



HAL
open science

Le rôle de l'émotion dans un processus de conception sensorielle

Cyril Bertheaux

► **To cite this version:**

Cyril Bertheaux. Le rôle de l'émotion dans un processus de conception sensorielle. Autre. Université de Lyon, 2020. Français. NNT : 2020LYSEE005 . tel-03162844

HAL Id: tel-03162844

<https://theses.hal.science/tel-03162844>

Submitted on 8 Mar 2021

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

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



N° d'ordre NNT : 2020LYSEE005

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON

opérée conjointement

**au sein de l'Ecole centrale de Lyon
et de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne**

**Ecole Doctorale N° 488
Sciences Ingénierie Santé**

Spécialité

Mécanique et Ingénierie

Soutenue publiquement le 18/11/2020, par :

Cyril BERTHEAUX

Le rôle de l'émotion dans un processus de conception sensorielle

Devant le jury composé de :

M. LAURENT Bernard	PUPH,	CHU de Saint-Etienne	Président du Jury
MME. MORET-TATAY Carmen	Professeure,	Universidad de Valencia, Espagne	Rapporteur
M. HOT Pascal	Professeur des Universités,	Université de Savoie, Chambéry	Rapporteur
M. CHARIER David	Docteur médecine et science,	CHU de Saint-Etienne	Examineur
M. FORTUNIER Roland	Professeur des Universités,	ISAE-ENSMA, Poitiers	Directeur de thèse
M. TOSCANO Rosario	Professeur des Universités,	Univ. Lyon, ENISE, Saint-Etienne	Co-directeur de thèse
MME. BORG Céline	Professeure,	Université Catholique de Lyon	Encadrante
M. ROUX Jean-Christophe	Maître de conférences,	Univ. Lyon, ENISE, Saint-Etienne	Encadrant

REMERCIEMENTS

Cette thèse a été l'occasion de découvrir différents domaines d'activité, de mieux connaître le sensoriel et l'émotion. Je souhaite remercier plusieurs personnes pour l'aide apportée.

Je tiens à remercier le Pr. **Roland FORTUNIER**, mon Directeur de Thèse et initiateur de cette thématique pour avoir dirigé mes travaux de recherche avec passion, humanité et largueur d'esprit. J'ai particulièrement apprécié son approche méthodologique basée sur la connaissance, l'approfondissement, le dépassement de soi-même qui permet de dégager des apports dans chacune des démarches entreprises pour mener à terme cette thèse. A ses côtés, j'ai découvert l'ampleur et la complexité de la recherche, des sciences du sensoriel et des sciences affectives. Ensemble, nous avons apporté une contribution à cette thématique et plus particulièrement aux approches émotionnelles en conception. Merci d'avoir été ce dirigeant exigeant, impliqué, attachant et d'une très grande compétence.

Je tiens à remercier le Pr. **Rosario TOSCANO**, mon Co-directeur de Thèse qui depuis 2003 suit l'ensemble de ma progression et toutes les étapes de maturation de ce projet de thèse, de la naissance au développement des bases méthodologiques. J'ai apprécié ses qualités humaines, son ouverture d'esprit, sa qualité d'écoute, sa bienveillance et sa grande disponibilité. Ses connaissances multidisciplinaires et scientifiques auront permis de repousser très loin les limites de mes considérations et modèles d'interprétations mathématiques. Ses enseignements théoriques m'auront également été très profitables. Nous avons partagé de nombreux moments, beaucoup travaillé et avancé de concert. Son accompagnement m'a permis d'acquérir un haut niveau de savoir-faire et de m'ouvrir à de nouvelles thématiques. Je n'oublierai jamais ton implication et nos nombreuses discussions.

Je tiens à remercier le Pr. **Céline BORG** du Laboratoire CMRR (*Centre Mémoire Ressources et Recherche*), Département de Neurologie, CHU de Saint-Etienne ; ma Co-encadrante de Thèse pour la qualité de son accueil, son implication, sa grande disponibilité et la portée de ses nombreuses contributions scientifiques. Son accompagnement et sa notoriété se sont révélés indispensables pour conduire une thématique sur l'émotion en sciences de l'ingénieur. Son importante contribution a permis la mise en œuvre de nombreux protocoles d'évaluation autour des processus émotionnels et cognitifs, d'améliorer notre connaissance sur les aspects neuroanatomiques, de connaître les matériels utilisés en métrologie de l'émotion. Merci pour le temps passé ensemble, votre générosité et le bien fondé de vos conseils.

Je tiens à remercier M. **Jean-Christophe ROUX** (Maître de Conférences), mon Co-encadrant de Thèse pour le soin méthodologique et la rigueur scientifique apportés à la construction des modèles mathématiques. Pour le temps qu'il m'a consacré, la qualité des conseils qu'il a su me prodiguer tout au long de ma thèse et plus particulièrement dans les connaissances approfondies en statistiques. Pour son regard critique nécessaire à tout progrès et ses remarques pertinentes qui m'auront permis d'avancer. Merci de m'avoir guidé, aidé à trouver ma place au Laboratoire et pour ton accompagnement paternel, riche d'enseignements scientifiques.

Je remercie le Pr. **Bernard LAURENT** (PUPH), Neurologue du CHU de Saint-Etienne (ancien Président des Sociétés françaises de la douleur, de neuropsychologie et de neurologie ; membre de l'académie de médecine), d'avoir accepté de présider mon jury de thèse.

Je remercie le Pr. **Carmen MORET-TATAY**, Professeur d'enseignement et de recherche à l'Université de Valence « San Vicente Mártir », Département de Psychologie, Espagne, de l'honneur qu'elle m'a fait en étant rapporteur de ma thèse.

Je remercie le Pr. **Pascal HOT**, Professeur au laboratoire de Psychologie et Neurocognition (LPNC), équipe Vision & Emotion (membre senior de l'Institut Universitaire de France), de l'honneur qu'il m'a fait en étant rapporteur de ma thèse.

J'exprime ma gratitude au Dr. **David CHARIER**, Anesthésiste-Réanimateur du CHU de Saint-Etienne, spécialiste du monitoring de la douleur en pupillométrie, d'avoir bien voulu participer au jury en qualité d'examineur de ma thèse.

Je tiens à remercier Agnès LEPICARD (*Conservatrice du patrimoine*), Christelle FAURE (*Service régie et valorisation des collections*), Anne DE LA LANDE (*Service inventaire collection - Département des collections*), Yves Bresson (*Crédit Photo*) du Musée d'art moderne et contemporain de Saint-Étienne Métropole et Alexandre PEUTIN (*Chargé de matériauthèque*) de la Cité du Design de Saint-Étienne, pour avoir facilité les démarches contractuelles relatives à l'emploi d'images de chaises dans un but de recherche. Ces images de chaises proviennent toutes des collections publiques françaises constituées par le Musée d'art moderne et contemporain de Saint-Etienne.

Je tiens à remercier mes collègues de l'ENISE, du LTDS qui ont contribué de près ou de loin à mes travaux de thèse, M. **Louis JEZEQUEL** et M. **Hassan ZAHOUANI** qui ont subventionné une partie de mes projets et porté une attention toute particulière à la thématique, M. **Philippe BERTRAND**, M. **Christophe CLAUDIN**, Mme. **Clémentine DIDIER**, Mme. **Maria DOUBENSKAIA**, Mme. **Virginie DUMAS**, M. **François-Marie LARROUTOUROU**, Mme. **Isabelle PLETTTO**, M. **Joël RECH**, M. **Amir SI LARBI**, Mme. **Carmela TARDY**, qui ont participé à différentes étapes de développement de ce projet, les **élèves ingénieurs de la spécialité Génie Physique - Parcours Génie sensoriel** pour la participation à de nombreux tests, à la conduite de protocoles de recherches et M. **Jean-Claude DUMAS**, mon fidèle ami, Maître de conférences qui m'a accompagné et très souvent encouragé durant ma progression au sein de l'ENISE/ECL.

Je tiens à remercier ma famille, mes parents **Annick** et **Louis**, ma compagne **Nathalie**, mon frère **Cédric**, son mari **Mathieu** ; mes amis **Jean-Paul BODIN** et **Jean BRUASSE** pour le soutien qu'ils m'ont apporté, pour leur patience, pour leur compréhension.

Je dédie ce travail à ma fille **Amélia** et ses frères **Adrian** et **Romain** en leur souhaitant les meilleures conditions pour leur vie future.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
PARTIE I – LE PROCESSUS DE PERCEPTION	5
CHAPITRE 1 – DES SENSATIONS A L'EMOTION	7
1. Le système sensoriel	8
1.1 La vue	9
1.2 Le toucher	12
1.3 L'odorat	15
1.4 L'ouïe	16
1.5 Le goût	18
2. Le Système Nerveux	19
2.1 Le Système Nerveux Central	19
2.2 Le Système Nerveux Périphérique	23
3. Les émotions	25
3.1 Déclenchement de l'émotion	25
3.2 Réactions émotionnelles	28
4. Conclusion	38
CHAPITRE 2 – ANALYSES EXPERIMENTALES	39
1. Toucher de la surface d'un matériau	39
1.1 Choix des matériaux	40
1.2 Caractérisations physiques	42
1.3 Protocole expérimental	44
1.4 Mesures	46
1.5 Résultats des mesures verbalisées	48
1.6 Résultats des mesures de pupillométrie	51
1.7 Discussion	56
2. Visualisation d'une image	59
2.1 Choix des images	60
2.2 Protocole et mesures expérimentales	62
2.3 Résultats des mesures verbalisées	64
2.4 Résultats des mesures de pupillométrie	66
2.5 Discussion	70
3. Conclusion	72

PARTIE II – LE PROCESSUS DE CONCEPTION	77
<hr/>	
CHAPITRE 3 – ATTENTES EMOTIONNELLES EN CONCEPTION	79
1. Analyse sensorielle et conception anthropocentrée	80
1.1 Recueil du besoin émotionnel	82
1.2 Analyse du comportement émotionnel du consommateur	84
1.3 L'expérience client : satisfaction et plaisir	86
2. Méthodes d'évaluation de la valeur hédonique	91
2.1 Méthodes non-supervisées	92
2.2 Méthodes supervisées	94
3. Modèle multidimensionnel de préférence	110
3.1 L'analyse conjointe	110
3.2 La Cartographie des préférences	110
4. Conclusion	112
CHAPITRE 4 – ETUDES DE CAS	115
1. Description du modèle multidimensionnel de préférence	116
1.1 Définition de l'espace produit	116
1.2 Evaluation de l'axe « Sensations »	117
1.3 Développements mathématiques sur l'étude des préférences	118
1.4 Evaluation de l'axe « Emotions »	121
1.5 Opérateur d'agrégation	124
2. Analyse des préférences sur des gants de cuisine	125
2.1 Protocole expérimental	126
2.2 Résultats relatifs à l'étude des préférences	127
2.3 Résultats relatifs à l'évaluation émotionnelle	128
2.4 Opérateur d'agrégation et décision finale	129
2.5 Discussion	130
3. Evaluation émotionnelle de chaises	131
3.1 Analyse de l'espace produit complet	132
3.2 Analyse des descripteurs	136
3.3 Discussion	141
4. Conclusion	142
<hr/>	
CONCLUSION GENERALE	145
<hr/>	
REFERENCES	153

INTRODUCTION

Depuis l'arrivée de la conception anthropocentrée dans les années 1990, on assiste au développement d'une société émotionnelle. Cette évolution sociétale trouve ses origines à la fin du moyen âge quand le peuple « s'émeut » à la vision de peintures, sculptures parfois dérangeantes ou que le peuple ressent de « l'effroi » à la vue du sang lors des exécutions publiques. L'émotion apparaît alors comme étant « un mouvement de l'âme » qui entraîne « troubles » et « sédition ». Le trouble désigne les « mouvements de foule », mais également les « troubles de l'âme », la sédition évoque « la révolte des organes ». Le sens aujourd'hui donné à l'émotion vient du XVIIIème siècle, avec l'apparition des mouvements littéraires, culturels et artistiques qui ont montré que le sentiment s'éduque, se transforme, s'étoffe grâce à l'éducation des populations. Par exemple, l'importance de la raison que l'on opposait souvent à l'émotion a progressivement été remise en question, et le lien entre les émotions et les comportements rationnels a été largement étudié. Parallèlement, on constate que les consommateurs ont changé de mentalité. Alors qu'ils privilégiaient autrefois les achats de première nécessité, ils préfèrent aujourd'hui consommer des produits « plaisirs », « ludiques », qui intègrent une importante valeur émotionnelle. Ceci a contraint les industriels à constamment développer de nouveaux produits destinés à « réveiller le désir » du consommateur. La « désirabilité » de l'objet repose sur une multitude de critères, et nous savons aujourd'hui que la décision d'achat repose à 50% sur des critères rationnels, et à 50% sur des critères émotionnels. Les attentes relatives aux besoins fonctionnels, d'usages, de performances ont déjà été bien documentées et maîtrisées. Mais l'étude de la valeur hédonique d'un produit est plus compliquée à évaluer. La valeur hédonique se mesure au travers de la qualité perçue, qui correspond à l'écart entre les attentes et les performances, ainsi qu'à l'évaluation de plusieurs dimensions du produit comme l'expressivité, la sensorialité, la rareté, la nouveauté, la valeur émotionnelle, ..., autant de composantes qu'il est nécessaire d'évaluer en conception sensorielle.

L'objectif de ce travail est de contribuer au développement de méthodes destinées d'une part à estimer la valeur perçue d'un objet par un sujet, et d'autre part à incorporer cette valeur dans des méthodes de conception. Le document est donc divisé en deux grandes parties :

- La première partie est dédiée au processus de perception. Les Chapitres 1 et 2 visent à mieux connaître les mécanismes physiques à l'origine de la valeur perçue, pour pouvoir mieux la mesurer.
- La seconde partie est dédiée au processus de conception. Les Chapitres 3 et 4 visent à introduire ces mesures de valeur perçue dans des outils, puis à mettre en place des modèles de dépouillement destinés à toujours mieux satisfaire les attentes du consommateur.

Le schéma de la Figure 1 permet de mieux comprendre le lien entre ces deux parties. Dans ce schéma, la perception est divisée en deux axes, un dédié à l'objet, l'autre dédié au sujet :

- Dans l'axe « Sensations », dédié à l'objet, les mesures sensorielles permettent d'évaluer la sensorialité d'un produit, via ses propriétés organoleptiques.
- Dans l'axe « Emotions », dédié au sujet, les mesures émotionnelles permettent d'évaluer les ressentis du consommateur, via l'impact de cette sensorialité.

Dans chacun de ces axes, les mesures peuvent être réalisées par des panels, ou par des mesures instrumentées. Ces mesures sont ensuite incorporées dans des modèles de préférences utilisés par

les outils de conception. La première partie de ce document est donc une lecture « de gauche à droite » de la Figure 1, pour aller de la sensation à l'émotion, tandis que la seconde partie est une lecture « de haut en bas », pour aller des mesures aux modèles de préférences.

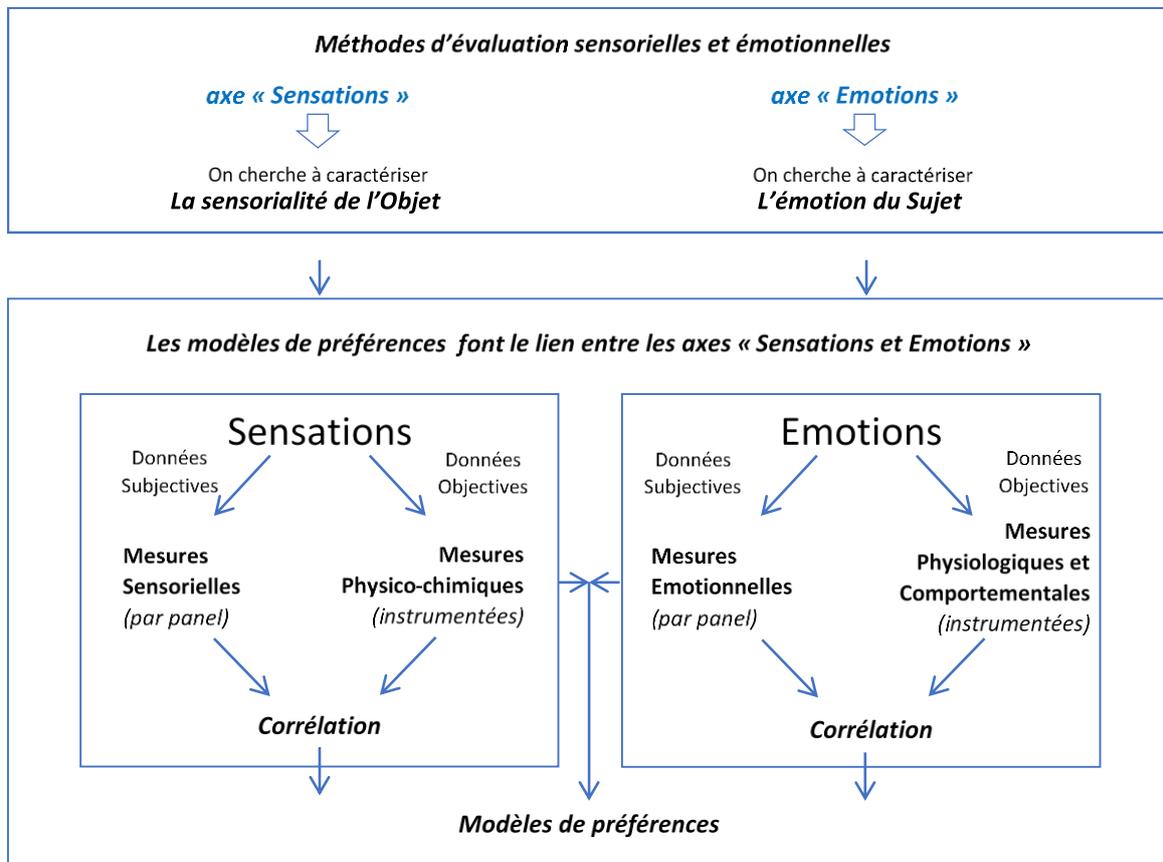


Figure 1 - Axes « Sensations » et « Emotions », menant à l'étude de la valeur perçue d'un objet par un sujet, puis à son incorporation dans des modèles de préférences

L'analyse du processus de perception est le thème de notre première partie. Il repose sur l'étude des « sensations » et des « émotions », qui demande d'importantes connaissances en neuro-cognition. En effet, nos « sensations » et nos « émotions » sont traitées au niveau du système nerveux humain. Partant du principe que la perception est un processus d'intégration mentale de contenus provenant de nos récepteurs sensoriels, nous présentons dans le Chapitre 1 le schéma neuro-fonctionnel des stimuli allant de la sensation à l'émotion. Nous retraçons le cheminement du message sensoriel provenant de nos cinq sens jusqu'au cerveau, en distinguant les zones cérébrales impliquées dans les traitements sensoriels et émotionnels. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'estimation cognitive des attributs utilitaires, fonctionnels, sensoriels et émotionnels, réalisée lors de traitements inconscients et végétatifs qui conditionnent la réponse émotionnelle et le niveau d'activation corporelle.

Le Chapitre 2 présente ensuite un ensemble d'expérimentations dans lesquelles des mesures physiologiques par pupillométrie sont corrélées à des mesures subjectives de l'émotion, via un questionnaire. Le protocole est décrit dans la Figure 2. Le ressenti émotionnel est estimé selon deux dimensions, la valence et l'arousal, telles qu'elles sont définies dans le Model Circumplex de Russel (1980). Les premiers stimuli utilisés sont tactiles, de proximité, avec différentes surfaces présentant

des caractéristiques plus ou moins agréables et des rugosités différentes. Les seconds stimuli sont visuels, plus lointains. Ils reposent sur une banque d'images dont les caractéristiques émotionnelles ont été prédéfinies et calibrées. L'étude des corrélations entre les mesures de pupillométrie et les réponses aux questionnaires nous permettra de proposer des axes de travail sur le processus de perception et l'estimation de la valeur émotionnelle.

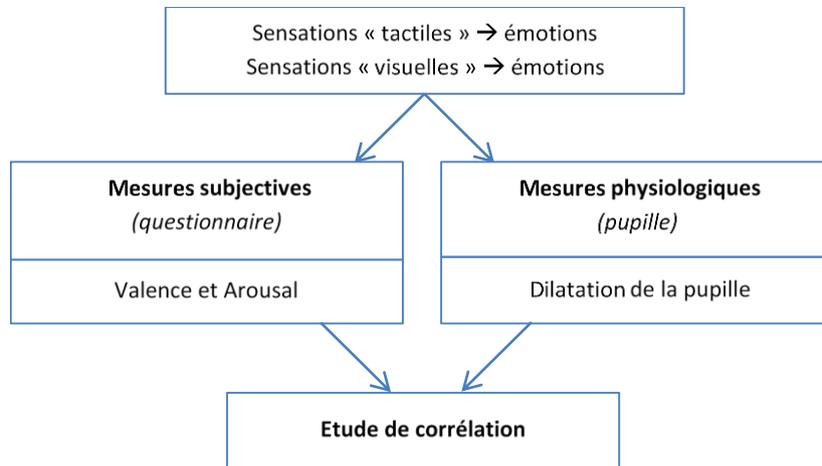


Figure 2 – Expérimentations de la partie dédiée au processus de perception

La seconde partie de ce document est consacrée aux processus de conception. Nous présentons dans le Chapitre 3, les évolutions de notre société, qui ont conduit les industriels à mieux intégrer les attentes du consommateur et à écouler de plus en plus de produits. L'apparition sur le marché de nouveaux produits concurrents, fiables et fonctionnels, a amené les concepteurs à jouer sur les valeurs perçues et les valeurs émotionnelles pour s'assurer de l'acceptabilité du consommateur. Nous verrons que les émotions sont assez peu étudiées en conception de produit. En conception de produit, on préférera plutôt identifier les besoins, établir les tendances du marché, estimer la valeur esthétique, l'originalité, l'élégance, le confort, la performance, l'efficacité, la facilité d'utilisation, classifier les préférences, rechercher les bugs perceptifs, les motifs d'aversion, évaluer la lassitude, définir la sensorialité d'un produit, l'ambiance qui environne l'expérience de consommation, établir le comportement du consommateur, positionner un produit sur la base de descripteurs sensoriels et/ou émotionnels. Ces évaluations sont généralement réalisées par des services marketing, des instituts de sondages, des agences de prospectives, des bureaux de tendances, des bureaux de styles et plus rarement par les concepteurs, ingénieurs, designers, eux-mêmes.

