500_2	0,19	0,12	0,16	0,006	2,364
EEP40500_1	0,17	0,1	0,11	0,0051	0,742
EEP40500_2	0,16	0,11	0,12	0,0055	3,3
MICRO	0,3	0,21	0,2	0,0086	2,336
POLI	0,21	0,12	0,22	0,051	0,092
RECT	0,28	0,21	0,22	0,063	0,654
PSA0	0,27	0,22	0,2	0,024	11,978
PSA5	0,22	0,16	0,22	0,008	7,313
PSA83	0,21	0,13	0,22	0,054	4,356

Tableau 16 : Données de frottement et de rugosité

## Annexe H : Données napping : coordonnées des échantillons

Échantillons	Coordonnées $\begin{pmatrix} X_j \\ Y_j \end{pmatrix}$ ( $i$ ) de l'échantillon $i$ dans la configuration du panéliste $j$																					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22
017	-7 257	-319 247	199 -231	288 9	230 -93	-365 -62	-128 -324	-17 258	230 216	-172 -158	273 -228	151 230	-162 312	-83 -88	-247 94	-148 -100	-121 -301	-80 -56	229 15	128 -162	92 -36	65 -162
089	-316 -162	245 245	-354 -78	-111 -218	-68 -259	232 377	305 -147	-139 82	-213 33	-134 140	-221 138	91 -33	293 -235	-116 261	46 335	-233 -341	216 108	-70 -299	181 234	-247 -119	411 76	-13 294
315	239 -185	-112 -368	300 25	-201 215	-222 11	-43 -179	324 109	222 -229	216 -106	-71 -319	324 86	-241 163	-14 227	85 -152	-111 -72	-279 41	-239 -213	164 79	189 -323	320 -96	-331 -143	130 -331
382	343 -27	-344 -168	295 -25	-288 -11	-87 37	-5 -290	210 208	-166 -335	-42 -321	-93 -327	89 -279	133 -302	172 -60	146 -295	-189 -162	-104 100	-127 81	328 29	-204 -112	166 -56	-324 116	293 -177
495	327 160	-135 127	236 -49	19 27	-21 249	-350 28	161 320	-184 -148	119 -322	-31 -144	-54 -266	338 -223	279 224	-332 -213	-279 -107	60 299	-270 51	203 196	-254 67	-323 127	-132 304	321 41
514	-81 237	-322 288	199 -231	300 8	275 -93	-259 -157	-105 -236	-92 245	230 216	-222 -168	191 -259	240 211	-165 278	-166 -126	-269 -204	-98 -114	-208 -307	-125 112	318 22	53 -167	105 -36	-203 -290
557	173 39	393 200	-34 1	246 -261	285 138	-69 80	-279 -10	195 40	348 6	217 -111	-229 -183	-294 -100	-80 20	48 -60	90 -220	-305 104	256 222	38 258	-64 -214	228 94	-366 -291	-64 -64
660	-148 210	-289 293	199 -231	310 8	253 -93	-235 -28	-217 -301	-157 112	159 262	-100 -142	221 -244	304 201	-163 300	-248 -161	-175 263	-49 -121	-47 -298	-331 105	221 -125	84 -71	127 -34	-9 -200
710	297 -147	-55 -376	104 287	-161 218	-94 -93	248 -219	150 39	293 -218	153 -101	25 112	218 255	-211 221	77 356	371 148	-6 -39	151 47	-243 -170	131 -69	277 -290	-7 -348	-346 -104	-74 -334
732	-208 184	-268 298	199 -231	-285 186	-318 24	102 -182	-57 -41	63 265	156 188	-46 102	300 -136	187 158	-165 288	180 36	-88 266	205 -98	-90 -166	4 106	323 -123	16 -43	157 -29	-113 -59
812	-36 -239	-249 -44	142 284	60 306	83 74	368 -36	79 220	-20 -213	-126 -173	124 144	319 -24	36 -253	350 121	278 99	125 -6	279 60	-251 -80	274 -128	-157 39	107 -370	-203 -292	106 -8
941	-189 -206	141 283	125 314	-77 -221	15 -255	200 183	73 -49	-3 107	-337 40	-235 127	-67 233	-33 -45	247 -250	-36 79	155 286	16 -386	8 100	181 -289	58 249	-132 -141	325 58	-118 123