La plupart des méthodes d'évaluation de la valeur perçue reposent actuellement sur des analyses sémantiques. Ces méthodes peuvent être séparées en deux catégories : les méthodes qui consistent à recueillir librement des attributs sensoriels et émotionnels, et les méthodes qui consistent à guider l'évaluation en proposant des attributs prédéfinis. Or, on retrouve ces deux catégories dans le domaine de l'apprentissage automatique :

- Dans l'apprentissage non-supervisé on connaît uniquement les entrées. Par exemple dans le cas de la segmentation, on classe les données suivant un critère de similarité choisi a priori. C'est ainsi que des données libres sont communiquées à l'algorithme qui les regroupe en classes conformément aux critères de similarité choisis.
- Dans l'apprentissage supervisé on connaît les entrées et les sorties. Par exemple dans le cas de la classification, on dispose d'éléments déjà classés et on cherche à classifier de nouvelles

données. Le concepteur du système oriente l'algorithme en lui fournissant des exemples qu'il considère comme pertinents au regard des résultats qu'il attend. L'algorithme apprend en comparant avec les exemples qui sont proposés. Au fil de l'entraînement, le système réduit sa marge d'erreur et améliore les résultats.

Nous présentons donc les méthodes actuelles permettant l'évaluation des axes « sensoriel » et « émotionnel » en distinguant les approches supervisées des approches non-supervisées. Nous verrons que les attributs qui décrivent les ressentis hédoniques sont nombreux et souvent mal adaptés à la mesure de l'émotion. Ils ne permettent pas toujours d'explicitier l'attitude du consommateur, ni d'estimer les critères d'achat, compte-tenu de la multitude de critères que le consommateur intègre dans son jugement. Nous terminons le Chapitre 3 en présentant les modèles de préférences qui permettent d'identifier et de hiérarchiser les « facteurs saillants » qui sont susceptibles de favoriser l'attractivité du consommateur.

Dans le Chapitre 4, nous présentons un modèle multidimensionnel de préférence qui permet d'identifier quels sont les facteurs déterminants dans l'acceptabilité du consommateur, à partir de mesures sur l'axe « Sensations » et sur l'axe « Emotions ». Ce modèle est ensuite appliqué à deux cas de conception incluant la valeur hédonique du produit. La première étude de cas porte sur l'analyse de plusieurs configurations de gants de cuisine afin d'établir quels sont les attributs qui affectent le jugement du consommateur. Le consommateur effectue son choix en se basant sur une sélection de produits que nous regrouperons sous l'appellation d'espace produit. Ces différents produits se distinguent par des caractéristiques fonctionnelles, utilitaires, sensorielles et émotionnelles. Pour retenir l'attention du consommateur, le concepteur devra établir la configuration idéale du produit. L'utilisation d'un modèle de préférences nous permettra d'étudier quelles composantes émotionnelles et perceptives sont importantes dans le développement d'un nouveau gant de cuisine. La seconde étude de cas est consacrée à l'analyse émotionnelle d'images de chaises dans un contexte de commerce électronique. Il s'agira de déterminer quels descripteurs d'apparence sont évalués lors de l'appréciation des chaises. Cette étude vise à identifier les critères utilitaires et hédoniques qui interviennent dans le jugement émotionnel de chaises de manière à déterminer les caractéristiques « produit » qui généreront la meilleure réponse émotionnelle pour motiver l'achat.

En conclusion, nous résumons les principaux résultats obtenus dans le cadre de ce travail, d'une part sur les mesures physiologiques de l'émotion primaire par pupillométrie, et d'autre part sur la détermination des préférences des utilisateurs à l'aide d'un modèle multidimensionnel de préférence, puis nous évoquons les perspectives offertes par cette approche pour la prise en compte de l'émotion dans le processus de conception sensorielle.

PARTIE I

LE PROCESSUS DE PERCEPTION

CHAPITRE 1

DES SENSATIONS A L'EMOTION

La perception est un processus d'intégration mentale de contenu sensible, c'est-à-dire de transfert vers le cerveau d'informations provenant de nos récepteurs sensoriels. Les perceptions sont initiées par nos sens, puis nous apparaissent sous la forme d'images mentales conscientes (Merleau-Ponty & Carman, 2013). La perception a un fonctionnement basé sur différentes modalités ayant toutes un rôle différent, et qui interagissent entre elles. En présence d'un feu, l'œil perçoit les couleurs, les formes, les mouvements des flammes. Avec nos oreilles, nous entendons le bruit du craquement des branches. A la surface de notre peau nous percevons la chaleur du feu. Le cerveau perçoit toutes ces modalités simultanément. Le cerveau traite indépendamment chaque modalité puis les analyse dans leur globalité. Le cerveau est en mesure de prioriser ces sensations en fonction de leur caractère d'importance et nos sens s'associent pour construire la perception. Si le feu s'intensifie brusquement, notre peau percevra l'augmentation de la chaleur qui engendrera un réflexe d'évitement en effectuant un pas en arrière. La perception intègre donc une composante subjective ou émotionnelle. Elle comprend une information émotionnelle (*le sentiment d'une brève frayeur*) qui sera rapidement inhibée une fois le danger écarté.

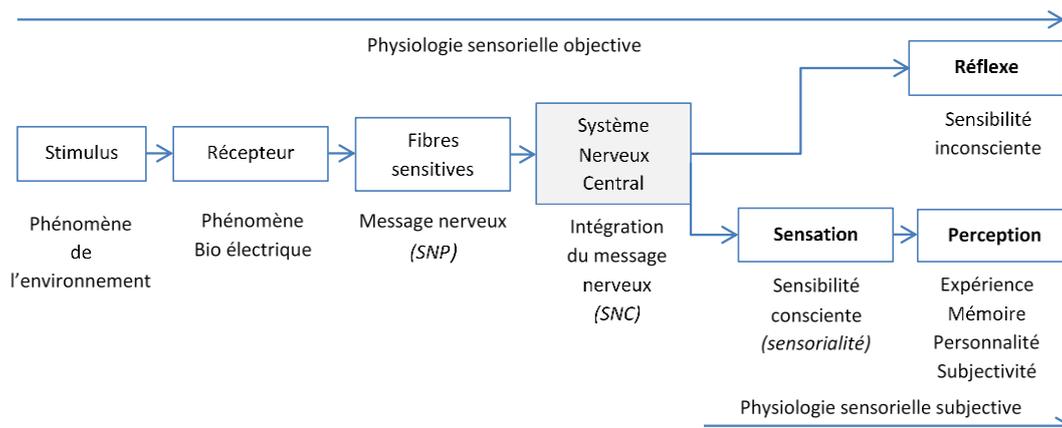


Figure 1.1 - Représentation du processus de perception (Finke & Schmidt, 1978)

La Figure 1.1 donne la représentation du processus de perception proposée par Finke et Schmidt (1978). Dans cette figure, le signal capté lors d'un stimulus est transmis via le système nerveux au cerveau, où il est analysé. Selon Damasio (1994), cette analyse peut faire appel à nos souvenirs pour générer des émotions. Nous intégrons en effet des souvenirs tout au long de notre vie, et nous emmagasinons chaque jour le résultat de nos stratégies comportementales, conduisant au plaisir, à l'évitement... Notre bibliothèque émotionnelle nous sert à appréhender le monde et notre environnement. Au fil de nos expériences, ces souvenirs évoluent, s'enrichissent. Nous nous souvenons de chaque expérience, et plus particulièrement des expériences qui ont suscité de fortes émotions (Lindstrom, 2010).

Dans la vie de tous les jours, notre cerveau effectue constamment des traitements inconscients d'informations sensorielles, et des traitements conscients qui intègrent des raisonnements (Buizard, 2015). L'inconscient effectue donc des traitements qui échappent à notre contrôle. Par exemple, un chiffre affiché moins de 50 ms pendant un film échappe à notre conscience, alors que plusieurs zones du cerveau ont déjà réalisé un traitement implicite (Dehaene & Changeux, 2004). L'expression d'une perception repose donc sur un traitement à la fois implicite résultant de nos voies sensorielles et explicite résultant d'un processus d'intégration mentale.

Stimulations sensorielles (périphériques)				Traitement cérébral			
Système sensoriel	Nature du stimulus	Organe récepteur	Lieu de formation	Inconscient		Conscient	
				Perceptions	Réactions physiologiques	Interprétation par le cerveau	Réponse comportementale
Vue	Lumière	Pupille (<i>photo-récepteurs</i>)	Pupille, nerf optique, Corps Genouillé Latéral, Cortex visuels	Taille Luminance Chrominance	Reflexe photo-moteur, constriction, dilatation, reflexe de protection, activité physiologique	Mouvement, forme, contour, couleur, distance, qualité, reconnaissance, ...	Attention, approche, évitement, caractérisation, expressions faciale et posturale, émotions
Audition	Vibrations de l'air	Pavillon, tympan, Cochlée	Cellule ciliées, organe de Corti, thalamus, cortex auditifs	Fréquence Intensité Timbre	Eveil, motivation, apaisement, excitation, activité physiologique	Tri, volume, qualité, distance, reconnaissance, ...	
Somesthésie							
- Sensibilité tactile	Contraintes mécaniques	Peau et muqueuses	Corpuscules de Ruffini, Pacini, Merkel, Meissner	Rugosité Contours Reliefs	Erection pileaire, modulation de la force, déplacement	Taille, forme, relief, reconnaissance, ...	
- Sensibilité kinesthésique	Contraintes mécaniques	Muscles et tendons et ligaments	organes tendineux de Golgi, Ruffini, Pacini, tendons, ...	Dureté Elasticité Plasticité	Erection pileaire, mouvement reflexe, déplacement	Mouvement, déformation, proprioception	
- Sensibilité thermique	Surface en contact direct	Peau et muqueuses	Terminaisons libres, organes de Krause, Ruffini, ...	Chaud Froid	Erection pileaire, réponse physiologique	Température, qualité, douleur reconnaissance, ...	
- Sensibilité chimique générale	Molécules en contact direct	Muqueuses	Récepteurs polymodaux silencieux, fibres peri-vasculaires	Piquant Brûlant Irritant	Démangeaison, inflammation, réponse physiologique, ...	Douleur, qualité, reconnaissance, ...	
Goût	Molécules en solution dans la salive	papilles, bourgeons du goût	Noyau du faisceau solitaire, thalamus, Cortex frontal, ...	Acidité Amertume Sucré, salé Umami	motivation alimentaire, réponse physiologique, ...	Douleur, qualité, reconnaissance, ...	
Olfaction	Molécules en phase gazeuse	Epithélium, cils, récepteurs olfactifs	Bulbe, tractus olfactif, cortex olfactif	Intensité de l'odeur d'arômes caractère odotopique	Respiration, protection nasale	Signature olfactive, qualité, reconnaissance, ...	
Cheminement des influx nerveux par le Système Nerveux Périphérique (SNP), des récepteurs sensoriels au Système Nerveux Central (SNC)				Systèmes nerveux somatique, Systèmes nerveux endocrinien, Systèmes nerveux autonome. Nerfs, Moelle spinale, Bulbe rachidien, méencéphale, ... Fonctions bas niveau.		Système nerveux central, système limbique Fonctions bas et haut niveau.	
Sensations				Emotions primaires		Emotions Secondaires	

Figure 1.2 – Processus d'intégration des stimuli du système sensoriel à la réponse émotionnelle

Nous proposons en Figure 1.2 un processus d'intégration des stimuli du système sensoriel, menant à la réponse émotionnelle. Ce chapitre est construit en suivant ce processus. Nous commençons donc par une description de notre système sensoriel, composé de nos cinq sens, en approfondissant plus particulièrement les sens du toucher et de la vue. Ensuite, nous présentons le système nerveux humain, véhicule principal de nos sensations vers le cerveau. A la fin de ce chapitre, nous donnons le modèle que nous utiliserons dans ce document pour représenter les émotions.

1. Le système sensoriel

Aristote a établi dans son traité de l'âme une classification des cinq sens : la vue, l'ouïe, le goût, l'odorat et le toucher. Beaucoup plus tard Vugò (1945) décrit les sens comme étant :

Un système de récepteurs, ou cellules sensibles, capable de capter et de traduire plusieurs formes d'énergie (stimuli) et de les transmettre au système nerveux central sous forme d'influx nerveux. Ces influx nerveux, les sensations proprement dites, sont alors interprétés par l'encéphale, ou son équivalent chez les espèces qui en sont dépourvues, pour en permettre la perception. L'influx nerveux est ensuite codé sous forme de potentiels d'actions et l'information transmise à des régions spécialisées du cerveau. Selon le type de stimulation, les centres de traitement du cerveau diffèrent. Il existe en effet une zone spécialisée dans le traitement des stimuli olfactifs, visuels, tactiles, etc...

D'autres travaux complémentaires ont permis d'établir l'importance des systèmes sensoriels dans les relations affectives. Selon Hall (1966), la distance sensorielle traduit notre degré d'affinité (Figure 1.3). Ses observations ont débouché sur la réalisation d'une sphère relationnelle qui établit le rapport entre la distance et l'implication affective des individus. Les cinq sens sont répartis en deux catégories :

- Les récepteurs à distance (*vue, ouïe et odorat*), qui permettent une approche affective lointaine,
- Les récepteurs immédiats (*toucher et goût*), qui permettent une approche affective de proximité, et qui demandent à l'individu de faire sa propre démarche d'expérimentation de la sensation.

Dans un acte d'achat, sens et émotion sont très liés. Ainsi, il apparaît par exemple que les récepteurs immédiats entraînent un comportement plus émotionnel que les récepteurs lointains (Hetzel, 2002). Dans le cadre de nos travaux, nous avons utilisé un récepteur lointain (*la vue*) et un récepteur immédiat (*le toucher*) pour évaluer l'émotion. Nous les décrivons ici en détails, avant de présenter plus rapidement les autres sens.



Figure 1.3 – Rapport entre distance au produit et implication affective d'après Edward T. Hall (1966)

1.1 La vue

Le système visuel est souvent comparé à un appareil photo. L'Iris contrôle la quantité de lumière qui rentre dans l'œil par la pupille, tandis que la netteté de l'image est contrôlée par la déformation du cristallin. La vue est le sens dominant de l'homme, car il lui permet de se projeter à long terme, d'anticiper, de planifier des actions. C'est en grande partie sur la base de contenus visuels que l'on analyse notre environnement, que l'on perçoit les dangers, que l'on effectue la lecture des postures, des expressions faciales, des scènes susceptibles de devenir menaçantes ou de plaire... Enfin, la vue nous permet de percevoir de nombreuses caractéristiques d'un objet, d'en percevoir la qualité ou les défauts (Schifferstein & Cleiren, 2005).

latéral, puis dans le cortex visuel. Pour parvenir au cortex primaire visuel, une partie des messages visuels (*partie temporale*) emprunte une voie « directe » située dans le même hémisphère cérébral, l'autre partie (*partie nasale*) emprunte une voie qui croise au niveau du chiasma optique pour rejoindre l'hémisphère cérébral opposé. Il faut noter que l'image obtenue sur la rétine est renversée de haut en bas et inversée de gauche à droite. Le cerveau interprète les images reçues par la rétine et restitue un monde extérieur à l'endroit.

Zeki (1970) décrit un cortex visuel composé de différentes zones. La zone primaire, point d'entrée des messages visuels depuis le corps genouillé latéral, transmet les messages aux aires secondaires, qui analysent séparément les caractéristiques de l'image observée telles que la forme, la couleur, le mouvement, les distances, ... Les zones du cortex visuel communiquent ensuite vers des aires associatives qui produisent une interprétation globale. Au cours de ces dernières années, grâce aux techniques d'imageries médicales, les cartes rétinotopiques ont été fortement développées, certains auteurs décrivant jusqu'à 27 zones corticales impliquées dans la perception visuelle (Van Essen & Maunsell, 1983 ; Zeki & Shipp, 1988 ; Horton & Hoyt, 1991b ; Purves & Lamantia, 1993 ; DeYoe *et al.*, 1994 ; Muthukumaraswamy *et al.*, 2009).

La vue est la voie privilégiée qui permet de détecter les dangers qui pourraient survenir dans notre environnement, de repérer les aliments, les zones d'ombres, les abris, ... Cette fonction permet à l'individu de se ressourcer, d'apprécier l'esthétique d'un produit, d'admirer la beauté d'un paysage ou d'une personne (Barrett & Bar, 2009). Une discipline récente, la « neuro-esthétique » initiée par Zeki (2002) propose d'ailleurs d'établir les fondements neuronaux du jugement esthétique et pour Zaidel (2015), le cerveau ne produirait pas de réaction esthétique si cela ne servait à aucun but utile à la survie de l'espèce. Il existerait chez l'homme des fonctions biologiques et adaptatives de l'esthétique, qui vont au-delà du plaisir. Ce sont ces fonctions qui sont mises en œuvre lorsque que l'on évalue les caractéristiques sensorielles et hédoniques d'un produit, d'une matière...

Les contenus visuels sont chargés de contenus émotionnels qui après une interprétation permettront au système nerveux central de répondre à ces événements en préparant des actions comportementales et physiologiques appropriées (Peyrin *et al.*, 2017). Par exemple, une étude suggère qu'un circuit court « ganglions rétiniens – colliculus supérieur – amygdale – cortex préfrontal » permet les traitements visuels inconscients impliqués dans la peur (Liddell *et al.*, 2005). Le colliculus supérieur est l'une des premières structures post-rétiniennes à répondre à des stimuli émotionnels grossiers, mais les traitements émotionnels du système visuel impliquent un large réseau de régions sous-corticales et corticales qui comprennent notamment l'amygdale, le noyau accumbens (NAc, ou striatum ventral), le pôle temporal (PoT), le cortex cingulaire antérieur (CCA), le cortex préfrontal (CPF) et l'insula (Rudrauf *et al.*, 2009). Parallèlement, le corps genouillé latéral, le pulvinar, le cortex visuel, effectuent des traitements visuels qui consistent à examiner et réexaminer une scène, détacher les contours (Thorpe *et al.*, 1996), reconnaître un visage, une personne, une lettre, un objet (Eimer *et al.*, 2003 ; Guyader *et al.*, 2004 ; Grill-Spector & Kanwisher, 2005), analyser le langage corporel (de Gelder & Hadjikhani, 2006).

Une grande partie de ce qu'on apprend passe par le système visuel, comme l'apprentissage de la lecture. Par ailleurs, la mémoire autobiographique, qui constitue notre sentiment d'identité, est associée à un ensemble de détails perceptifs et sensoriels (images, odeurs, ...). Le canal visuel

constitue un moyen important pour récupérer les souvenirs du passé, d'autant plus si ces souvenirs sont associés à une forte émotion. Nous retenons effectivement plus facilement les images émotionnelles que les images neutres (Pillemer *et al.*, 1988 ; Bradley *et al.*, 1992 ; Ochsner, 2000 ; Canli *et al.*, 2002 ; Charles *et al.*, 2003 ; Borg *et al.*, 2011). Une autre étude a montré que la mémoire implicite pour les expressions faciales était généralement longtemps préservée chez des patients atteints de la MA, à l'exception de la peur (García-Rodríguez *et al.*, 2009) montrant ainsi l'importance de l'ancrage des souvenirs visuels.

L'œil humain est également utilisé pour mesurer l'activité cognitive. La dilatation de la pupille, le parcours oculaire, le comptage des clignements, l'analyse des saccades, traduisent l'activité cérébrale (*le raisonnement et le calcul*), le niveau d'attention, l'intensité des réactions émotionnelles (Just & Carpenter, 1976 ; Marshall, 2007). Une grande partie de l'appréciation émotionnelle des objets s'effectue par le visuel et selon Norman (2004), la forme d'un objet est un vecteur d'émotions. Une partie de ces ressentis émotionnels visuels reposerait sur l'esthétique de l'objet.

1.2 Le toucher

Le sens du toucher engage à la fois des fonctions motrices impliquées dans la préhension, le transport et la transformation d'objets, des fonctions perceptives ou de contact, impliquées dans la caractérisation de propriétés physiques et mécaniques (*formes, reliefs, déformations, température...*), et des fonctions nociceptives informant sur une stimulation douloureuse (Heller & Gentaz, 2013). Le toucher permet l'interaction sociale, affective et le plaisir sexuel. Le toucher est une « sensibilité de contact » qui sollicite fortement nos ressources mentales. Par exemple, les sollicitations mentales sont plus importantes dans la lecture en braille que dans la lecture par le système visuel (Tobin *et al.*, 1996).

La peau qui est en contact direct avec l'environnement extérieur reçoit et répond à des stimuli thermiques, mécaniques, électriques, chimiques, microbiologiques et aux rayonnements UV. En retour le système nerveux central gère les processus de régulation de la vasomotricité, de thermorégulation, d'érection pileaire, de fonction barrière, de la sécrétion des glandes, de la croissance, de différenciation des tissus, de cicatrisation et de contrôle les inflammations cutanées.

La peau représente une surface approximative de 2m², pèse environ 3kg, et son épaisseur varie entre 1 et 5 mm :

- La peau glabre se trouve essentiellement sur la paume des mains, la plante des pieds, certaines parties du visage... , et couvre 10 % de la surface du corps. Elle est spécialisée dans le toucher discriminant, la détermination d'une texture, l'analyse des contours, du volume...
- La peau velue couvre 90 % de la surface du corps. Elle possède des fonctions discriminantes et des propriétés affectives.

Les interactions du milieu extérieur avec la peau se traduisent en sensations somesthésiques. La somesthésie est une sensibilité à diverses sollicitations extérieures subies par le corps. La somesthésie comprend les sensations extéroceptives, mécaniques (*tact, pression, déformation, cisaillement, choc...*), thermiques (*chaud, froid*), nociceptives ou algiques (*piqure, coupure...*) et les sensations proprioceptives, mouvements et position du corps (*muscles et tendons*).

La peau est représentée dans la Figure 1.6. Elle est composée de trois compartiments :

- L'épiderme est la couche superficielle de la peau. Elle est traversée par les poils et les pores des glandes sudoripares qui produisent la sueur ou des glandes sébacées qui produisent le sébum. L'épiderme est divisé en 5 couches : cornée, claire, granuleuse, de Malpighin, basale.
- Le derme est situé entre l'épiderme et l'hypoderme. Il contient des cellules élastines, des vaisseaux sanguins, des terminaisons nerveuses, des glandes sudoripares, des poils, des glandes sébacées, les muscles horripilateurs.
- L'hypoderme est un tissu conjonctif richement vascularisé qui contient du tissu adipeux et protège l'organisme contre les chocs (Tran, 2007).

Sous la peau, on trouve des mécanorécepteurs cutanés et proprioceptifs, des nocicepteurs, et des thermorécepteurs.

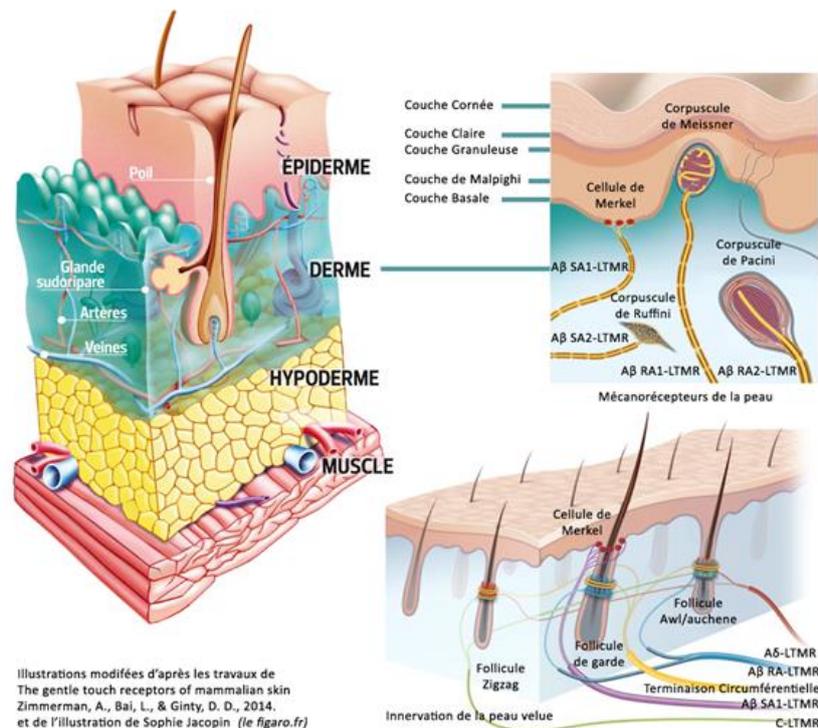


Figure 1.6 – La peau, d'après des illustrations issues de Zimmerman et al. (2014)

Les mécanorécepteurs cutanés sont impliqués dans la sensibilité tactile. Ce sont les corpuscules de Ruffini, les corpuscules de Meissner et les corpuscules de Pacini, les disques de Merkel. Ces récepteurs cutanés apportent une lecture « tactile » des formes, des objets, avec pour chacun un niveau de lecture différent. Les corpuscules de Ruffini (0-10Hz) traitent les informations relatives au cisaillement, à la vitesse de déplacement du doigt. Les corpuscules de Meissner (20-54 Hz) caractérisent les vibrations à basse fréquence et les corpuscules de Pacini (100-300Hz) sont sensibles aux vibrations à haute fréquence. Tous deux sont sensibles aux mouvements tangentiels. Le cisaillement et l'apparition de vibrations sont souvent observés dans le cadre de frottements, de glissements sur une surface. Les disques de Merkel (0-10 Hz) informent sur la géométrie des objets, les contours, les arêtes (Crochemore et al., 2004 ; Lowe, 2017). Ces récepteurs ne sont pas répartis uniformément sur la peau et on trouve ces 4 récepteurs sur la peau glabre de la main. Les follicules zigzag, les follicules Awl/Auchene, et les follicules de garde, complètent les récepteurs cutanés, en caractérisant quant à eux le toucher léger, l'effleurement, le frôlement.

Les mécanorécepteurs proprioceptifs informent sur les mouvements (*statiques et dynamiques*), la position des membres ou du corps, l'orientation des mouvements. Les mécanorécepteurs impliqués dans la proprioception sont les organes tendineux de Golgi (*fibres Aα*), et les fuseaux neuromusculaires. Les corpuscules de Ruffini et de Pacini (*fibres Aβ*) complètent les informations proprioceptives en renseignant sur les mouvements et la position du corps.

La surface de la peau comprend également des nocicepteurs qui informent sur la douleur. Les nocicepteurs impliqués dans la perception de la douleur sont des terminaisons libres ou des fibres peri-vasculaires (*fibres Aδ et C*). Lors de lésion de la peau, de brûlure, les récepteurs polymodaux silencieux s'activent et répondent à des stimuli de très forte intensité. Les thermorécepteurs renseignent enfin sur la sensibilité thermique. Les thermorécepteurs impliqués dans les ressentis des sensations de chaud ou de froid sont les organes de Krause (*sensibilité du chaud entre 36 et 46°C*) et les corpuscules de Ruffini (*sensibilité du froid entre 10 et 35°C*).

Les récepteurs de la peau sont reliés à la moelle épinière par des nerfs qui sont composés par 4 types de fibres : Les fibres myélinisées à conduction rapide Aα (80 à 120 m/s), Aβ (35 à 75 m/s) et Ad (5 à 30 m.sec-1) et les fibres de type C amyéliniques à conduction plus lente (0,5 à 2 m/s). La moelle épinière est décomposée en dix couches dites « laminae de Rexed ». Les laminae I à VI composent la corne dorsale de la moelle épinière. Cette partie est dédiée à l'intégration des informations sensorielles. Le système d'innervation somesthésique est un système à 3 neurones et 2 relais décrits dans la Figure 1.7.

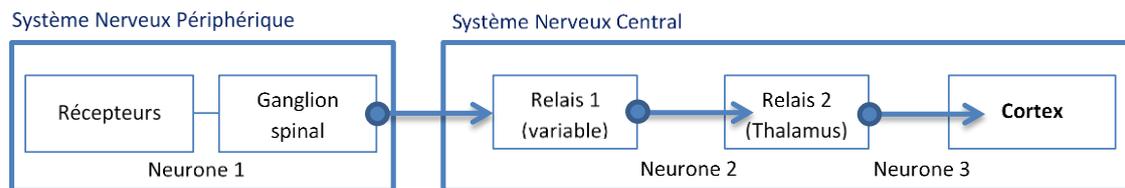


Figure 1.7 – Voie afférente du récepteur sensoriel au cortex pariétal (Hasboun et al., 2006)

Les ressentis de type sensibilités épicrotiques, proprioceptives conscientes et vibratoires sont acheminés vers le cortex somesthésique en empruntant la voie lemniscate. Le tact protopathique et les ressentis thermo-algiques (Aδ, C) sont acheminés vers le cortex somesthésique par la voie spinothalamique et la voie spinoréticulaire, qui véhiculent les sensibilités nociceptives. Ces voies nerveuses sont constituées de fibres peu ou non myélinisées de petit calibre à conduction assez lente. La voie spinothalamique informe sur la localisation de la douleur, tandis que la voie spinoréticulaire joue un rôle d'alerte et de protection et traite le toucher émotionnel (Bear et al., 2007).

Le toucher est connu pour avoir des impacts sur les ressentis émotionnels et sur la cognition. Spitz (1945) a travaillé sur l'importance du toucher dans le développement de liens sociaux, et Harlow et Zimmermann (1958) sur l'impact du manque de stimulations tactiles dans le développement mental. D'autres auteurs ont suggéré que le degré de toucher montrait la relation de proximité entre individus (Suvilehto et al., 2015). Au travail, un toucher peut indiquer un encouragement non verbal entre un supérieur et un employé subalterne (Henley, 1973). Mais le toucher peut produire des effets négatifs, comme l'a montré une étude réalisée en Pologne qui a mis en évidence l'homophobie

des populations testées (Dolinski, 2010). Le toucher semble également renforcer le ressenti émotionnel (Schirmer & Adolphs, 2017), et influencer sur le processus décisionnel (Spapé et al., 2017).

Le toucher émotionnel au contact de la peau est perçu par l'action simultanée de fibres C (*tactiles afférentes (CT)*) non myélinisées sensibles au toucher léger et aux déplacements sur la surface de la peau. Ces cellules ne sont présentes que sur la surface de la peau velue. Par exemple, une patiente atteinte du syndrome de Guillain-Barré avait perdu presque toutes ses grosses fibres afférences myélinisées, rendant impossible la perception du toucher discriminant sur la moitié de son corps. Cependant, la patiente percevait toujours les stimuli thermo-algiques et le déplacement d'un pinceau sur son bras, en soulignant la nature plaisante du déplacement du pinceau, alors que la perception de ce stimulus ne s'activait pas lors d'une caresse sur la peau glabre. Les fibres C (*tactiles afférentes (CT)*) impliquées dans ce ressenti répondent uniquement aux déplacements lents et aux très faibles vibrations. Un équipement d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle cérébrale a montré que ce type de caresse activait chez des sujets sains les régions somatosensorielles du lobe pariétal et du cortex insulaire. Ceci s'explique par l'activation conjointe de fibres C (*tactiles afférentes (CT)*) et de fibres impliquées dans le toucher discriminant. Chez la patiente atteinte du syndrome de Guillain-Barré, les chercheurs ont observé l'activation du cortex insulaire postérieur et de certaines parties du système limbique (*des régions impliquées dans le ressenti d'émotions positives*) (Forget & Lamarre, 1987 ; Olausson et al., 2002 ; Chapman, 2003 ; McGlone et al., 2007 ; Ackerley et al., 2014).

Les ressentis émotionnels peuvent également à leur tour induire des réponses émotionnelles à la surface de la peau. Par exemple, la honte provoque un rougissement et une forte émotion qui entraîne un phénomène de sudation. Les psychanalystes reconnaissent l'incidence des retentissements psychiques dans les affections dermatologiques comme l'eczéma (Pomey-Rey, 1999). Ces manifestations cutanées, sont directement reliées à un état émotionnel souvent dépressif. Les dermatologues considèrent que les maladies de peau sont souvent liées à un choc traumatique.

1.3 L'odorat

L'odorat est un sens très développé chez l'homme et les animaux. Il informe sur la présence de bonnes ou de mauvaises odeurs. Une odeur est souvent associée à des souvenirs qui restent gravés dans notre mémoire toute notre vie et suscitent de fortes émotions lorsqu'on les recroise. Le système olfactif est un sens primitif qui a la particularité d'être à la fois chimique (*La molécule chimique doit venir se fixer aux récepteurs olfactifs*), subjectif et affectif (*car les odeurs sont émotionnellement connotées*).

La Figure 1.8 présente la composition du bulbe olfactif. La perception olfactive permet d'analyser les substances chimiques volatiles présentes dans l'air. Lors d'une inspiration, des molécules odorantes rentrent dans la fosse nasale. Cette cavité comporte 3 cornets qui dirigent les flux d'air vers la muqueuse olfactive située en haut de la fosse nasale. La fosse nasale a une surface de 2,5 cm² et abrite nos récepteurs olfactifs. La muqueuse olfactive est constituée de l'épithélium olfactif et du tissu conjonctif. L'épithélium abrite quatre types de cellules : les cellules réceptrices olfactives, de soutiens, glandulaires et basales qui sont prolongées par des cils olfactifs qui détectent presque 10 000 types d'effluves. La surface de l'épithélium est recouverte par du tissu conjonctif qui sécrète le mucus olfactif grâce aux glandes de Bowman. Cette substance située entre l'épithélium et la lame

criblée de l'éthmoïde permet de dissoudre les fragrances qui sont converties en gaz pour favoriser la perception olfactive.

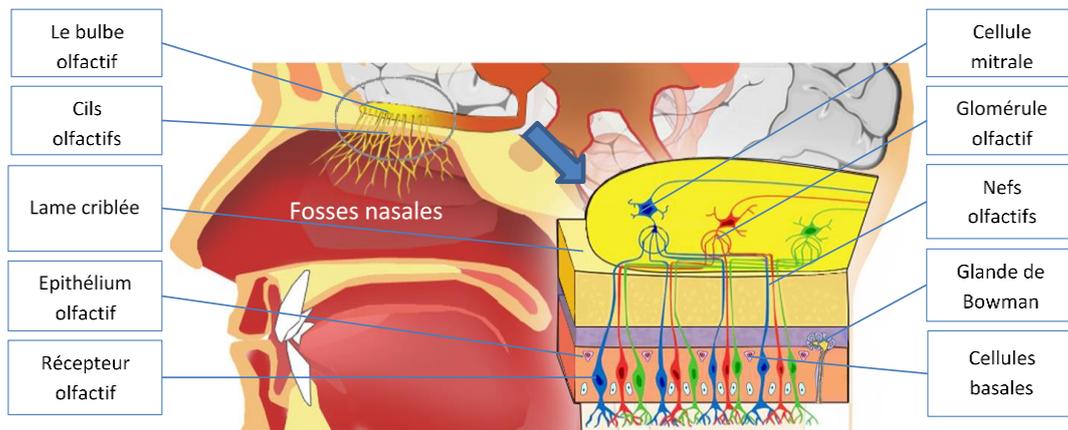


Figure 1.8 – Composition du bulbe olfactif

La transduction olfactive s'opère au niveau de l'épithélium où les molécules olfactives se fixent sur les cils olfactifs. Les cils convertissent ensuite ces stimuli en influx nerveux électriques qui traversent le mucus, l'os maxillaire (*lame criblée de l'éthmoïde*) avant d'être acheminés au bulbe olfactif qui traite l'information olfactive. Ces informations sont traitées par les glomérules et redirigées vers les cellules mitrales et se projettent vers les cellules pyramidales situées dans le cortex olfactif. Le cortex olfactif possède des liaisons nerveuses avec l'hippocampe et l'amygdale. Le système olfactif est le seul système sensoriel à relier directement le milieu extérieur au cerveau. L'épithélium est un point d'accès direct vers le système nerveux central qui est fréquemment utilisé en pharmacologie. L'administration de médicaments par la voie intranasale est courante dans le traitement de certaines maladies.

Les odeurs sont d'importants déclencheurs émotionnels, car les odeurs sont souvent associées aux souvenirs. Le sens olfactif est très développé chez les animaux et joue un rôle dans les fonctions de préservation. L'importante propriété émotionnelle de l'odorat s'explique par le fait que les régions cérébrales impliquées dans l'olfaction ont des fonctions émotionnelles et cognitives. Des expériences portant sur l'analyse olfactive de parfums ont permis d'observer que les régions cérébrales activées sont l'amygdale et l'hippocampe ; des régions impliquées dans la mémoire et l'émotion. Cette expérimentation justifie une théorie selon laquelle le sens olfactif déclencherait une émotion dite pré-conceptuelle, ne transitant pas par le néocortex (Herz *et al.*, 2004). D'autres expérimentations ont été faites sur un lien direct entre l'odeur et l'émotion (De Groot *et al.*, 2012).

1.4 L'ouïe

La perception auditive est une représentation mentale de notre environnement sonore. La perception des sons varie en fonction de l'attention, de l'accoutumance, du caractère émotionnel du son, de notre état d'esprit. Les bruits, les sons véhiculent une grande quantité d'informations qui sont immédiatement traitées par le cerveau. Les sons sont des vecteurs de sentiments qui peuvent apaiser notre esprit, induire un état émotionnel. Le son est utilisé pour réaliser des indicateurs sonores car le signal sonore est rapidement perçu et que nous associons facilement une fonction au son émis. Le son peut également renseigner sur la rugosité, la douceur, l'adhérence d'une surface.

La Figure 1.9 présente le système auditif qui permet de capter les sons qui se propagent sous la forme d'ondes vers l'oreille externe avant d'être guidés vers l'oreille moyenne par le canal auditif. L'oreille moyenne comprend le tympan (*une membrane circulaire flexible qui vibre sous l'action des ondes sonores*) et trois petits ossements de la chaîne ossiculaire appelés marteau, enclume et étrier. Ces osselets relient le tympan à l'oreille interne. Les sons sont amplifiés dans la fenêtre ovale avant de parvenir à la cochlée par les rampes tympaniques. La cochlée effectue la transduction du signal sonore. Le canal cochléaire contient l'organe de Corti, situé entre la rampe vestibulaire et la rampe tympanique. L'organe de Corti est connu pour être l'organe de l'audition car il comprend 15000 cellules ciliées sensorielles (Corti, 1851).

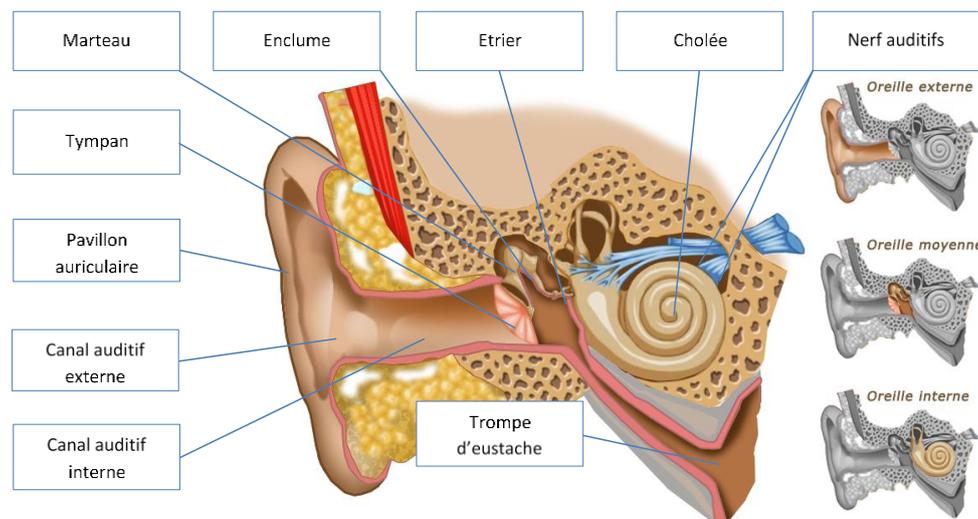


Figure 1.9 – Le système auditif

Une partie des messages émis par les cellules ciliées emprunte la voie auditive primaire avant d'effectuer un premier relais dans les noyaux cochléaires (*bulbe rachidien*) qui décodent la base du message : durée, intensité, fréquence, puis effectue un second relais dans l'olive supérieure (*mésencéphale*) avant d'atteindre le colliculus inférieur (*mésencéphale*) qui joue un rôle essentiel dans la localisation du son (*3ème relais*), puis rejoint les corps genouillés médians (*thalamus*) pour l'intégration et la préparation d'une réponse motrice et vocale (*4ème relais*). Enfin l'influx nerveux passe du thalamus aux cortex auditifs qui l'analysent, reconnaissent, mémorisent le message avant de produire une réponse volontaire (Pujol & Lavigne-Rebillard, 1985).

L'autre partie du message emprunte la voie non spécifique cheminant du noyau cochléaire vers la formation réticulée qui effectue l'intégration avec les autres modalités sensorielles et réalisent un tri permettant de définir quelle est la modalité « prioritaire ». Les voies réticulaires sont impliquées dans l'éveil et la motivation et sont reliées aux centres végétatifs qui projettent vers le cortex cérébral, les noyaux du thalamus, l'hypothalamus et le cortex limbique. Cette voie provoquera la réponse émotionnelle (Moruzzi *et al.*, 1949 ; Guazzi *et al.*, 1964).

La majorité des aires du langage est située dans l'hémisphère gauche, on y retrouve les aires auditives primaire et secondaire qui effectuent le traitement du langage parlé et écrit et donnent du sens à l'information auditive. L'hémisphère droit est impliqué dans le traitement des sons non-verbaux, car il est plus sensible à la musique, aux sons, aux bruits, à la parole, aux chants ; stimuli qui

véhiculent un grand nombre d'informations émotionnelles. Scherer (2013) a présenté des travaux qui montrent comment l'écoute de différentes tonalités de voix peut changer notre état émotionnel. Nous disons d'ailleurs qu'une voix est chaude, douce, sensuelle, désagréable, agressive, ... et l'intonation d'une phrase produit différents sentiments (Scherer & Zei, 1989 ; Buttet *et al.*, 1980). L'effet émotionnel de la musique est également bien connu car elle provoque la chair de poule, la joie, la tristesse, ... c'est pour ses propriétés émotionnelles que la musique, nous accompagne dans les moments joyeux de notre vie (*mariage, fête nationale, ...*) ou dans les moments de mélancolie, tristesse (*enterrement, séparation, ...*).

1.5 Le goût

Le goût est un sens volontaire qui décrit l'appréciation des propriétés chimiques et physiques des aliments que l'on ingère. La perception du goût nous renseigne sur les qualités hédoniques et nutritives des aliments. D'après Canon *et al.* (2018), nous devrions employer le mot de « flaveur » au lieu de « goût », pour prendre en compte les composantes gustatives, olfactives et trigéminales :

- La composante gustative (*saveur*) correspond à la perception des composés sapides des aliments. La perception des saveurs résulte de la stimulation des chémorécepteurs gustatifs et des bourgeons du goût. Il existe 5 saveurs décrites dans la Figure 1.10, telles qu'elles se répartissent sur la langue.

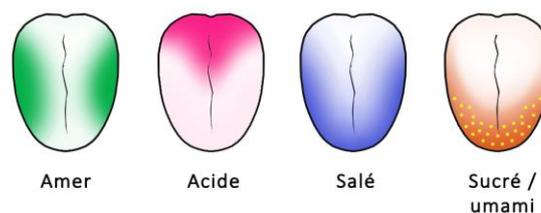


Figure 1.10 – Répartition des saveurs sur la langue (Purves, 2019)

- La composante olfactive vient des molécules odorantes libérées par la mastication qui voyagent dans notre bouche pour remonter vers l'épithélium olfactif en empruntant la voie retro-nasale. Ces odeurs qui s'échappent des aliments sont appelées arômes.
- La composante trigéminale correspond aux propriétés somesthésiques transmises par la langue (*température, viscosité, brûlures, piquant, astringence, fraîcheur, pétillant, teneur en graisse...*). Ces informations sensorielles sont transmises par le nerf trijumeau et les autres nerfs crâniens au thalamus et au cortex somesthésique.

Le cheminement des influx nerveux traduisant la flaveur est présenté dans la Figure 1.11. Sur la surface de la langue, nous trouvons 3 types de papilles gustatives : les papilles caliciformes (*innervées par le nerf crânien IX*), les papilles foliées, les papilles fongiformes (*innervées par le nerf crânien VII*) et les papilles filiformes. Au cœur des papilles se trouvent les bourgeons gustatifs qui comprennent des cellules sensorielles qui codent les sensations gustatives (Huang *et al.*, 2006). Le nerf trijumeau V (*nerf lingual*), le nerf facial VII et le nerf glosso-pharyngien IX opèrent les mouvements de la langue et véhiculent les sensations gustatives vers le ganglion géniculé avant de rejoindre le foramen d'Arnold pour finalement gagner le ganglion otique d'Arnold et le ganglion de Gasser (*pour le nerf lingual*).

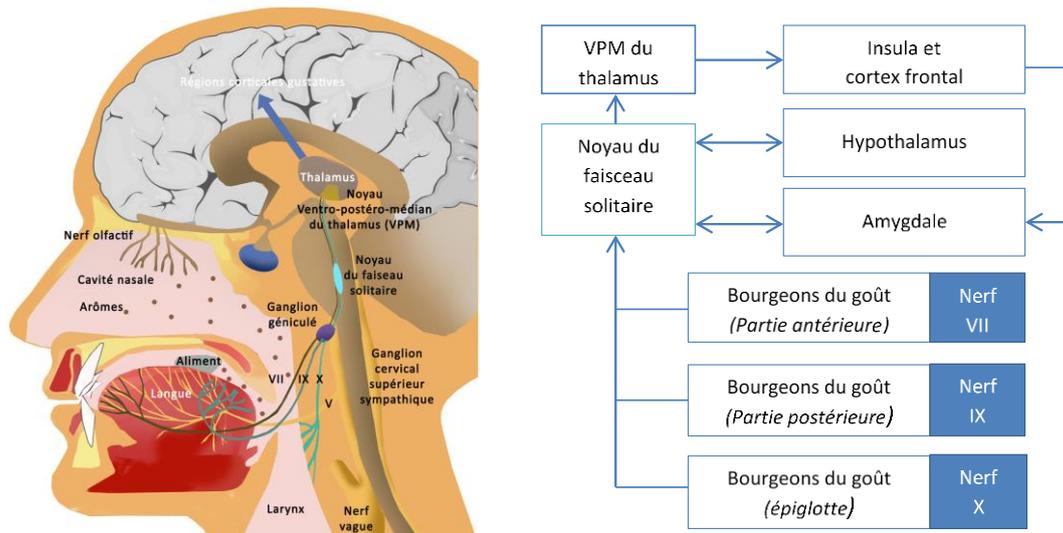


Figure 1.11 – Organisation du système gustatif, d'après Purves (2019)

D'autres sens participent à la perception gustative. Lors de la mastication, l'audition informe le cerveau sur l'état de transformation des aliments et donne l'indication sur la possibilité d'avaler. La vision renseigne sur les aspects hédoniques des aliments et permet la détection d'anomalies qui pourraient engendrer une certaine nocivité pour l'organisme.