Tableau 17 : Coordonnées des échantillons dans les différentes configurations

## Annexe I : Données napping : fréquence des mots

	Échantillons												
	Mots	017	089	315	382	495	514	557	660	710	732	812	941
<i>Relief</i>	Lisse	18	0	14	15	19	18	12	17	4	12	6	0
	Rugueux	0	16	0	2	0	0	0	0	12	7	13	14
	Texturé	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
<i>Dureté</i>	Reliéfē	0	3	0	0	0	0	16	0	0	0	0	2
	Dur	1	1	3	3	3	1	2	1	4	2	3	3
	Mou	4	0	0	0	0	5	0	4	0	4	0	2
<i>Chaleur</i>	Froid	1	0	17	15	12	1	1	1	16	2	13	0
	Tiède	3	2	0	0	0	3	1	3	0	1	0	2
	Chaud	5	5	0	0	0	4	4	4	2	4	1	4
<i>Accroche</i>	Accrochant	6	3	2	2	5	5	2	7	2	5	4	1
	Glissant	0	0	3	5	2	0	3	0	3	0	1	0
	Doux	1	0	0	0	4	1	4	1	2	2	0	1
<i>Type</i>	Plastique	5	6	0	0	0	4	0	3	0	3	0	3
	Métallique	0	0	4	0	0	0	0	0	5	0	0	0
	Céramique	0	0	0	6	5	0	0	0	0	0	6	0
<i>Hédonique</i>	Agréable	3	0	4	3	5	0	4	0	1	1	2	2
	Neutre	2	0	0	0	0	3	0	2	0	0	0	1
	Désagréable	1	3	1	1	1	0	1	1	2	3	0	1

Tableau 18 : Fréquence d'apparition des mots pour chaque échantillon

# **Apport d'une réflexion anthropocentrale pour la conception d'appuis dans les transports publics urbains**

## **Vers une nouvelle représentation du confort pour le passager**

### **Résumé**

Cette thèse porte sur la question de la perception des systèmes d'appuis situés à l'intérieur des transports publics urbains, premières interfaces entre l'usager et le matériel roulant, en vue d'améliorer leur confort. Une exploration a été effectuée afin d'objectiver le toucher des surfaces et tenter de caractériser instrumentalement l'interaction entre le voyageur et la surface d'appui, réduit à un toucher tangentiel et à un contact plan/plan. L'étude, liant tribologie et évaluation sensorielle, montre la difficulté inhérente à la mesure des sensations. Des tendances ont été observées entre les données tribologiques et sensorielles et encouragent à poursuivre dans cette voie. En outre, la question du confort est abordée de manière globale et un nouveau cadre d'étude est proposé. Les réflexions initiées ici souhaitent ouvrir la voie vers une nouvelle approche de la conception, l'approche anthropocentrale, venant compléter la vision actuelle très technocentrique du milieu ferroviaire.

**Mots-clés :** Approche sensorielle, Confort passager, Ingénierie anthropocentrale, Perception, Toucher tangentiel, Tribologie, Transport public urbain

# **Contribution of a human-centered reflection for the design of supports in urban public transports**

## **Towards a new representation of comfort for the passenger**

### **Abstract**

This thesis aims to improve passenger comfort in urban public transports by focusing on the perception of supports in the passenger compartment, which are the primary interfaces between the traveler and the rolling stock. An exploration was carried out in order to objectify the touch of surfaces and try to characterize instrumentally the interaction between the passenger and the support, reduced to a tangential touch and a planar contact surface. The study, linking tribology and sensory evaluation, shows the inherent difficulty of the measure of sensations. Tendencies have been observed between tribological and sensory data and encourage to continue on this path. In addition, the notion of comfort is addressed in a comprehensive manner and a new framework is proposed. The reflections initiated in this research wish to pave the way for a human-centered approach for conception, completing the current vision that is very technocentric in the rail environment.

**Keywords:** Human-centered engineering, Passenger comfort, Sensory approach, Tangential touch, Tribology, Urban public transport