En ingénierie, nous considérerons que les récepteurs sensoriels sont des capteurs qui permettent de percevoir notre environnement. Les signaux provenant des capteurs sensoriels empruntent les nerfs du système nerveux humain pour parvenir au cerveau qui les interprète. Nous présenterons ci-après les voies principales qui permettent le cheminement des informations sensorielles au travers du système nerveux périphérique vers les voies de traitements émotionnels situées dans le système nerveux central.

2. Le Système Nerveux

Le système nerveux humain est la partie du corps humain qui coordonne les mouvements musculaires, régule le fonctionnement des organes, recueille et traite les informations sensorielles. Chez l'homme, qui est pourvu d'un cerveau limbique et d'un néocortex, le système nerveux contrôle les émotions. Le système nerveux humain est composé de deux branches que nous allons traiter successivement :

- Le système nerveux central ;
- Le système nerveux périphérique.

2.1 Le Système Nerveux Central

Le système nerveux central est un système de communication qui permet de mettre l'organisme en relation avec le monde extérieur. Les messages nerveux encodés provenant des récepteurs sensoriels, sont acheminés par le système nerveux central au cerveau qui les traite. Le système nerveux central est composé de la moelle épinière, qui collecte les informations pour les transmettre au cerveau et l'encéphale, qui désigne l'ensemble du contenu de la boîte crânienne, dont le cerveau.

2.1.1 La moelle épinière

La moelle épinière (Figure 1.12) connecte les nerfs au cerveau tout au long du corps. La moelle épinière est logée dans le canal rachidien, elle s'étend du bulbe rachidien jusqu'à la première ou deuxième vertèbre lombaire du cône médullaire, et comprend 31 segments médullaires. La moelle épinière se décompose de haut en bas en cinq régions : Cervicale, Thoracique, Lombaire, Sacrée et Coccygienne. La moelle épinière achemine vers le cerveau les informations sensorielles par un circuit ascendant et relaie par un circuit descendant les informations motrices vers les muscles. Les nerfs et substances de la moelle épinière constituent en grande partie le système nerveux périphérique.

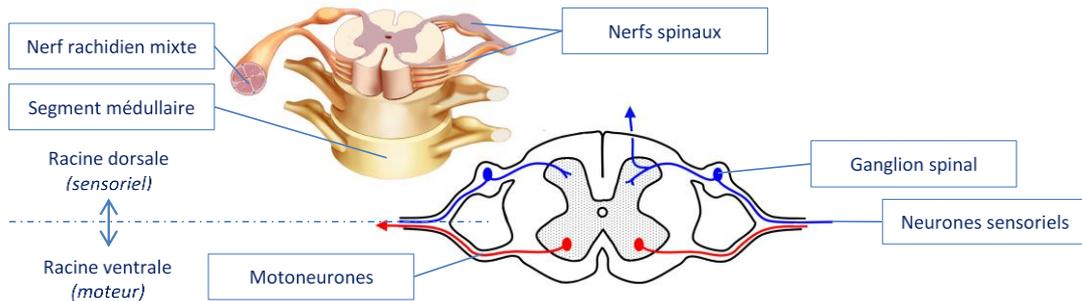


Figure 1.12 – Illustration et coupe transversale de la moelle épinière

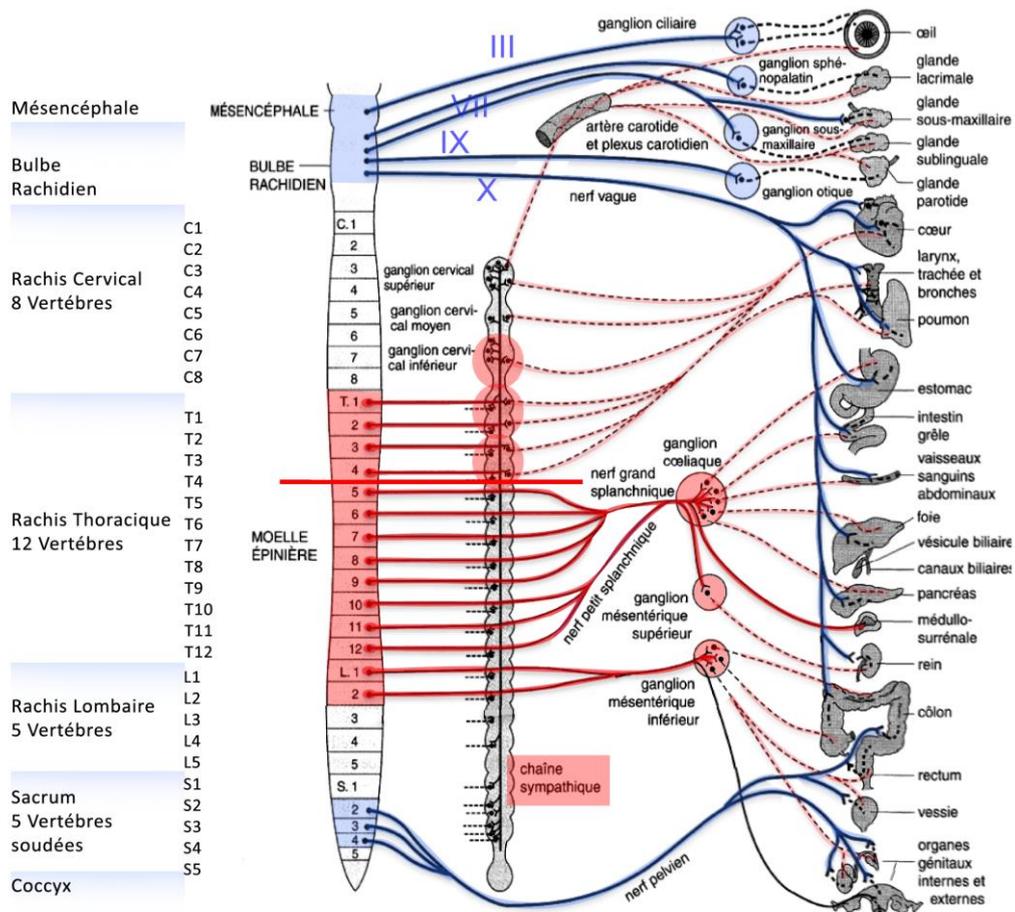


Figure 1.13 – Systèmes nerveux orthosympathique (OS) en rouge et parasymphatique (PS) en bleu (Gray, 1878)

Les voies ascendantes (*afférentes*) et descendantes (*efférentes*) dans le fonctionnement du système nerveux s'appuient respectivement sur les systèmes parasympathique et orthosympathique décrits dans la Figure 1.13. Ces systèmes contiennent des relais appelés « ganglion autonome » au sein desquels l'influx nerveux est modifié, modulé, puis transmis d'un neurone à l'autre jusqu'à sa cible. Les ganglions autonomes sont reliés entre eux par des cordons nerveux et forment la chaîne sympathique.

2.1.2 L'encéphale

Le cerveau est constitué d'environ 170 milliards de cellules et de 86 milliards de neurones en moyenne. Il est divisé en deux hémisphères qui sont reliés entre eux par les fibres nerveuses que sont les corps calleux et les commissures. L'hémisphère droit traite la reconnaissance des formes, des visages, les aptitudes visuo-spatiales, la coordination perceptive motrice, la créativité, l'émotion, la conscience, l'intelligence globale, les affects négatifs (Davidson, 1994 ; Hugdahl & Davidson, 2004 ; Nielsen *et al.*, 2013). L'hémisphère gauche comprend des fonctions évaluatives, la logique, le calcul, la pensée analytique, la capacité technique, les fonctions linguistiques, la mémorisation de nos rêves, l'attention de stimuli extérieurs, la gestion des affects positifs et l'empathie (Ruby, 2011 ; Legrand *et al.*, 2015).

En plus du cerveau, la boîte crânienne contient le tronc cérébral et le cervelet :

- Le tronc cérébral est une structure très ancienne que l'on partage avec de nombreux animaux. Il abrite les fonctions relatives à l'instinct de conservation, aux comportements primitifs, aux besoins vitaux de l'organisme. Le tronc cérébral fait le lien entre la moelle épinière et le cerveau (Nieuwenhuys *et al.*, 2007). La partie émotionnelle du tronc cérébral est composée de 3 voies : ascendante, descendante et modulateur. La voie ascendante reçoit les informations sensorielles et sensibles provenant des nerfs périphériques, les décode, avant de les transmettre vers les structures rostrales du cerveau. Si le message sensoriel comporte une signification affective, le tronc cérébral déclenchera des actions et une réponse comportementale par la voie descendante. Il s'agira de réponses physiologiques, motrices et expressives.
- Le cervelet est rattaché au tronc cérébral par les pédoncules cérébraux. Il régule les fonctions motrices, l'apprentissage moteur, l'équilibre, la posture, le contrôle du tonus musculaire et agit dans la coordination de la motricité volontaire (Van Hoorebeke, 2008 ; Konarski *et al.*, 2005).

Lors de son développement, le cerveau des êtres humains s'est progressivement enrichi d'un système limbique et d'un néocortex, tous deux jouant un rôle majeur dans nos émotions.

Le système limbique est décrit dans la Figure 1.14. Avec le tronc cérébral, il est l'une des parties du cerveau qui gère les comportements émotionnels jusqu'à leurs expressions végétative et motrice (Mallet *et al.*, 2007). Le système limbique est parfois considéré comme « le cerveau émotif » (Konorski, 1967 ; Broca, 1978). C'est également le siège de l'apprentissage, de la mémoire et du système olfactif. Le terme de limbique a été introduit en 1878 par Paul Broca qui lui attribuait une fonction olfactive d'où son appellation de rhinencéphale. Ces connaissances ont été complétées par Klüver et Bucy (1938), qui ont montré l'importance de l'amygdale dans l'expression des émotions et les travaux de James Papez (1937) qui ont établi le lien entre l'émotion et la mémoire.

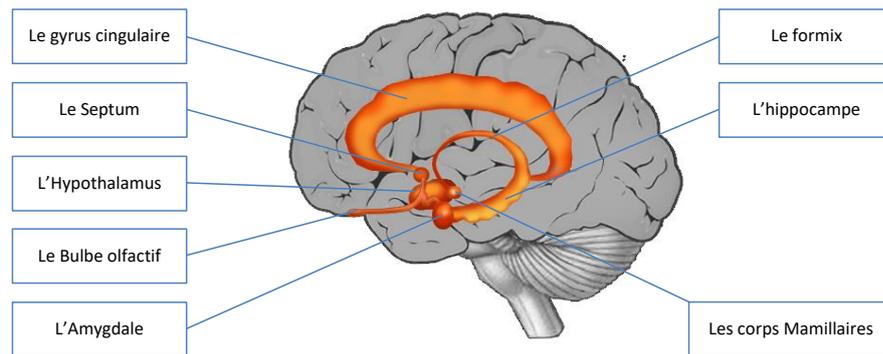


Figure 1.14 – Le système limbique

Les structures du système limbique sont connectées entre elles et s'activent suivant différents circuits. On distingue souvent :

- Le circuit de la peur, qui relie le thalamus, le cortex préfrontal, l'hippocampe et l'amygdale ;
- Le circuit de la récompense, qui comprend le noyau accumbens, l'aire tegmentale ventrale, le septum, l'amygdale, l'hippocampe, l'hypothalamus et le cortex préfrontal ;
- Le circuit de la mémoire qui connecte l'hippocampe, les corps mammaires, le thalamus et le gyrus cingulaire.

Lors d'une stimulation sensorielle, les influx nerveux empruntent des voies qui diffèrent en fonction de la nature de l'information que le cerveau doit traiter. La voie courte passe directement du thalamus à l'amygdale. Elle est impliquée dans les fonctions d'alerte, et est à l'origine des émotions primaires. La voie longue chemine par le thalamus, plusieurs cortex, l'amygdale. Elle est privilégiée quand la réponse doit être précise et élaborée. C'est également par cette voie que sont élaborées les émotions secondaires.

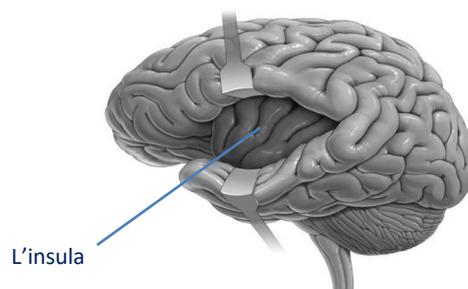


Figure 1.15 – Le cortex insulaire (ou insula)

Dans le néocortex, on distingue souvent l'insula, présenté dans la Figure 1.15, qui est impliqué dans la conscience proprioceptive et l'expression du dégoût, que ce soit par les voix olfactives, visuelles ou simplement en imaginant un stimulus dégoûtant. L'insula régule les fonctions homéostatiques du corps. L'insula, avec les deux cortex cingulaires antérieurs, abrite les « neurones fusiformes » qui sont impliqués dans l'empathie et les émotions en rapport avec la conscience de soi (Nimchinsky *et al.*, 1995 ; Seeley *et al.*, 2011). D'autres zones du néocortex, comme le lobe frontal, sont impliquées dans des aspects de l'émotion. Nous ne détaillerons pas dans ce document leurs rôles. Une littérature riche existe dans ce domaine (Pirot, 2003 ; Seron, 2009 ; Norman & Shallice, 1986 ; Landmann, 2007 ; Stuss & Knight, 2013 ; Winecoff *et al.*, 2013 ; Bechara *et al.*, 2000 ; LeDoux, 1998 ; Gross, 2002).

2.2 Le Système Nerveux Périphérique

Le système nerveux périphérique est constitué des nerfs crâniens et des nerfs rachidiens. Il reçoit les informations des nerfs sensitifs (*responsables des sensations*) et des nerfs moteurs (*responsables des actions*). Il possède une voie afférente et une voie efférente, et comporte le système nerveux autonome, le système nerveux somatique, et le système entérique.

2.2.1 Le Système Nerveux Autonome

Le système nerveux autonome fonctionne indépendamment. Il est complètement déconnecté des faits de conscience. Il est distribué dans l'ensemble du corps humain et s'assure de manière autonome du bon fonctionnement des organes internes. Il joue un rôle important dans la régulation, la modulation de la vie végétative inconsciente, en intervenant dans l'activité des organes tout en leur laissant une autonomie fonctionnelle.

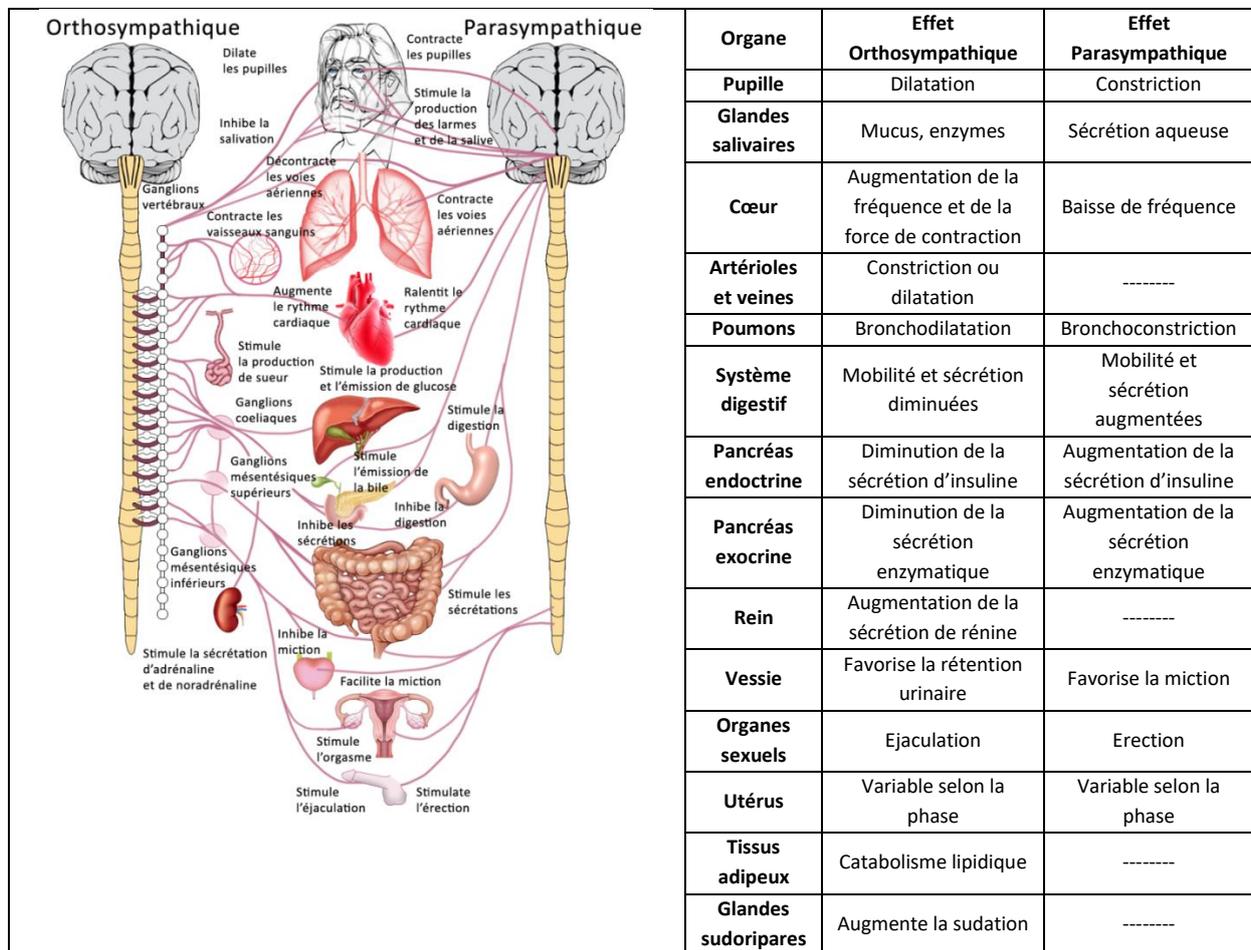


Figure 1.16 – Actions des systèmes nerveux orthosympathique et parasymphatique

Plusieurs théories de l'émotion s'accordent sur l'importance du système nerveux autonome dans le déclenchement des réactions émotionnelles (James, 1890 ; Lange, 1885 ; Schachter & Singer, 1962, Krugman, 1964 ; Kohan, 1968 ; Stewart & Furse, 1982). La théorie de l'évaluation cognitive et dynamique de l'émotion en 5 composantes, développée par Scherer *et al.* (2001) qui découle de la

théorie de l'appraisal d'Arnold (1960), établit le lien entre l'activité du système nerveux autonome et le séquençement du processus émotionnel (Lajante & Droulers, 2013).

D'autre part, un processus de régulation dynamique adaptatif du système nerveux autonome s'effectue par des actions opposées provenant du système nerveux orthosympathique et du système nerveux parasympathique de manière antagoniste. Pour décrire ce phénomène d'autorégulation de l'organisme, on parle de balance excitation/inhibition autonome :

- Le système nerveux orthosympathique prépare le corps à l'activité physique ou intellectuelle en activant les viscères (Christensen & Galbo, 1983). Ce système est dit ergotrophe, c'est-à-dire susceptible de s'habituer à des changements de rythme et à l'urgence, car il est mobilisé en cas de lutte ou de fuite.
- Le système nerveux parasympathique calme, met au repos les processus physiologiques pour que les ressources soient disponibles lorsque le corps le nécessitera. Il régule le rythme cardiaque, emmagasine l'énergie et maintient la dynamique du corps à un certain niveau. Par son action inhibitrice, le système parasympathique joue un rôle important dans la régulation des émotions (Kling, 1933). Le système nerveux parasympathique est dit trophotrophe car il revêt des fonctions métaboliques et est mobilisé dans le repos et les processus de conservation d'énergie.

La Figure 1.16 présente l'action des systèmes orthosympathique et parasympathique sur les organes du corps humain.

2.2.2 Les Systèmes Nerveux Somatique et Entérique

Le système nerveux somatique intervient dans la perception des stimuli externes via les fibres afférentes et dans le contrôle des mouvements volontaires. Il commande les muscles du squelette et reçoit les perceptions tactiles comme la douleur et les sensations thermiques provenant des récepteurs sensoriels situés sous la peau (Noback *et al.*, 2005). Le système nerveux somatique permet de percevoir le toucher « passif », c'est-à-dire le toucher involontaire. C'est par ce système que l'homme perçoit un grand nombre de sensations (*froid, chaleur, courant d'air...*). Les signaux du système nerveux somatique et les signaux du système nerveux autonome empruntent des voies différentes, la première est directe, la seconde est discontinue et chaînée par les ganglions autonomes (Cajal & Ramón, 2002). Le système nerveux somatique contrôle notre système respiratoire, il nous permet de réaliser de fortes inhalations de manière volontaire. En revanche, il nous est impossible de prendre le contrôle de notre rythme cardiaque car les muscles cardiaques sont innervés par le système nerveux autonome qui échappe à notre contrôle (Javorka *et al.*, 2002 ; Ivarsson *et al.*, 2013).

On considère souvent que le système nerveux entérique fait partie du système nerveux autonome, en contrôlant les activités du tube digestif (Furness, 2006). Toutefois, bien que partageant des parties avec le système nerveux autonome, le système nerveux entérique agit indépendamment. Il est connecté au système nerveux central par le nerf vague qui assure la régulation végétative (*digestion, fréquence cardiaque, ...*), le transit, le contrôle sensorimoteur du larynx et informe sur la satiété. Le système nerveux entérique joue un rôle important dans l'expression des émotions avec les différentes manifestations émotionnelles de l'intestin. La caractéristique émotionnelle du système nerveux entérique proviendrait du passage emprunté par le nerf vague pour parvenir au sein des

structures sous-corticales à l'intestin (De Vadde & Mithieux, 2015). Bonaz (2010) a montré que le tube digestif communique avec le cerveau par la voie sympathovagale. Les manifestations émotionnelles seraient de nature à créer un dysfonctionnement dans les relations neuro-digestives responsables de maladies digestives.

3. Les émotions

Le mot émotion trouve son origine au XIII^{ème} siècle, dans l'ancien français avec le mot « motion » qui vient du mot latin « emovere ». Le mot « emovere » est composé d'une racine « e » (*racine latine : ex*) qui signifie « Hors de » et du mot latin « motio » qui signifie « mouvement ». En français le mot « émotion » provient du mot « émouvoir » qui signifie mettre en « mouvement ». Le sens du mot évolue au Moyen-âge, avec l'évolution de la vie politique et l'apparition d'approches diplomatiques qui mesurent l'importance des propos. Dans le même temps, les peintures et sculptures deviennent subjectives, parfois dérangeantes et l'émotion apparaît comme étant « le mouvement de l'âme ».

L'impact de l'émotion sur notre comportement a longtemps été considéré comme négatif, souvent accusé d'empêcher le raisonnement, la prise de décision rationnelle. Platon considérait l'émotion comme une « maladie de l'âme ». Dans les religions avoir des émotions étaient mal vues car pour les Chrétiens, elles poussaient au péché et pour les Bouddhistes, elles empêchaient d'accéder au Nirvana. Au XV^{ème} siècle, le mot émotion était assimilé à « l'action d'émouvoir » désignant ainsi les mouvements du peuple. L'émotion est alors associée aux troubles, aux agitations populaires.

Le sens donné à l'émotion évolue véritablement au XVIII^{ème} siècle porté par les idées véhiculées par le mouvement littéraire, culturel et artistique du Romantisme. Plusieurs contributions littéraires, artistiques entraîneront les productions culturelles vers le sentimentalisme, l'esthétique de l'émotion, la poétique du sentiment. Plusieurs mots viennent alors enrichir le lexique utilisé dans les discours philosophiques, artistiques et politiques (Diderot, 1778).

Durant cette époque, on s'aperçoit que le sentiment s'éduque, se transforme, s'étoffe grâce à l'éducation des populations. En politique on réfléchit sur une politique juste, basée sur un équilibre entre émotion et raison, impliquant la morale et l'éthique. L'étude des émotions connaît un tournant au XIX^{ème} siècle, en raison de l'avancée des sciences et d'une meilleure compréhension des mécanismes émotionnels permettant d'appréhender les comportements humains. Les émotions jouent un rôle très important dans les processus de décision, nous décrivons l'impact des ressentis émotionnels en conception dans le Chapitre 3.

3.1 Déclenchement de l'émotion

Les chercheurs contemporains, s'entendent pour dire que le déclenchement d'une émotion est produit par une excitation, une sollicitation, un événement externe et la cause de l'émotion est motivée par l'évaluation interne de l'évènement. Cette évaluation personnelle est dictée par l'évaluation de l'impact et par la pertinence que cette stimulation aura sur l'individu. Conformément à l'approche processus-composante développée par Scherer (1992), Sander (2013) décompose la manifestation des émotions en deux parties : le déclenchement lié à la perception et à l'évaluation d'un stimulus, et la réponse synchronisée, comportementale, avec une certaine rapidité, une intensité et une durée.

L'émotion reste un phénomène très complexe à définir. Plusieurs théories se proposent d'en expliciter les mécanismes. Darwin (1872) fut l'un des premiers à décrire la manière dont les animaux et les humains expriment leurs émotions et ses travaux ont permis de dégager certaines émotions communicatives telles que la joie, la surprise, la peur, le dégoût, la colère et la tristesse. Pour Darwin, les émotions auraient été initiées au tout début de l'humanité, lorsque les situations rencontrées entraînaient des réactions volontaires qui à force de répétition se sont transformées en réflexes innés, permettant la préservation des individus ; ce qui a donné naissance à la théorie « évolutionniste » de l'émotion qui considère que les émotions sont nées d'un processus *homéostatiques* qui permet à notre organisme de trouver un équilibre propre à sa conservation. Ensuite, dans une théorie dite « périphéraliste », James (1890) et Lange (1885) suggèrent que le déclenchement des émotions est dû à la perception d'un « pattern d'activation périphérique spécifique » dédié à chaque émotion. L'existence de circuits préprogrammés destinés à déclencher l'émotion a été ensuite controversée (Candland, 1977 ; Lindquist & Barrett, 2008 ; Tcherkassof & de Suremain, 2005) et la théorie « centraliste » proposée par Cannon (1927) et Bard (1928) situe le déclenchement de l'émotion au niveau du système nerveux central. La théorie proposée par Schachter et Singer (1962) est la première théorie cognitive de l'émotion. Partant du constat qu'il est impossible de différencier une émotion uniquement dans l'analyse des réactions corporelles, ces auteurs ont proposé que le déclenchement de l'émotion est dû à l'action de deux facteurs : l'arousal et l'activité cognitive.

- L'arousal : apparition de ressentis physiologiques par l'activation de la branche sympathique du système nerveux autonome ;
- L'activité cognitive : interprétation cognitive de l'événement déclencheur, permettant de labéliser le ressenti émotionnel en colère, peur, dégoût, surprise, joie ou tristesse.

Stimulus Désagréable	Stimulus Neutre	Stimulus Agréable
Image 2352.2 pouvant par exemple provoquer le Dégout	Image 5395 pouvant être considérée comme Neutre	Image 2550 pouvant par exemple provoquer le Plaisir
		
Pleasure : 2,09 Arousal : 6,25 Dominance : 3,45	Pleasure : 5,34 Arousal : 4,23 Dominance : 5,23	Pleasure : 7,77 Arousal : 4,68 Dominance : 6,22

- Figure 1.17 – Exemples d'images IAPS avec leur cotation

La mesure des réactions émotionnelles dépendra de la nature du stimulus présenté aux participants. Les matériels les plus fréquemment employés sont des images, des films, des sons... Les principales bibliothèques structurées et étalonnées sont les suivantes :

- La bibliothèque d'images nommée IAPS (International Affective Picture System) a été proposée par Lang *et al.* (1997). Ces 700 images IAPS ont été évaluées sur les trois dimensions décrites dans le paragraphe consacré à la mesure de la réaction émotionnelle dans ce chapitre : Plaisir (*valence*), Excitation (*arousal*) et Dominance (Lang *et al.*, 1980). Chaque dimension comporte neuf niveaux, le niveau 1 étant le niveau désagréable ou de faible excitation. Les images peuvent ainsi être classées comme désagréables ou agréables, plus ou moins excitantes, En 2016, une étude établit une norme française en testant 120

images IAPS sur une population française âgée de 20 à 88 ans (Bungener *et al.*, 2016). La Figure 1.17 donne quelques exemples d'images et leur évaluation moyennée homme/femme sur les 3 dimensions.

- La bibliothèque d'images nommée Nencki Affective Picture Système (NAPS) qui propose 1356 photographies réalistes réparties en cinq catégories (*personnes, visages, animaux, objets et paysages*). Cette base de données est une variante intéressante à l'IAPS car les 204 personnes recrutées pour évaluer ces images étaient européennes. Par ailleurs cette base de données est plus récente, ce qui est important compte-tenu des évolutions rapides de nos sociétés (Marchewka *et al.*, 2014).
- Gross et Levenson (1995) proposent 16 séquences vidéos illustrant des scènes de la vie quotidienne, et évaluées sur une population anglaise et américaine. D'autres auteurs ont proposé une sélection de films aux contenus émotionnels (Schaefer *et al.*, 2010), et une bibliothèque assez complète contenant plus de 160 séquences vidéos a été développée par le Laboratoire LIRIS (LIRIS-ACCEDE) pour entraîner des logiciels de Learning machine (Baveye *et al.*, 2015).
- La bibliothèque « International Affective Digitized Sounds (IADS) » est une base de données présentant 111 bandes sonores permettant l'étude des réactions émotionnelles. Ces bases ont été testées par plusieurs auteurs qui s'accordent sur l'efficacité de ce matériel (Stevenson & James, 2008). Selon Gil (2009), la musique provoque des réactions émotionnelles rapides (*de l'ordre de 500 ms*).
- Bradley et Lang (1999) proposent un système normalisé présentant près de 600 mots affectifs en anglais. Comme pour les bases normatives IAPS et IADS développées par ces mêmes auteurs, les mots affectifs proposés dans l'Affective Norms for English Words (ANEW) ont été évalués sur trois dimensions (Bradley & Lang, 1994). Ce modèle est intéressant, mais compte-tenu que ces mots sont en anglais, il est possible que d'autres populations ne se retrouvent pas dans ces référentiels lexicaux, affectifs et culturels.

Parmi les autres méthodes utilisées, on trouve la technique de rappel autobiographique, développée par Strack *et al.* (1985), qui demande au sujet d'écrire 3 situations qui rendent le participant heureux, puis de décrire lors de l'interview, la situation qui a été la plus chargée émotionnellement. Ces interviews étudient généralement les traumatismes rencontrés par les individus. Une multitude d'autres stimuli émotionnels existent mais peu d'entre eux semblent être adaptés à l'étude de produits. Parmi ces techniques non normalisées, des études portent sur l'impact émotionnel de la couleur, de l'odeur sur les individus. Toujours en utilisant des supports visuels (*Sites internet*), des chercheurs se sont intéressés à déterminer si les couleurs avaient un impact sur la mémorisation et sur l'intention d'achat de l'internaute. Leurs résultats ont montré que la couleur jouait beaucoup plus sur l'attitude du consommateur, que le choix de la teinte, luminosité et saturation. De la même manière, l'arrière-plan d'un site web affecte les capacités de mémorisation (Pelet, 2008). L'influence de l'odeur d'un produit a également été testé, montrant que l'appréciation de l'odeur de produits cosmétiques est de nature à favoriser les ventes (Barkat *et al.*, 2003).

Plusieurs études de l'émotion reposent sur l'incidence du toucher affectif. René Spitz (1945) fut le premier à montrer l'importance du toucher dans le développement psycho-affectif de jeunes nourrissons privés de contact maternel. Plus tard, Harry Harlow (1958) a montré que la privation de caresses conduisait à la dépression et aux comportements agressifs chez les primates. Ces études ont montré le lien entre le toucher et le développement relationnel et émotionnel. D'autres chercheurs

ont étudié les effets émotionnels du toucher. Le toucher est connu pour avoir des impacts sur la cognition. Schirmer et Adolphs (2017) ont réalisé un protocole de test qui intégrait un « toucher » prodigué par un ami ou par un dispositif tactile durant la projection d'images IAPS. Le fait d'être touché modifiait l'évaluation émotionnelle de l'image. La zone corticale impliquée dans le toucher agréable, neutre ou douloureux a également été étudiée en IRMf à partir de matériaux (*bois brut de sciage, bois lisse, papiers de verre, fourrure, ...*) (Rolls *et al.*, 2003). Le toucher plaisant a été observé sur une patiente atteinte du syndrome de Guillain-Barré à partir de caresses prodiguées avec un pinceau sur la surface de la peau velue. D'autres protocoles ont utilisé des stimulations tactiles mais très peu d'études traitent du toucher émotionnel.

3.2 Réactions émotionnelles

Pour Levenson (1999) et Gross (2010), l'émotion est un phénomène rapide déclenché par un événement, qui engendre une réponse émotionnelle cohérente selon trois composantes : subjective, expressive et comportementale, physiologique. Ces trois composantes sont données dans la Figure 1.18, et nous allons les analyser successivement.

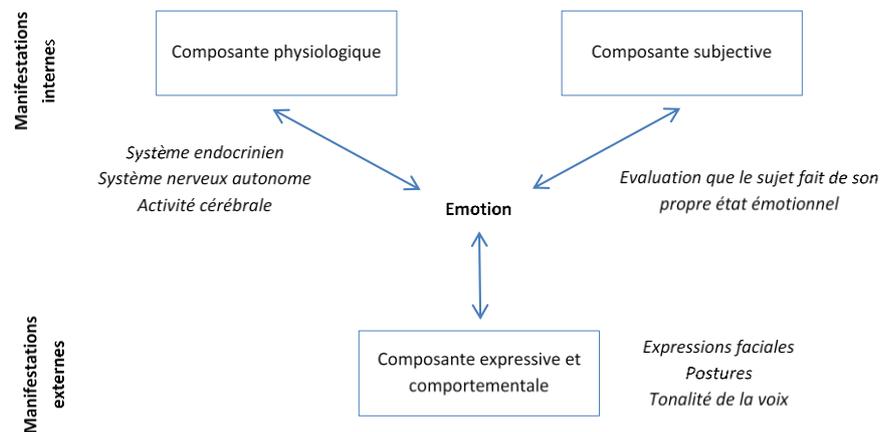


Figure 1.18 – Les trois composantes de la réponse émotionnelle

3.2.1 Composante subjective

La caractérisation de cette composante s'effectue principalement à l'aide de questionnaires d'auto-évaluation qui questionnent les participants sur leurs ressentis émotionnels à partir d'échelles souvent « défavorable – favorable » qui situent l'intensité du critère évalué. Ces mesures permettent généralement de collecter les ressentis hédoniques, le niveau d'attractivité, le plaisir qu'exerce un produit.

Mehrabian et Russell (1974) proposent le modèle S-O-R « Stimulus-Organisme-Réponse », qui permet d'analyser le rôle des stimuli de l'environnement sur les émotions des consommateurs. Ce modèle a la caractéristique de se concentrer sur les ressentis émotionnels internes que sont le Plaisir (*valence*), l'Arousal et la Dominance pour expliquer les réponses comportementales. Cette approche méthodologique a été utilisée dans différentes études portant sur la mesure de l'impact émotionnel que produisent les attributs sensoriels d'un environnement, d'une marque ou d'un produit (Sherman

et al., 1997; Lee *et al.*, 2011 ; Murray, 2012). L'échelle PAD (*Plaisir – Arousal – Dominance*) permet l'évaluation des réponses émotionnelles sur trois dimensions.

Plus tard, dans son Model Circumplex décrit dans la Figure 1.19, Russell (1980) se concentre sur la valence et l'arousal pour estimer une réaction émotionnelle. La valence correspond à la qualité agréable ou désagréable d'un stimulus et le caractère plaisant ou déplaisant d'une émotion. L'arousal correspond au niveau d'éveil corporel produit par le ressenti émotionnel. Les réponses expressives et comportementales initiées par les réponses descendantes provenant de la formation réticulée, de l'amygdale et de l'hypothalamus communiqueront sur l'arousal, la saillance émotionnelle, c'est-à-dire l'intensité, le niveau d'excitation corporelle qui produira les réponses végétatives et motrices spécifiques à l'émotion détectée (Fuller *et al.*, 2011; Edlow *et al.*, 2012). Ce modèle bidimensionnel est aujourd'hui adopté par un grand nombre de chercheurs, et certains chercheurs l'utilisent pour évaluer l'humeur (Vastenbrug *et al.*, 2011 ; Desmet *et al.*, 2016). C'est le modèle que nous avons utilisé pour estimer la composante subjective des réactions émotionnelles lors de tests.

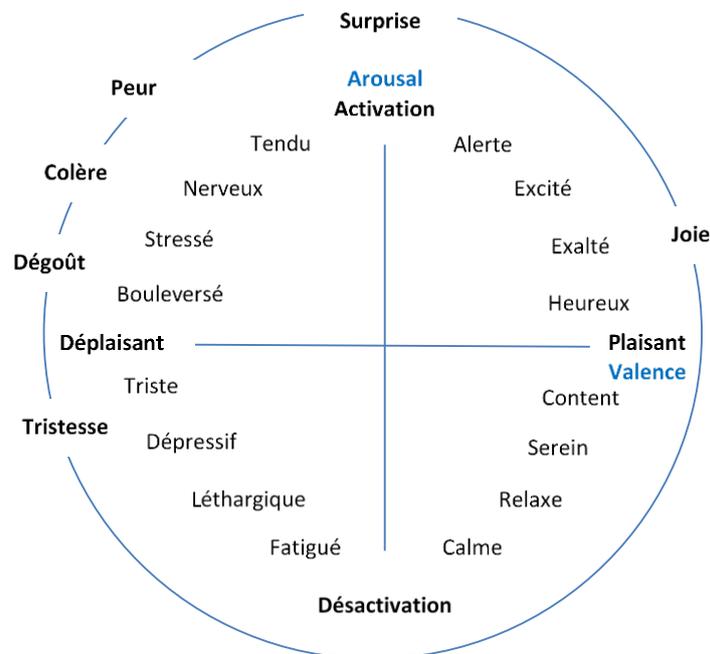


Figure 1.19 – Model Circumplex (Russell, 1980)

D'autres modèles ont été développés, mais sont peu applicables à nos tests. On peut citer principalement :

- Le Self-Assessment Mankini (SAM), souvent recommandé pour évaluer les ressentis émotionnels, propose d'évaluer la Valence, l'Arousal et la Dominance en auto-évaluation à partir de petites illustrations (Bradley & Lang, 1994).
- Le Sensual Evaluation Instrument (SEI) est une méthode d'évaluation d'Interfaces Homme Machine développée par Isbister *et al* (2007). Cette méthode est intéressante car elle propose une évaluation émotionnelle « non verbale » estimée à partir de la préhension en main de 8 objets sculptés, mais elle est peu applicable à nos tests.
- Le « Need for touch scale » a été développé par Peck et Childers (2003). C'est une méthode développée en marketing pour mesurer le « besoin de toucher » du consommateur

(Holbrook & Hirschman, 1982 ; Rook & Fisher, 1995 ; Peck & Childers, 2006 ; Nuszbaum *et al.*, 2010 ; Bertheaux *et al.*, 2020).

La part des traitements inconscients et végétatifs est très importante car elle conditionne la réponse émotionnelle (*valence*) et le niveau d'activation corporel (*arousal*). L'autre partie, les traitements conscients entraînent un jugement élaboré, souvent nuancé, contrôlé par le sujet qui intervient après un processus complexe d'analyse.

Pour interroger les jugements hédoniques, on utilise généralement des tests verbaux déclaratifs. Les réponses formulées par les sujets dépendent de facteurs individuels et contextuels comme le niveau d'expertise, la nouveauté du concept, l'ambiance qui environne la découverte du produit, Ces réponses verbales ont souvent été critiquées compte-tenu des biais qu'elles comportent (Nisbett & Wilson, 1977). Par ailleurs, les résultats obtenus avec les méthodes de mesure du temps de réponse ont suggéré que les réponses verbalisées ignorent souvent l'arbitrage réalisé lors des traitements inconscients, montrant qu'une partie du raisonnement échappe à notre conscience. Les consommateurs éprouvent également des difficultés à formuler le fond de leur pensée ce qui induit également des biais de réponse qui peuvent produire des réponses erronées. La fiabilité des réponses verbales est par conséquent contestée et donc ces tests doivent être réalisés suivant un protocole bien étudié. Par ailleurs de nombreux tests présentés dans le Chapitre 3 utilisent des descripteurs qui permettent de décrire l'ambiance émotionnelle, les ressentis hédoniques mais n'abordent pas l'émotion comme nous venons de la traiter. Ainsi, pour véritablement mesurer l'émotion d'un produit, il faudra adopter un questionnaire basé sur l'exploration des ressentis émotionnels internes que sont la valence et l'arousal, qui traduisent verbalement l'activité du système nerveux autonome.

3.2.2 Composante expressive et comportementale

La composante expressive et comportementale de l'émotion est connue depuis les travaux de Charles Darwin (1872) sur les réactions comportementale et expressive de l'émotion. Depuis, plusieurs chercheurs s'entendent pour dire que le déclenchement des expressions faciales est initié par un processus d'activation périphérique spécifique qui intervient de manière automatique. Les expressions faciales sont considérées comme universelles et innées. De ce fait, on considère que l'analyse des expressions faciales traduit véritablement l'émotion ressentie par le sujet car son processus est initié par des traitements implicites. Une caméra et un logiciel de traitement suffisent pour analyser les expressions faciales. Ces dispositifs de mesure des expressions faciales reposent généralement sur le système FACS (*Facial Action Coding System*) qui a été développé par Ekman et Friesen (1976, 1978). Dans cette méthode, les mouvements des visages sont décomposés en 46 Unités d'Action. Chaque Unité d'Action correspond au mouvement d'un muscle. L'observation d'une combinaison d'Unités d'Action permet de reconnaître le type d'émotion. Par exemple, l'expression de la joie mobilise les Unités d'Action 6 et 12, ainsi le sourire entraîne la remontée des joues et l'étirement du coin des lèvres.

Depuis quelques années, on assiste à la naissance de la reconnaissance faciale ou de la lecture des expressions faciales (Benton, 1990 ; Tasli *et al.*, 2014), et des logiciels se sont spécialisés dans la lecture des expressions faciales. Par exemple, le logiciel Face Reading[®] permet de lire 8 états émotionnels (*neutre, joie, colère, tristesse, mépris, surprise, dégoût et peur*). Ce logiciel mesure les

expressions faciales en temps réel, ce qui est utile car par exemple dans une conversation nous passons simultanément par plusieurs émotions. Cependant, l'interprétation des expressions faciales est complexe et ne s'opère qu'après une sérieuse formation.

En complément des analyses faciales, d'autres méthodes sont employées :

- L'Electromyographie (EMG) est un système qui enregistre l'activité électrique engendrée par les mouvements musculaires. Cette technique est considérée comme non-invasive bien que la mesure de la tension musculaire s'effectue à l'aide d'électrodes placées sur le muscle à la surface de la peau. Cet outil est assez précis car il permet des mesures de signaux courts et de petites amplitudes. Cette résolution est intéressante car elle permet de mesurer des réactions musculaires à peine visible. La mesure est représentée sous la forme d'un électromyogramme qui s'interprète après une importante formation (Cacioppo *et al.*, 1988 ; Vrana, 1993 ; Van Boxtel, 2010). L'électromyographie permet de labelliser l'émotion (*valence*) et de connaître l'intensité de l'émotion (*arousal*) (Cacioppo *et al.*, 1986 ; Witvliet, 1998).
- La prosodie de la voix est l'analyse du contenu émotionnel d'un message vocal à partir de l'étude de la fréquence fondamentale (*F0*), de l'intensité (*amplitude*) et de la durée entre les segments de parole et les silences (Johnstone & Scherer, 2000 ; Bänziger *et al.*, 2001 ; Martin, 2013). Ces paramètres changent en fonction de l'émotion exprimée. Scherer *et al.* (1991) ont identifié les paramètres acoustiques qui décrivent les émotions primaires. Comme pour les expressions faciales, la mesure de la prosodie de la voix nécessite uniquement un micro et un logiciel de traitement, mais l'interprétation des résultats peut s'avérer assez complexe.
- L'étude de la posture des individus s'effectue en Posturologie suivant les Normes 1985 de l'AFP éditées par l'ADAP, et permet également de connaître l'état émotionnel d'un individu (Maugendre, 2016).
- Une signature thermique est parfois attribuée à chaque émotion, en fonction de l'âge.

L'intérêt des méthodes d'évaluation des composantes expressives et comportementales est de permettre une mesure objective des émotions primaires qui renseigne principalement sur la valence, c'est-à-dire, si l'émotion est positive (*joie, surprise positive*) ou négative (*tristesse, colère, peur, dégoût, surprise négative*). L'utilisation de logiciels permet de reconnaître les ressentis émotionnels en temps réel de manière fiable et répétitive. L'autre avantage de ces méthodes est qu'elles ne sont pas intrusives et permettent la lecture des expressions faciales, de la posture, de la prosodie de la voix à distance, sans que cela ne puisse être perçu par l'individu. La limite de la mesure des expressions faciales est que l'absence d'expressions faciales ne traduit pas forcément l'absence d'émotion, ou qu'un rhume peut parfois altérer la voix.

3.2.3 Composante physiologique

La réaction du système nerveux autonome dans l'émotion est indéniable et a été fréquemment relevée. Plusieurs auteurs contemporains s'entendent pour dire que l'activité du système nerveux autonome traduit l'intensité de la réaction émotionnelle (Bensafi *et al.*, 2002 ; Hagemann *et al.*, 2003 ; Shiota *et al.*, 2011). Depuis quelques années, certains chercheurs pensent que « *les émotions ont des objectifs distincts et nécessitent une activité autonome différenciée pour effectuer la protection du corps et préparer les réponses comportementales* », ce qui permettait d'étiqueter l'émotion en observant la réponse d'une série d'équipements de mesures physiologiques (Cacioppo *et al.*, 1997, 2000 ; Stemmler, 2003, 2004 ; Wacker *et al.*, 2003).

Kreibig (2010) a réalisé un état de l'art sur les mesures traduisant l'activité du système nerveux autonome. Cette étude révèle que seules les émotions extrêmes (*la peur, la colère, le dégoût, l'anxiété, la joie*) engendrent des changements corporels conséquents, et que les émotions positives ou négatives faiblement « éveillantes » comme le contentement, le plaisir, la tranquillité, la détente, la gêne, sont difficiles à mesurer et demandent de plus grandes investigations. La limite d'utilisation du système nerveux autonome comme indicateur du ressenti émotionnel réside dans le fait qu'il n'y a pas de relation univoque entre l'émotion et les changements d'activation autonome. En effet, des changements d'état émotionnel peuvent se produire sans que l'on puisse constater de changements autonomes et des changements d'autonomie peuvent se produire sans être associés à un état émotionnel. Nous savons maintenant que l'émotion peut se traduire par d'autres manifestations physiologiques telles que la fréquence respiratoire, la fréquence cardiaque, la sudation, l'activité électrique du cerveau, la dilatation de la pupille... Nous les décrivons ci-dessous, avec une analyse plus détaillée de la dilatation de la pupille, que nous avons utilisée lors de nos tests.

La fréquence respiratoire

La fréquence respiratoire prend en compte le nombre de cycles respiratoires (*inspiration et expiration*) par unité de temps. Ce cycle varie selon l'âge passant de 30 à 50 cycles par minute chez un nouveau-né à 12 à 20 cycles par minute chez l'adulte. La fréquence respiratoire se mesure à l'aide d'une ceinture thoracique. La fréquence respiratoire modifie le taux d'oxygène dans le sang qui correspond au taux d'oxygène contenu dans les globules rouges. Ce taux est mesuré de deux manières : la prise de sang qui permettra de relever le taux de saturation artérielle en oxygène (*SaO2*) ou à l'aide d'un oxymètre de pouls ou saturomètre qui mesure la saturation pulsée (*SpO2*). La relation entre l'activité respiratoire et l'émotion est très importante. On recommande souvent de prendre une bonne inspiration avant de s'exprimer et nous savons que respirer profondément permet de tempérer ses émotions.

Comme pour la fréquence cardiaque, la fréquence respiratoire est affectée par l'action du système nerveux autonome et la sécrétion de cortisol et de l'adrénaline afin de préparer le corps à une activité physique, faire face à un stress, une situation d'alerte. La prise en compte de la fréquence respiratoire dans la mesure de l'émotion est délicate, car le relevé des caractéristiques respiratoires est : soit invasif, soit compliqué à mettre en œuvre. Cependant, plusieurs auteurs ont utilisé cette mesure pour étudier l'émotion ; une respiration rapide et profonde est généralement associée à la colère ou à la peur et une respiration lente et profonde est associée au calme et à la relaxation ([Levenson, 1992](#) ; [Palomba et al., 2000](#)). Mais d'après les travaux de Sylvia Kreibig (2010) très peu d'auteurs ont mesuré l'émotion d'après ce seul indicateur.

La fréquence cardiaque

Les réactions émotionnelles entraînent des modifications de la fréquence cardiaque (*FC*). Ces réactions physiologiques sont dues à l'action du système nerveux autonome sur les glandes surrénales (*axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien*) qui produisent deux types d'hormones : le cortisol et l'adrénaline. Le cortisol intervient dans la régulation de la pression et son rôle est d'aider l'organisme à faire face au stress en mobilisant l'énergie nécessaire pour alimenter les muscles, le cerveau et le cœur. L'adrénaline est mobilisée pour préparer le corps à une activité physique. La

sécrétion d'adrénaline aura pour conséquence d'accélérer la fréquence cardiaque, d'augmenter la force de contraction du cœur et la pression artérielle, de dilater les bronches et les pupilles. Le cœur est fortement affecté par les ressentis émotionnels et plus particulièrement dans le cas du stress. Plusieurs auteurs s'accordent pour dire que la mesure de la fréquence cardiaque est un excellent indicateur des manifestations émotionnelles car il permet de mesurer l'activité du système nerveux autonome par l'étude de la balance des deux branches orthosympathique et parasymphathique (Charier, 2019). L'électrocardiogramme (ECG) permet de visualiser ces variations. Sandrine Gil (2009) décrit l'activité cardiaque après la présentation d'un stimulus émotionnel suivant 3 phases : i) décélération du rythme cardiaque ; ii) accélération du rythme cardiaque ; iii) suivi d'une seconde phase de décélération. Pour cet auteur, l'activité cardiaque dépendrait plutôt de la valence de l'émotion. Les émotions négatives seraient reconnaissables par une première phase de décélération plus importante que chez les émotions positives, d'autre part les émotions positives auraient une phase d'accélération plus marquée que les émotions négatives. L'interprétation d'un électrocardiogramme demande une formation approfondie et plusieurs guides d'interprétation lui sont consacrés (Houghton *et al.*, 2011 ; Hampton & Hampton, 2019). Certains auteurs proposent de reconnaître les émotions à partir de l'interprétation de l'électrocardiogramme (Kim *et al.*, 2004).

La sudation

La réaction électrodermale (RED) est une manifestation électrophysiologique qui traduit l'activité du système nerveux sympathique. Cette mesure prend en compte la quantité de sueur sécrétée par les glandes sudoripares et eccrines. Ces glandes sont principalement situées dans l'hypoderme des régions palmaires et plantaires (Groscurth, 2002). Cette sécrétion est générée par les centres d'innervation sympathique (Jänig & Kümmel, 1981). La sudation est sous le contrôle de la formation réticulée, l'hypothalamus et le système limbique qui adaptent cette fonction homéostatique selon les besoins de l'environnement. Le phénomène de sudation s'opère aux alentours des 1500 ms. Le contrôle de ces systèmes cutanés peut également être initié par le cortex frontal. La transpiration est connue pour être un marqueur significatif relevé dans des situations de stress, de grandes frayeurs, de phénomènes attentionnels, de concentration. De nombreuses études montrent le lien entre la transpiration et les réactions émotionnelles (Sequeira & Roy, 1997 ; Blair & Cipolotti, 2000, Sequeira *et al.*, 2009). Les mesures électro-dermiques se focalisent sur la variation des résistances électriques cutanées, la variation de la conductance cutanée et la réponse cutanée sympathique. Plusieurs études montrent que le niveau de sécrétion est corrélé avec l'intensité du ressenti émotionnel. La mesure de la réaction électrodermale est un moyen simple et non invasif et les mesures peuvent s'effectuer sur de nombreux emplacements du corps humain à l'aide d'électrodes. Cette mesure est considérée comme fiable bien que d'autres facteurs, comme la maladie, peuvent entraîner des phénomènes de sudation.

L'activité électrique du cerveau

L'électroencéphalographie (EEG) mesure l'activité électrique du cerveau. Ce dispositif ressemble à un casque bardé d'électrodes qui est placé sur le cuir chevelu des participants suivant les termes 10-10 ou 10-20 qui correspondent aux intervalles entre les électrodes. Les électrodes possèdent également une nomenclature renseignant sur leur position sur le cuir chevelu. Il mesure le potentiel évoqué (PE), c'est-à-dire un signal qui traduit l'activité électrique du cerveau en réponse à une stimulation extérieure, qu'elle soit visuelle, auditive, sensitive ou motrice.

L'avantage de cette mesure est qu'elle possède une excellente résolution temporelle (*au environ de 1 ms*). L'activité électrique du cerveau varie de 0,1 Hz pour un sommeil profond jusqu'à +30 Hz pour une forte excitation suivant Delta (0.1-3.5 Hz), Thêta (4-7.5Hz), Alpha/Mu (8-13Hz), Beta (14-30Hz) et Gamma (+30Hz). Trois types d'oscillation sont impliqués dans les processus du traitement émotionnel : Alpha, Mu et Delta. Une étude confirme que le rythme Alpha est lié au processus d'évaluation émotionnelle et aux tendances à l'action de type « approche et évitement » (Harmon-Jones *et al.*, 2003 ; Pizzagalli *et al.*, 2005) ; le rythme Mu est un marqueur de l'activité d'un système des neurones miroirs impliqués dans l'empathie et reflète les processus d'intégration des informations sensorielles au niveau des régions somesthésiques (Pineda & Hecht, 2009) ; le rythme Delta est impliqué dans les processus motivationnel, dans l'inhibition comportementale et dans la reconnaissance de visages émotionnels (Vallet, 2018). Comme pour la plupart des mesures physiologiques évoquées dans ce document, l'interprétation des résultats de l'électroencéphalogramme ne s'improvise pas, la complexité du cerveau ne rendant pas les choses faciles pour des personnes non initiées (André-Obadia *et al.*, 2014 ; Tatum, 2014). Son utilisation est réservée à un personnel formé et certains auteurs proposent des résultats qui permettront de différencier le type d'émotions à partir d'électroencéphalogrammes (Hinrichs & Machleidt, 1992 ; Bos, 2006).

L'imagerie médicale

Depuis les années 90, les outils d'imagerie médicale se sont développés et ont permis d'importants progrès dans le domaine des neurosciences. Ce sont des outils non-invasifs qui visualisent l'intérieur du corps. Certains tests peuvent néanmoins être irradiants et certains marqueurs peuvent être utilisés pour visualiser des réactions spécifiques. La tomographie par émission de positons (TEP), la magnétoencéphalographie (MEG) et l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) ont été largement employées pour étudier la neuro-anatomie et les relations fonctionnelles des émotions (Pichon & Vuilleumier, 2011). L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) est souvent utilisée car les participants à ces tests peuvent être examinés sur une longue durée pouvant aller jusqu'à 45 minutes. Cet équipement offre une très bonne résolution d'image (*entre 1 mm et 1 cm*) et permet de visualiser l'activité corticale en profondeur, mais sa résolution temporelle (RT) n'est pas très bonne, de l'ordre d'une seconde post-stimulus et l'usage de l'IRMf s'avère très coûteux. D'intéressants travaux cités dans le présent chapitre ont permis d'identifier le rôle de certaines zones corticales. Rolls *et al.* (2003) ont par exemple montré que les zones du cortex orbitofrontal étaient activées davantage par un toucher agréable et par des stimuli douloureux que par un stimulus neutre, montrant que cette zone était impliquée dans les touchers affectifs. Par ailleurs, leurs observations ont montré que la partie rostrale du cortex cingulaire antérieur était activée par un stimulus agréable et que les parties postérieure et dorsale du cortex cingulaire antérieur étaient activées par le stimulus douloureux. Les cortex somatosensoriels ont été plus activés par le toucher neutre que par les stimuli agréables et douloureux. Certaines zones corticales comme l'insula et certaines parties du tronc cérébral n'ont été activées que par le stimulus douloureux. Ces résultats montrent la complexité des structures corticales et l'intérêt de procéder à des études par IRMf. Plusieurs études de neuro marketing réalisées en IRMf permettent de caractériser le comportement ou d'établir les préférences du consommateur (Zurawicki, 2010).

La dilatation de la pupille

Plusieurs travaux menés sur l'étude de la pupille ont montré que l'activité cognitive et émotionnelle pouvait impacter la dilatation pupillaire (Hess & Polt, 1960 ; Lowenstein & Loewenfeld, 1969 ; Andreassi, 2000). Ces changements pupillaires ont été interprétés comme des signaux d'éveils par Paivio et Simpson (1966) lors de tests sur la représentation mentale de mots. Ces signaux d'éveils traduisent l'activation du système nerveux autonome et plusieurs autres auteurs s'accordent sur le fait que la réponse pupillaire est médiée par le système nerveux autonome qui exerce un rôle régulateur sur la pupille. La Figure 1.20 montre que le système parasympathique contrôle la contraction de la pupille et l'accommodation, tandis que le système sympathique contrôle la dilatation de la pupille.

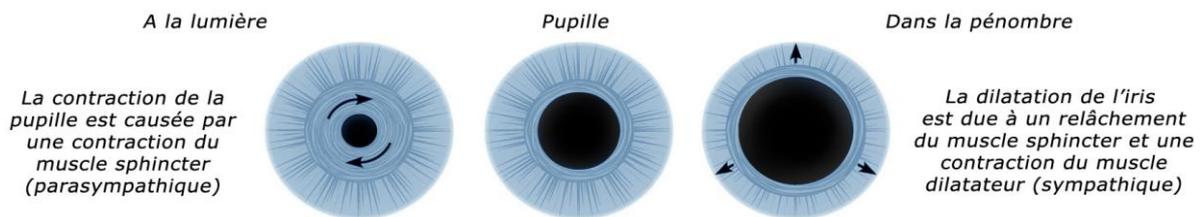


Figure 1.20 – Représentation fonctionnelle de l'iris

La mesure de la variabilité du diamètre de la pupille a d'abord été employée pour étudier le traitement mental lors de l'exécution de tâches de calcul, de raisonnement, de lecture (Hakerem & Sutton, 1966 ; Goldwater, 1972 ; Beatty, 1982). Ces travaux ont montré que la taille de la pupille variait en fonction de la difficulté de l'exercice proposé. Un pic de dilatation avait été constaté au moment où le participant solutionnait le problème (Peavler, 1974). Kahneman et Beatty (1966) ont montré que l'augmentation de la taille de la pupille était corrélée avec la quantité d'effort effectuée par la mémoire à court terme lors de la récupération des données dans la mémoire à long terme. Loewenfeld (1958) cite près de 1600 références qui présentent les phénomènes de dilatation de la pupille comme indicateur des fonctions cérébrales.

Hess et Polt (1960) furent les premiers à montrer que les changements pupillaires s'opéraient durant la présentation d'images agréables ou désagréables. Les images affectives sont des stimuli utilisés pour créer d'importantes réactions émotionnelles (*arousal*). Les résultats de Hess et Polt (1960) montrent une constriction de la pupille lorsque les participants regardent des images désagréables et une dilatation de la pupille lorsque les participants regardent des images agréables. Mais ces résultats furent contestés car leur expérience était difficile à reproduire et le nombre de participants à leur étude était très faible (*5 participants*). La mesure de la dilatation pupillaire a également été largement discutée à cause des problèmes liés à l'utilisation de stimuli visuels qui sont difficiles à contrôler (Janisse, 1977 ; Aboyoun & Dabbs, 1998). Plusieurs auteurs ont souligné la nécessité de prendre en compte les phénomènes de motilités pupillaires dans ce type de test. Les phénomènes de motilités échappent au contrôle volontaire.

La pupille réagit suivant un mode réflexe, on distingue généralement : l'**oscillation pupillaire** que l'iris effectue pour réguler la quantité de lumière qui rentre dans l'œil au fil de l'eau, du **réflexe pupillaire tonique** qui stabilise le diamètre de la pupille lorsque la lumière est intense, du **réflexe**

pupillaire phasique qui accomode le diamètre de la pupille lorsque la lumière est transitoire, du phénomène d'**accomodo convergence** qui intervient dans la vision de près et entraîne des ajustements du cristallin et une constriction de la pupille lorsque l'objet est fixé à une distance de 30 cm à 40 cm (*la vision intermédiaire située entre 80 cm et 5 mètres et la vision de loin située au-delà de 5 mètres ne nécessitent pas d'accommodation*). Ce phénomène d'accommodation a également été constaté dans les changements de couleur ce qui pose également la question de sélection des images en couleur (Kohn & Clynes, 1969).

De nombreuses études ont été menées pour analyser la pertinence de la réponse pupillaire comme indicateur de l'émotion. Les stimuli étaient très différents les uns des autres (*coup de feu, personnes vêtues ou dénudées...*), et les résultats étaient très souvent controversés (Nunnally et al., 1967 ; Libby et al., 1973 ; Steinhauer & Hakerem, 1992 ; Aboyoun & Dabbs, 1998 ; Rieger & Savin-Williams, 2012). Plus récemment, Bradley et al. (2008) ont réalisé une étude sur la mesure des réactions émotionnelles à partir d'images affectives issues de la bibliothèque d'images IAPS, en relevant le diamètre pupillaire, la réaction électrodermale et la fréquence cardiaque. Les résultats de l'étude ont montré que la dilatation de la pupille était plus importante lors du visionnage de stimuli émotionnels que lors de stimuli neutres. Par ailleurs, les résultats montraient que la réponse électrodermale suivait la réponse pupillaire confirmant une étude de Lang et al. (1993), qui avaient observé que la réponse électrodermale était plus importante lors de la visualisation d'images agréables et désagréables que pendant la visualisation d'images neutres. En revanche, la fréquence cardiaque montrait une décélération du rythme cardiaque durant la présentation d'images désagréables contrairement aux mesures observées dans les conditions agréables et neutres, qui montraient des courbes plus stables.

Partala et Surakka (2003) ont étudié la réaction de la pupille lors d'une stimulation émotionnelle auditive réalisée à partir de sons négatifs, neutres ou positifs. Leurs résultats ont montré que les diamètres de la pupille étaient plus grands dans les stimuli émotionnels que dans les stimuli neutres. Leurs résultats ont montré des différences entre hommes et femmes ; les dilatations pupillaires étaient plus fortes chez les femmes dans les conditions émotionnelles. Cette étude a confirmé que la dilatation pupillaire était corrélée avec l'intensité des stimuli émotionnels (*arousal*).

Lanatà et al. (2011) ont également souhaité savoir si la pupille pouvait être un bon indicateur pour discriminer les états émotionnels induits par la visualisation d'images aux contenus émotionnels (IAPS) en étudiant la relation entre les émotions et les réactions pupillaires. L'utilisation de la pupillométrie présentait un grand intérêt car dans cette technique aucun capteur n'avait besoin d'être attaché à l'utilisateur et d'après Lanatà et al. (2011) il y a deux raisons en faveur de l'utilisation de la pupillométrie pour mesurer les réactions émotionnelles de stimuli visuels : l'immédiateté car la réponse oculaire est très rapide (*moins de 200 ms*) et le cheminement œil-esprit est intéressant car l'œil reste fixé sur l'objet pendant que le cerveau traite la perception. La conclusion de leur étude est que la mesure de la taille des pupilles peut-être un moyen fiable pour discriminer différents états affectifs. D'autres chercheurs ont souligné la capacité de la pupillométrie à mesurer les processus involontaires et inconscients, ainsi que la qualité des observations que permet cet équipement en absence de réponses déclaratives (Laeng et al., 2012). Partala et Surakka, 2003 ont également souligné que si la mesure de la variation de la taille des pupilles était fiable, la technologie actuelle de suivi oculaire offrait une possibilité de surveillance discrète des réactions liées aux émotions. Babiker

et al., 2015 proposent d'ailleurs d'utiliser les techniques de Learning machine pour différencier les émotions positives des émotions négatives auditives avec un très bon taux de réussite.

Partant du principe que la pupillométrie pouvait être un outil de mesure objective des émotions, Lemerrier (2014) a réalisé une étude destinée à la communauté des sciences sensorielles alimentaires dans le but d'établir des mesures objectives et quantitatives des émotions relatives à la dégustation de produits alimentaires. Ces résultats ont montré qu'un équipement de pupillométrie pouvait être utilisé pour caractériser la réponse pupillaire lors de la présentation de produits alimentaires mais avec certaines réserves. La première limite concernait les conditions de dégustation qui ne paraissaient pas naturelles, compte-tenu que cette chercheuse utilisait un équipement fixe qui limitait les mouvements des participants. La seconde limite concernait les conditions d'éclairage qui devaient être maîtrisées pour fiabiliser les mesures. L'auteure recommande d'ailleurs l'utilisation d'un posémètre pour limiter les impacts de la lumière. Une autre limite était que l'instrument de pupillométrie ne pouvait pas être utilisé pour qualifier l'émotion et qu'un questionnaire devait obligatoirement accompagner les tests pour recueillir la valence de l'émotion. Car seul l'arousal peut être relevé par cet équipement (Partala & Surakka, 2003).

Plusieurs dispositifs permettent d'effectuer le suivi du parcours oculaire (*gaze-plot ou parcours fovéal*), d'étudier le temps de fixation (*heatmap ou carte de chaleur*), de relever la position de l'œil, de mesurer les clignements, de relever les variations du diamètre pupillaire, On distingue souvent le pupillomètre et le dispositif de eye-tracking (*oculomètre*). Ces dispositifs peuvent être fixes ou mobiles, placés à proximité, à distance, sur un support mural, sur un pied ou tout simplement sur des lunettes, dans un casque de réalité virtuelle.

Ces équipements sont constitués d'une ou de plusieurs caméras qui fixent le regard de l'individu et d'un logiciel qui détecte la pupille, la suit et enregistre les mouvements de l'œil. Plusieurs techniques d'enregistrement existent, on retrouve : la technique électro-oculographique (EOG) qui suppose l'emploi d'électrodes collées sur un angle de l'œil mesurant les potentiels électriques continus cornéens-rétiniens lors des mouvements oculaires ; la technique magnéto-oculographique qui nécessite l'apposition d'une lentille générant un champ magnétique à l'aide de trois bobines disposées horizontalement, verticalement ou latéralement afin de repérer la position de la pupille ; la technique du reflet cornéen qui consiste à envoyer une lumière infrarouge au centre de la pupille (*pour détacher la pupille du spectre de la lumière visible*), cette lumière est renvoyée par la cornée de l'œil à une caméra infrarouge qui la repère et après calcul d'un logiciel associé permet d'afficher la position de l'œil et les variations observées sur la pupille ; la technique vidéo-oculographie (VOG) repose sur la même technique que précédemment sauf que la lumière infrarouge illuminant l'œil amplifie la brillance de la pupille ce qui facilite son repérage par la caméra. La résolution des équipements actuels s'est nettement améliorée avec des résolutions allant de 60 Hz à 240 Hz (Granholm & Steinhauer, 2004). Le pupillomètre paraît être un équipement adapté à la pratique de la mesure de l'émotion orientée « produit », compte-tenu qu'il est non invasif, qu'il laisse une liberté de mouvement dans une version mobile et qu'il permet la mesure des processus inconscients qui sont impliqués dans l'expression des émotions primaires. Par ailleurs, plusieurs recherches récentes s'accordent pour dire qu'il fournit des résultats fiables si la mobilité pupillaire est traitée.

4. Conclusion

Ce Chapitre fait une revue des éléments principaux du processus de perception, depuis les sensations perçues à l'émotion ressentie. Les cinq sens ont tout d'abord été décrits comme un ensemble de capteurs fournissant un signal lors de stimuli proches (*toucher, goût*) ou plus lointains (*vue, odorat, ouïe*). Ensuite, le système nerveux a été présenté succinctement, en mettant l'accent sur le système nerveux autonome, auquel on attribue le rôle principal dans le transfert des sensations vers le cerveau, indépendamment de notre contrôle. Enfin, l'émotion est décrite comme un processus complexe, dont le déclenchement a lieu via des stimuli sensoriels, et dont les réactions peuvent être classées en trois catégories : subjective, expressive et comportementale, physiologique.

Nous avons donc réalisé des expériences, dans le but de mieux cerner la réaction émotionnelle à un stimulus sensoriel. Le toucher et la vue sont les deux sens utilisés, la réaction émotionnelle est analysée via la composante subjective à l'aide d'un panel et la composante physiologique via une mesure de la dilatation de la pupille. Le panel sera interrogé sur la base du modèle de Russel (1980), qui est actuellement jugé assez représentatif des manifestations corporelles et cognitives constatées dans l'expression des émotions. Nous allons donc collecter la valence, c'est-à-dire faire estimer la qualité agréable ou désagréable d'un stimulus, et l'arousal, qui correspond aux réactions corporelles déclenchées par le stimulus. Les réponses seront comparées aux mesures de pupillométrie.

L'utilisation de panels est parfois contestée car on observe une grande variabilité de réponses qui s'explique en partie par l'existence de certaines différences génétiques entre individus (Koelega, 1979 ; Amoore, 1979, Meilgaard *et al.*, 1999). Nous savons que pour obtenir des mesures qualitatives et quantitatives les plus objectives possibles, les tests d'évaluation doivent être clairement définis et répétables. Ces mesures « subjectives » s'effectuent généralement à l'aide d'un panel entraîné considéré comme un véritable « capteur de mesure », mais certaines « études cliniques » ne nécessitent pas de panel entraîné. Les chercheurs de ces disciplines préféreront définir une « loi de comportement » en étudiant un individu « type ». Statistiquement, la qualité de l'information augmentera bien évidemment avec le nombre d'individus (Moskowits, 1983). Enfin, la qualité des mesures dépendra du protocole employé. Certains auteurs ont souligné les effets de cadrage que suscitent certaines questions (Tversky & Kahneman, 1981 ; 1986) et Stone et Sidel (2012) ont identifié quelques biais qui peuvent apparaître lors de la conduite d'enquêtes et qui devront être surveillés.

Le choix d'un équipement de mesure de type pupillométrie se justifie par sa capacité à mesurer l'activité du système nerveux autonome. Cette activation corporelle résulte de traitements inconscients qui échappent totalement au niveau de conscience de l'individu. La mesure de cet indicateur permettra de relever l'intensité de la réponse corporelle, c'est-à-dire l'activité des sous-systèmes sympathiques lors de stimulations tactiles (*proximité*) et visuelles (*éloigné*). Bradley *et al.* (2008) et Lanatà *et al.* (2011) ont en particulier utilisé la pupillométrie pour mesurer les états émotionnels induits par la visualisation d'images. Leurs résultats ont montré que l'utilisation de la pupillométrie présentait un grand intérêt car cette technique était non invasive et que la pupille réagissait très rapidement aux stimuli émotionnels (*moins de 200 ms*). En revanche, à notre connaissance, aucune mesure de pupillométrie n'a été réalisée pour analyser la réponse émotionnelle à un stimulus tactile.

CHAPITRE 2

ANALYSES EXPERIMENTALES

On reconnaît l'importance du système visuel dans la recherche et l'appréciation des qualités d'un produit, et l'importance du toucher dans la prise de décision lors de l'acte d'achat ; l'usage d'un produit reposant principalement sur l'action et la coordination de ces deux sens. Partant du principe que la perception d'un produit s'effectue par un processus d'intégration de « Sensations » provenant de nos récepteurs sensoriels, le présent chapitre décrit deux expérimentations, une sur le toucher de la surface d'un matériau, et l'autre sur la visualisation d'une image. Ces expérimentations visent à déterminer s'il est possible d'établir une « valeur émotionnelle », en comparant le recueil de mesures auto déclarées réalisées à l'aide du Model Circumplex de Russell (1980) avec l'enregistrement de la réponse du système nerveux autonome par un système de pupillométrie.

La première expérimentation, sur le toucher, vise donc à déterminer si la pupille réagit à une « Sensation » acquise par le système haptique, tandis que la seconde, sur la vue, vise à déterminer la réaction de la pupille lorsque la « Sensation » est acquise par le système visuel. Dans les deux cas, la réaction de la pupille sera corrélée à la valeur émotionnelle déclarée par le panel. Cette approche neurocognitive permettra de mieux connaître les réactions végétatives que procure la vision d'un produit ou le toucher d'une surface, réactions végétatives permettant ensuite de mieux identifier les formes, les couleurs, les graphismes, les matières, les effets de matières, ... qui seraient susceptibles d'emporter l'acceptabilité du consommateur et de maximaliser l'émotion induite par un produit.

1. Toucher de la surface d'un matériau

L'appréciation hédonique d'un produit repose en partie sur les qualités tactiles des objets. On appréciera la douceur, la chaleur, le confort d'un grip réalisé en élastomère, la dureté, la fraîcheur d'un flacon de parfum, la souplesse, l'aspect fibreux d'un tissu. Ces propriétés tactiles reposent sur le choix du matériau, sa formulation et son traitement de surface.

Les matériaux possèdent des propriétés très différentes, qui varient en fonction de nombreux paramètres que l'on peut caractériser à l'aide de mesures physiques ou sensorielles : masse, volume, résistance aux UV, aux conditions extérieures, à la résistance aux rayures, au vieillissement, au feu, aux chocs, à la capacité d'isolation thermique, sonore, à l'état (solide, liquide, gazeux), couleur, relief, rugosité, dureté, aspect, forme (blocs, briques, mousses, pâtes, fluides, feuilles, films, rubans, rouleaux, toiles, grilles, dentelles, plaques, panneaux, granulés, fibres, poudres, tiges, profilés, ...), à des caractéristiques écologiques (recyclé, recyclable, renouvelé, renouvelable), au niveau d'opacité ou de transparence, ...

Les propriétés des matériaux sont bien décrites dans la bibliographie, mais aucune approche scientifique ne décrit la mesure de leur valeur émotionnelle. Zuo *et al.* (2001) ont développé une première approche permettant de décrire les qualités perçues des matériaux à partir de l'étude de quatre dimensions : la géométrie (relief, forme, aspect de surface, rugosité), les propriétés physico-chimiques (thermique, dureté, brillance, pégosité), la composante associative (voir si le matériau

peut être comparé avec un autre stimulus) et le ressenti émotionnel (confort, beauté, élégance, nouveauté). D'autres études complètent l'approche sémantique des matériaux par l'adjonction de lexiques sensoriels, émotionnels ou perceptifs (Melzack, 1975; Essick *et al.*, 1999, 2010; Guest *et al.*, 2011; Cardello & Jaeger, 2016). Mais ces approches ne décrivent pas véritablement de méthodes permettant d'évaluer la valeur émotionnelle des matériaux.

Dans l'expérimentation décrite ci-dessous, le choix des matériaux est tout d'abord justifié, puis le panel et le protocole sont décrits. Enfin, les résultats obtenus sont présentés et analysés.

1.1 Choix des matériaux

Nous avons donc sélectionné 12 matériaux, et mis en place un protocole qui permet d'effectuer la mesure émotionnelle de ces matériaux. Pour cela, deux critères ont été utilisés : Le premier critère était que les matériaux devaient être assez représentatifs des expériences tactiles que l'homme pouvait rencontrer dans sa vie quotidienne. Le second critère était que les matériaux devaient être sélectionnés suivant 3 conditions : désagréable, neutre, agréable.

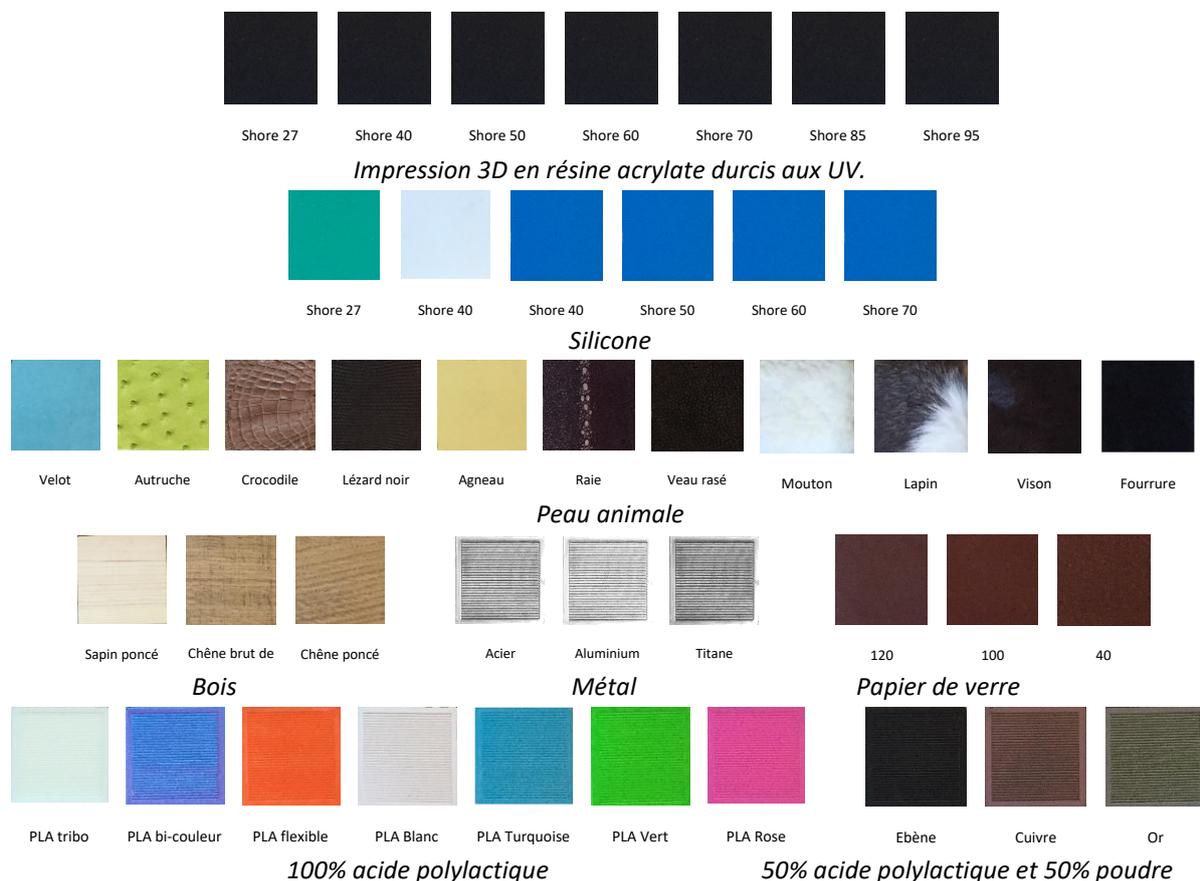


Figure 2.1 – Bibliothèque des matériaux utilisés

Une partie des qualités d'un objet peut s'appréhender par le système visuel, mais certaines sont invisibles. Le besoin de toucher « avant d'acheter » a d'ailleurs bien été mis en évidence (McCabe & Nowlis, 2003). Le « toucher » établit un lien entre ce que l'on imagine en percevant le produit par la vue et les sensations réelles perçues par le système haptique au contact du produit. Or, il est très difficile de caractériser les propriétés d'un matériau en se basant uniquement sur la rugosité

(*rugueux vs. lisse*), la dureté (*dur vs. mou*) et l'élasticité (Hollins *et al.*, 2000). La perception tactile intègre également des « informations émotionnelles » qui peuvent modifier notre appréciation d'un objet. La vue nous permettra d'apprécier certaines qualités d'un produit mais la perception des propriétés tactiles d'un objet renforcera ou changera notre jugement et du fait influencera notre acceptabilité.

Pour débiter l'expérimentation, nous avons donc déterminé les matériaux qui provoquent le plus de réactions émotionnelles. Dans ce but, nous avons rassemblé plusieurs matériaux appartenant à différentes classes dans le but de procéder à des tests préliminaires. La bibliothèque de matériaux décrite dans la Figure 2.1 n'est pas exhaustive, car plusieurs familles de matériaux existent : Béton et Minéraux, Bois et Dérivés, Composites et Composés, Métaux et Alliages, Papiers et Cartons, Plastiques et Elastomères, Textiles et Cuirs, Végétaux et Animaux, Verres et Céramique. Notre sélection a été réalisée à partir d'une consultation d'articles relatifs à l'étude des seuils de perception, de la force exercée, de la vitesse de déplacement, de l'acuité tactile, de la douleur et du toucher agréable (Greenspan *et al.*, 1991; Thieulin, 2017). De plus, certains de ces matériaux ont été testés en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). Ces études ont apporté des résultats importants avec l'identification des zones du cerveau activées lors d'une perception tactile. Par exemple, une partie du cortex orbitofrontal est concernée par la représentation des ressentis tactiles positifs (Francis *et al.*, 1999), et des zones spécifiques du cerveau sont impliquées dans les ressentis tactiles désagréables, neutres et agréables (Rolls *et al.*, 2003).

Le nombre de matériaux étant trop important pour notre expérimentation, nous avons réalisé une étude préliminaire, sur une base purement déclarative, qui nous a permis de sélectionner dans la base de la Figure 2.1 deux séries d'échantillons :

- Une **série 1** composée de 6 échantillons considérés *a priori* comme « neutres » : PLA turquoise, vert et rose, échantillons avec 50% de poudre métallique de cuivre et d'ébène, et échantillon métallique en titane. Ces échantillons sont représentés dans la Figure 2.2. Ils ont été imprimés en 3D par fil fondu lorsqu'ils sont à base de PLA, et par SLM (Selected Laser Melting) pour le titane. Ils ont tous la même forme décrite dans la représentation CAO de la Figure 2.2.

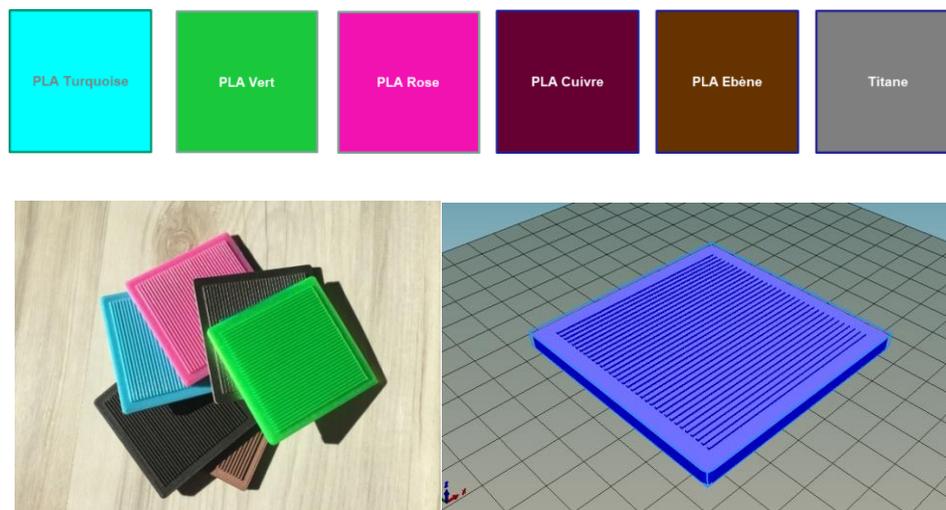


Photo des échantillons

Représentation CAO

Figure 2.2 – Échantillons sélectionnés pour la **série 1**

- Une **série 2** de matériaux considérés comme agréables, neutres et désagréables, qui ont été utilisés dans l'étude de *Rolls et al.* (2003) : le velours, la fourrure, le chêne poncé, et trois nuances de papier de verre, avec différentes rugosités. Ces échantillons sont représentés dans la Figure 2.3.

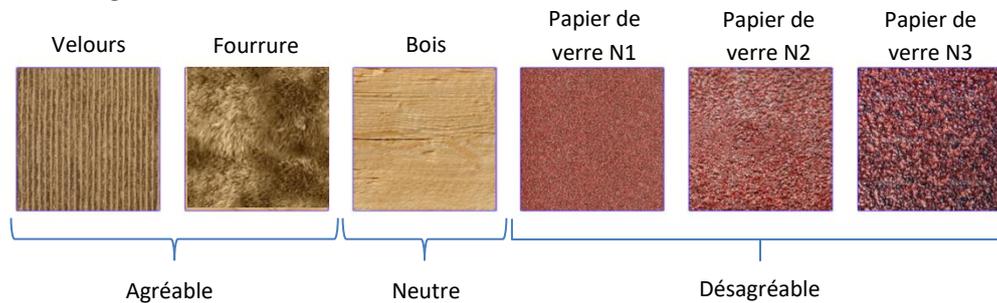


Figure 2.3 – Echantillons sélectionnés pour la **série 2**

Les matériaux souples comme le velours, la fourrure et les papiers de verre ont été collés sur un support en sapin de 70 x 70 x 5 mm, soient des dimensions identiques aux échantillons de la **série 1**.

1.2 Caractérisations physiques

Lederman et Klatzy (1987) furent parmi les premiers à détailler l'exploration tactile et la reconnaissance des objets par le toucher. Dans leur article, ils recommandaient de procéder à l'exploration d'une texture en effectuant des mouvements modérément rapides, d'avant en arrière sur une petite zone homogène de la surface. Plus tard, le protocole d'expérimentation tactile réalisé pour utiliser le référentiel tactile Sensotact® propose d'analyser la topographie d'une surface par un déplacement tangentiel du doigt. Lors de l'exploration tactile d'un matériau, le doigt aurait un rôle de filtre passe bas, c'est-à-dire qu'il laisse passer les basses fréquences et atténue les hautes fréquences (Depledge, 2009).

Les perceptions tactiles provenant d'un toucher tangentiel varient suivant deux composantes : i) les propriétés de l'échantillon (*état de surface, nature des matières, l'effusivité thermique...*) et ii) les effets induits par le geste (*pression exercée, vitesse, force d'adhérence, ...*). Le référentiel tactile Sensotact® situe la pression d'appui du doigt sur la surface lors du toucher tangentiel entre 0,4N et 1N (Lederman, 1991), et la vitesse mesurée pour apprécier la texture des surfaces ou procurer le plaisir tactile est située entre 0,5 et 25 cm/s (Katz, 1925, Essick et al., 1999). En comparaison, Van Hooijdonk et al. (2019) situent la vitesse d'une caresse entre 1 et 10 cm/s. La sensibilité tactile de l'extrémité du doigt dépendra du nombre de mécanorécepteurs qui peut varier en fonction de la taille du doigt et du genre ; on compte 2500 récepteurs par mm² (Dillon et al., 2001 ; Peters et al., 2009, Abdouni et al., 2017, 2018). La stimulation mécanique au contact d'une surface se produit à partir d'un enfoncement du doigt dans la surface de 6 µm. La surface moyenne de contact du doigt varie entre 1 et 2 cm² et l'être humain est capable de différencier des aspérités microscopiques à partir de 45 µm (Ekman et al., 1965 ; Crochemore, 2004). Il n'est également possible de distinguer deux sources de stimulations tactiles différentes qu'à partir d'un éloignement de 2mm (Philippe, 1916).

Compte-tenu de ces éléments, l'aspect de surface des 12 échantillons a été analysé à l'aide d'un microscope optique. La Figure 2.4 donne deux exemples de surfaces observées. Si les échantillons de la **Série 1** réalisés en impression 3D montraient des propriétés comparables, les échantillons de la **Série 2** présentaient des états de surface très différents qui s'expliquent par leurs grandes variétés de propriétés : fibreuses, râpeuses, lisses, rainurées,

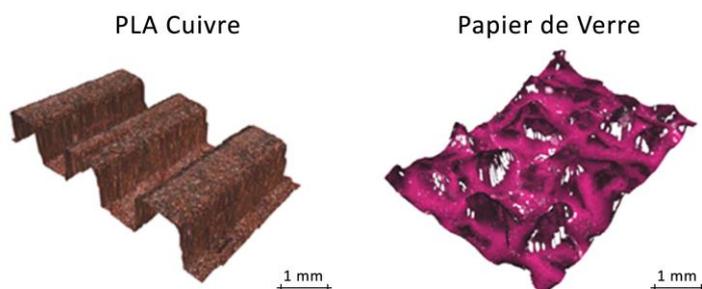


Figure 2.4 – Exemple de caractérisation des matériaux utilisés pour nos expérimentations

Par ailleurs, la zone de contact du doigt peut être très différente d'un matériau à l'autre. La zone de contact du doigt avec le PLA est beaucoup plus petite que la zone de contact du doigt avec la fourrure qui a un côté enveloppant et recouvre une plus grande partie du doigt. Il était donc intéressant de déterminer s'il existe différentes pressions d'appui. Une mesure de pression a donc été effectuée sur une table d'effort reliée à un amplificateur de charge KISTLER. Ces mesures ont été réalisées sur un unique sujet, qui avait comme consigne d'explorer le matériau avec un toucher tangentiel lent d'avant en arrière. Une série de 10 mesures a été réalisée et nous a permis de connaître la pression d'appui moyenne pour chaque matériau (Figure 2.5). Les résultats sont tout à fait cohérents avec le référentiel Sensotact®.

Nom de l'échantillon	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	Test 9	Test 10	Moyenne
Série 1											
PLA Ebène	0.32	0.31	0.30	0.31	0.31	0.31	0.33	0.33	0.33	0.33	0.318 N
PLA Vert	0.36	0.37	0.36	0.37	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.374 N
PLA Cuivre	0.26	0.25	0.25	0.25	0.25	0.26	0.25	0.26	0.26	0.26	0.255 N
PLA Turquoise	0.38	0.37	0.37	0.36	0.35	0.35	0.36	0.35	0.34	0.35	0.358 N
Titane 3D	0.41	0.42	0.42	0.41	0.42	0.41	0.43	0.41	0.40	0.44	0.417 N
PLA Rose	0.32	0.33	0.32	0.34	0.34	0.32	0.34	0.31	0.30	0.31	0.323 N
Série 2											
Velours	0.41	0.39	0.39	0.38	0.36	0.36	0.36	0.36	0.37	0.36	0.374 N
Fourrure	0.33	0.31	0.30	0.30	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.298 N
Bois Chêne – Finition rabotée	0.23	0.23	0.24	0.23	0.25	0.24	0.24				0.237 N
Papier de verre – N1	0.61	0.63	0.63	0.60	0.63	0.63	0.62	0.59	0.63	0.65	0.622 N
Papier de verre – N2	1.05	1	1.08	0.98	1.04	1.07	1.02	1.04	1.06	-	0,93 N
Papier de verre – N3	1.77	1.24	1.18	1.31	1.35	1.42	1.32	-	-	-	1.37 N

Figure 2.5 – Pression d'appui des matériaux des séries 1 et 2

1.3 Protocole expérimental

Pour réaliser les expérimentations, 25 étudiants (12 hommes, 13 femmes) âgés de 18 à 27 ans ont été recrutés. Le panel ainsi constitué a subi une série de tests préliminaires :

- Un test de « Edinburg », afin de déterminer quelle était la main dominante de chaque participant (Oldfield, 1971). Ce test permet de calculer un coefficient de latéralité sur la base de l'examen de 12 tâches gestuelles qui peuvent être réalisées soit de la main gauche, soit de la main droite, soit des deux mains pour les personnes ambidextres. Le candidat doit mettre une croix dans la case de la ou des main(s) qu'il utiliserait pour réaliser les activités présentées dans le questionnaire. Lorsque la préférence est tellement forte que le candidat n'utiliserait jamais une autre main, il est invité à mettre deux croix. Le calcul du coefficient de latéralité s'effectue en effectuant la somme des points affectés à la main droite moins la somme des points affectés à la main gauche, le tout divisé par la somme totale des points. Le résultat de cette opération est multiplié par 100 pour obtenir le coefficient. Le panel s'est révélé majoritairement droitier, sauf pour une étudiante. Les participants aux tests étaient ensuite invités à utiliser leur main dominante pour réaliser les tests. Le dispositif de « décharge émotionnelle » était placé du côté de la main dominante.
- Un test de « Von Frey », pour vérifier leur acuité tactile (Von Frey, 1896). Des filaments sont calibrés pour légèrement fléchir lorsqu'une force est appliquée à la peau. A chaque filament est assignée une valeur de calibration correspondant au logarithme en base 10 de la force (mg) requise pour plier le filament en demi-cercle (Corkin, Milner & Rasmussen, 1970 ; Jones, 1989). Ce test est considéré comme réussi dès que le sujet déclare avoir perçu le stimulus tactile. Cinq filaments (2,44 ; 2,83 ; 3,22 ; 3,61 ; 3,84 N) ont été présentés sur les deux zones en rouge dans la Figure 2.6, en aveugle, par ordre croissant de rigidité. Tous les participants présentaient une perception tactile normale.

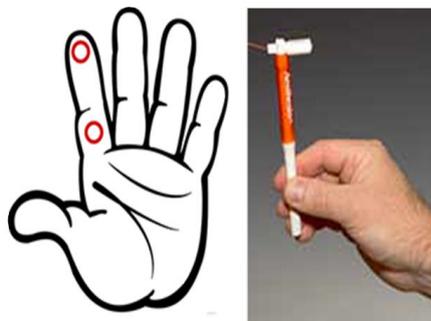


Figure 2.6 – Test de "Von Frey"

- Un questionnaire HAD (Hospital Anxiety and Depression scale), pour quantifier l'état émotionnel des participants avant le test (Zigmond & Snaith, 1983). Quatre sujets ont présenté un score supérieur à la limite pathologique. Par conséquent, les scores HAD ont été introduits comme co-variables dans nos analyses. Comme ces données se sont révélées n'induire aucun biais de mesure, les vingt-cinq étudiants ont été retenus pour le test.

Nos expérimentations ont été réalisées à l'aide d'un dispositif expérimental qui permet de cacher les échantillons afin d'optimiser la mesure de la réponse émotionnelle provenant du système haptique, de fixer les échantillons afin qu'ils ne bougent pas pendant l'exploration, de cacher l'animateur car le

participant avait tendance à suivre l'animateur des yeux induisant un biais de réponse et un biais de mesure, et de focaliser le regard sur un panneau blanc afin de faciliter la mesure de la pupille et d'éviter toute distraction. Lors des tests, les participants étaient assis sur une chaise confortable, les bras reposant sur une table pour limiter les mouvements du corps, dans une pièce éclairée artificiellement avec toutefois une légère ouverture vers l'extérieur. Des mesures de luminance effectuées tout au long du test ont donné des valeurs allant de 240 à 250 Lux.

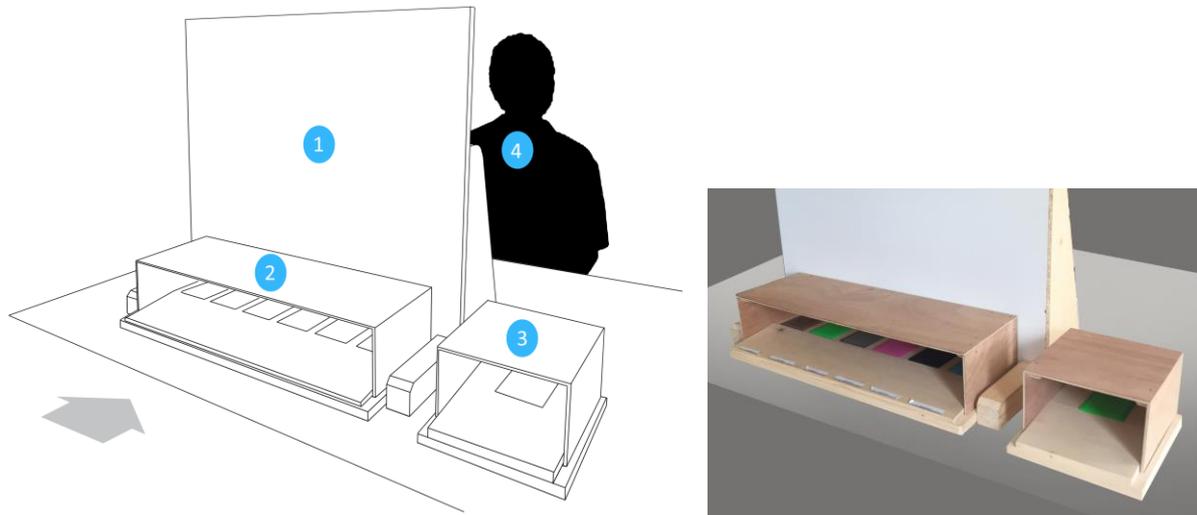


Figure 2.7 – Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental présenté à la Figure 2.7 est composé des parties suivantes numérotées de 1 à 3 :

1. Un plateau en bois blanc de 850 x 850 mm, placé à 40 cm devant les participants ;
2. Une boîte d'expérimentation, avec 6 logements espacés de 25 mm pour placer les différents matériaux. Les dimensions de cette boîte sont de 700 mm de long, 140 mm de haut et 200 mm de profondeur. Tous les échantillons présentés dans cette boîte mesuraient 70 x 70 x 5 mm pour permettre l'exploration de la surface avec 3 doigts par toucher tangentiel. Les échantillons étaient éloignés de quelques centimètres pour éviter au participant de se tromper lors du placement de sa main. Pour orienter le participant, un repère autocollant indiquait la situation géographique du matériau ;
3. Une seconde boîte de 180 mm de long, 140 mm de haut et 200 mm de profondeur, pour l'échantillon de décharge émotionnelle. Des tests préliminaires ont en effet montré que l'échantillon que le participant touchait en premier créait un effet de surprise, accompagné d'une forte réaction émotionnelle. Ce primo-stimulus créait un biais statistique qu'il fallait impérativement gommer. Cette boîte a l'avantage d'être amovible, ce qui permet de la disposer à droite ou à gauche, en fonction de la préférence du participant ;

L'animateur, numéroté 4 dans la Figure 2.7, était placé derrière le panneau 1 afin que le participant ne soit pas en mesure de lire ses expressions faciales, ou cherche à suivre l'animateur du regard. Le participant était placé face aux échantillons, conformément à la flèche de la Figure 2.7.

Un autre animateur était également situé sur le côté du participant (Figure 2.8). Il procédait aux enregistrements, et positionnait manuellement des marqueurs qui permettaient de séquencer la mesure. Ce second animateur disposait des constantes physiologiques du participant en temps réel, qui provenaient d'un ANI-MONITOR - Mdoloris Medical System. Cet équipement est généralement

utilisé en anesthésie pour visualiser les réponses du système nerveux autonome. Dans cette expérimentation cet équipement permettait de visualiser l'impact du toucher sur le système nerveux autonome.



Figure 2.8 – Photos des tests préparatifs

Le protocole expérimental est décrit dans la Figure 2.9. La première étape consiste en un « premier toucher » réalisé en aveugle pendant 15 secondes. Ce « premier toucher » est réalisé sur un matériau de la série présentée, choisi au hasard. Les données de ce « premier toucher » n'ont pas été traitées. Cette étape est suivie d'une phase de repos de 30 secondes, où le participant est invité à se relaxer, les bras posés sur la table. Cette phase de repos est utilisée pour définir le diamètre initial de la pupille du participant, noté d_0 . Pour chacun des matériaux de la série, la phase de découverte dure 15 secondes, suivie d'une phase de discussion de 30 secondes où l'animateur interroge le participant sur la base d'un questionnaire. L'animateur note les réponses pour limiter au maximum les mouvements des participants, qui étaient invités à poser les bras sur la table.

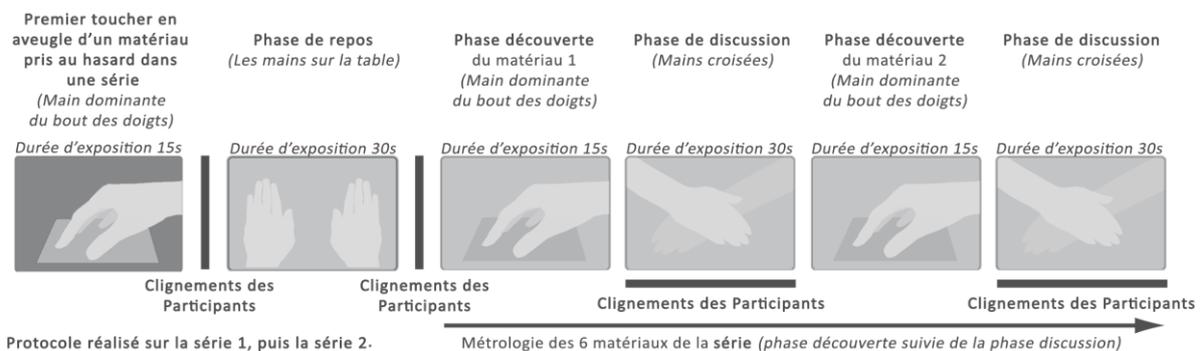


Figure 2.9 - Protocole expérimental tactile

Pour chaque participant, l'intégralité de ce protocole de mesure a été utilisée pour évaluer les réactions émotionnelles que provoquent les matériaux de la **série 1**, puis de la **série 2**.

1.4 Mesures

Des mesures verbalisées ont permis de déterminer la valeur émotionnelle du matériau, telle que décrite par les participants. Cette mesure correspond à la composante subjective de l'émotion. Pour recueillir l'évaluation que le participant fait de son propre état émotionnel au contact de l'échantillon, nous avons utilisé le Model Circumplex de Russel (1980), qui collecte la valence et l'arousal.

La Figure 2.10 illustre le questionnaire utilisé pendant les phases de discussion. Il s'agit :

- D'estimer si le toucher était plaisant (*oui ou non*) ;
- De situer la valence de l'échantillon, c'est-à-dire la nature hédonique du stimulus évaluée sur un continuum désagréable (-4) / agréable (4) ;
- D'estimer si le participant pense avoir eu une émotion ;
- De situer son niveau d'éveil physiologique sur un continuum allant de calme (0) à excité (5) ;
- De recueillir les impressions du participant afin de préciser la nature de ses ressentis.

Cette évaluation était réalisée par l'animateur après chaque phase de découverte, durant la phase de discussion, pendant une durée de 30 secondes.

<i>Echantillon N°</i>	<i>Diriez-vous que l'échantillon était plaisant ?</i>	<i>Diriez-vous que vous avez eu une émotion au contact de l'échantillon ?</i>
Type de matériau	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
	<i>Sur l'échelle allant de -4 à 4:</i> -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4	<i>Sur l'échelle allant de 0 à 5:</i> 0 1 2 3 4 5
	<i>Comment décririez-vous votre émotion ?</i>	

Figure 2.10 - Echantillon d'enquête utilisé dans les mesures subjectives

La pupillométrie a été choisie pour mesurer la réaction physiologique liée à l'émotion. Pour cela, un pupillomètre de type ISCAN-ETL-100H est utilisé (Figure 2.11). Cet instrument est constitué d'une caméra infrarouge, qui illumine la pupille, et d'un miroir incliné à 45° qui reflète l'image de l'œil dans cette caméra. Le dispositif est relié à un ordinateur qui enregistre en temps réel les dimensions de la pupille dans les directions verticale et horizontale. La taille de la pupille est mesurée en pixels, à une fréquence d'acquisition de 60 Hz. La taille de la fenêtre d'acquisition est de 512 x 256 pixels. Cet équipement est non intrusif, il n'obstrue pas le champ de vision et il permet une grande liberté de mouvements. En revanche, l'équipement recueille uniquement la réponse de l'œil droit. A chaque instant, la valeur moyenne entre les mesures dans les directions verticale et horizontale donne le diamètre de la pupille en pixels.

Les mesures de pupillométrie issues des phases repos et découverte ont été nettoyées à l'aide d'un algorithme. Cet algorithme de nettoyage détecte les clignements, les absences de mesures et les mesures considérées comme aberrantes. Après détection, l'algorithme remplace les données erronées ou manquantes en créant un pont de données par interpolation numérique (Schlomer *et al.*, 2010). Les absences de mesures s'expliquent car les participants levaient parfois les yeux au ciel pour concentrer leur effort de sensibilité sur la perception tactile.

Pendant les 30 secondes d'enregistrement de la phase de repos, nous avons constaté une relaxation progressive des participants. Nous avons donc considéré que seules les deux dernières secondes de cette phase seraient exploitées. De plus, conformément aux résultats de Bradley et Lang (2008), qui montrent que la constriction de la pupille intervient entre 0,6 à 1,6 seconde après la présentation d'une image IAPS, nous avons exploité les deux premières secondes de la phase de découverte. Ce choix a été confirmé en utilisant plusieurs durées d'analyse de cette phase (8 s, 7s, 6 s, 5 s, 4 s, 3 s, 2

s, 1,5 s, 1 s, 0,5 s), qui montraient que le pic de dilatation dans les 3 conditions (désagréable, neutre, agréable) se situait avant les 2 secondes.

Pour caractériser la variation du diamètre de la pupille de chaque participant, nous avons donc utilisé :

- Le diamètre initial d_0 de sa pupille, obtenu en moyennant dans le temps le diamètre mesuré au cours des deux dernières secondes de la phase de repos du protocole ;
- Le diamètre $d(t)$, obtenu au cours des deux premières secondes de la phase de découverte.

Ces deux quantités permettent de donner la variation relative du diamètre de la pupille de chaque participant pendant la phase de découverte, sous la forme $(d(t)-d_0)/d_0$. Cette variation relative s'affranchit ainsi de caractéristiques intrinsèques au participant, telles que son diamètre de pupille. Dans la suite du document, elle est donnée en « pourcent ».

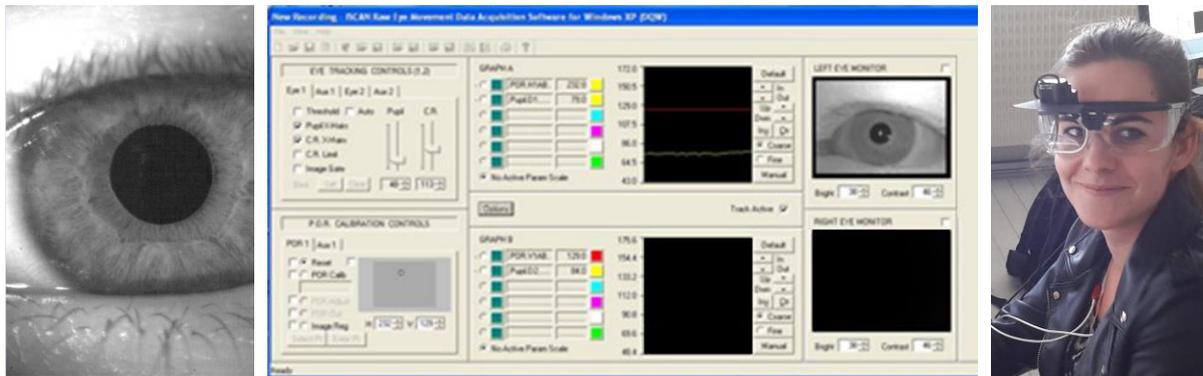


Figure 2.11 - Logiciel d'acquisition de pupillométrie

L'utilisation de l'équipement de la Figure 2.11 permet d'objectiver la mesure émotionnelle du toucher en relevant l'activité du système nerveux autonome ; la dilatation de la pupille étant connue pour refléter l'excitation émotionnelle (arousal).

1.5 Résultats des mesures verbalisées

Matériaux de la Série 1 (Valeur moyenne)						
Matériau	PLA Ebène	PLA Vert	PLA Cuivre	PLA Turquoise	Titane 3D	PLA Rose
Valence	0,68	0,6	0,64	0,6	-0,16	1,16
Arousal	1,76	1,76	1,76	1,76	1,84	1,88
Matériaux de la Série 2 (Valeur moyenne)						
Matériau	PdV N1	Bois	PdV N2	Fourrure	Velours	PdV N3
Valence	-0,52	1,72	-0,72	3,12	2,36	-2,08
Arousal	1,68	1,76	1,92	3,84	2,08	3,16

Figure 2.12 – Tableau des valeurs émotionnelles des 12 matériaux

La Figure 2.12 présente pour chaque échantillon les valeurs moyennes de valence et d'arousal obtenues sur les 25 participants. Les Figures 2.13 et 2.14 classent les échantillons respectivement par ordre de valence et d'arousal croissants.

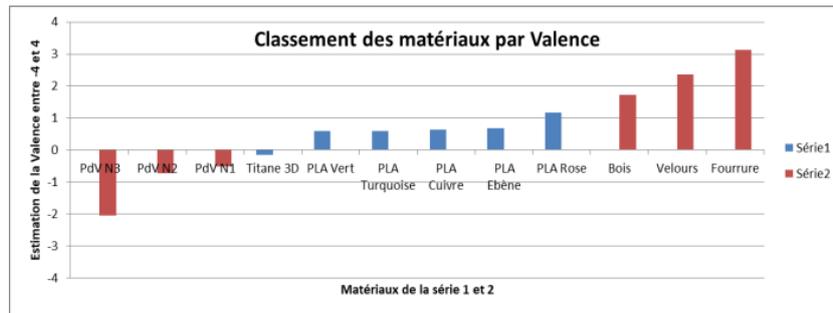


Figure 2.13 – Classement des échantillons par valence croissante

Dans la Figure 2.13, on constate que l'on retrouve les matériaux de la **série 2** aux extrémités. Cela s'explique par le fait que cette série a été sélectionnée pour la nature émotionnelle induite par ces matériaux. Sans grande surprise le papier de verre N3 obtient la valeur la plus négative et la fourrure la valeur la plus positive. On notera un effet de négativité pour le titane 3D qui s'explique par une surface légèrement plus râpeuse que les échantillons imprimés en PLA. Les échantillons imprimés en PLA obtiennent un score positif car le toucher en aveugle de ce matériau n'est pas complètement neutre.

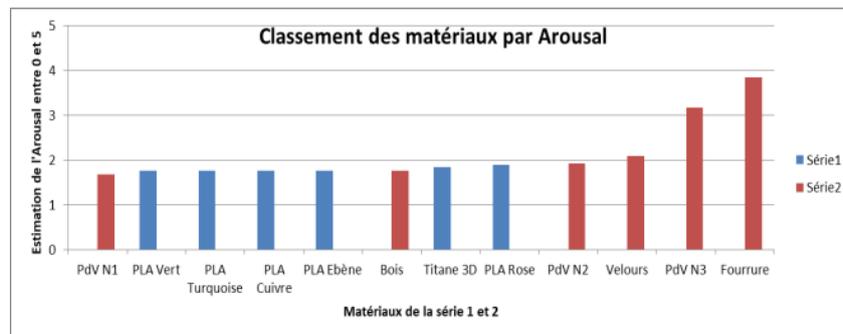


Figure 2.14 – Classement des échantillons par arousal croissant

Nous avons considéré que les valeurs réparties autour d'une valeur moyenne de 0,6 (valence) et 1,76 (arousal) étaient neutres car lors des tests, à la question « comment décririez-vous votre émotion ? », les participants soulignaient l'aspect légèrement strié de cette surface mais la considéraient tout de même comme neutre.

Nous noterons les valeurs très positives de la fourrure avec un score de 3,12 (valence) et 3,84 (arousal). Cet échantillon était considéré comme "très agréable" par l'ensemble des participants sauf deux qui ont considéré la fourrure comme « très désagréable » avec deux notes de valence à -3. Cela s'explique par le contexte culturel de ces deux participants, qui ont grandi dans un environnement où ils croisaient encore des animaux sauvages qui leur inspiraient une certaine appréhension ou frayeur (*Chine et Maghreb*). En Occident, la fourrure est généralement considérée comme agréable car depuis l'enfance nous apprécions le contact avec un doudou, un ours en peluche... ou la compagnie d'un animal domestique (*chat, chien, lapin, ...*) (Servais, 2007). Nous noterons également le score de - 2,08 (valence) et 3,16 (arousal) obtenu par le papier de verre N3 qui était jugé « fortement désagréable ».

Ces mesures verbalisées nous ont permis de confirmer le classement de nos échantillons comme désagréables, neutres, ou agréables :

- Les échantillons « velours » et « fourrure » seront considérés comme agréables, avec une valence moyenne de $2,74 \pm 1$ et un arousal moyen de $3 \pm 0,16$;
- Les échantillons en papier de verre, « PdVN1 », « PdVN2 » et « PdVN3 », seront considérés comme désagréables, avec une valence moyenne de $-0,41 \pm 0,55$ et un arousal moyen de $2 \pm 0,10$;
- Les sept autres échantillons seront considérés comme neutres, avec une valence moyenne de $0,77 \pm 0,07$ et un arousal moyen de $1,9 \pm 0,17$.

Un test de Friedman a montré que ces trois conditions d'émotion étaient significativement différentes pour la valence ($\chi^2 = 50$; $p = <0,0001$) et pour l'arousal ($\chi^2 = 48$; $p = <0,0001$), et une analyse de Wilcoxon a posteriori a montré des différences significatives entre les trois dimensions pour la valence ($p < 0,0001$), et un score d'arousal significativement plus élevé pour les stimuli agréables par rapport aux stimuli neutres et désagréables (respectivement : $w = 4,37$; $p = <0,0001$ et $w = 4,37$; $p = 0,0001$). De plus, le profil des résultats indiquait un score d'arousal moyen plus élevé pour les stimuli négatifs par rapport aux stimuli neutres ($w = 4,13$; $p = 0,0001$). Enfin, notons qu'aucune différence spécifique entre les sexes n'est apparue, et le score HAD n'a eu aucune influence sur la notation des échelles.

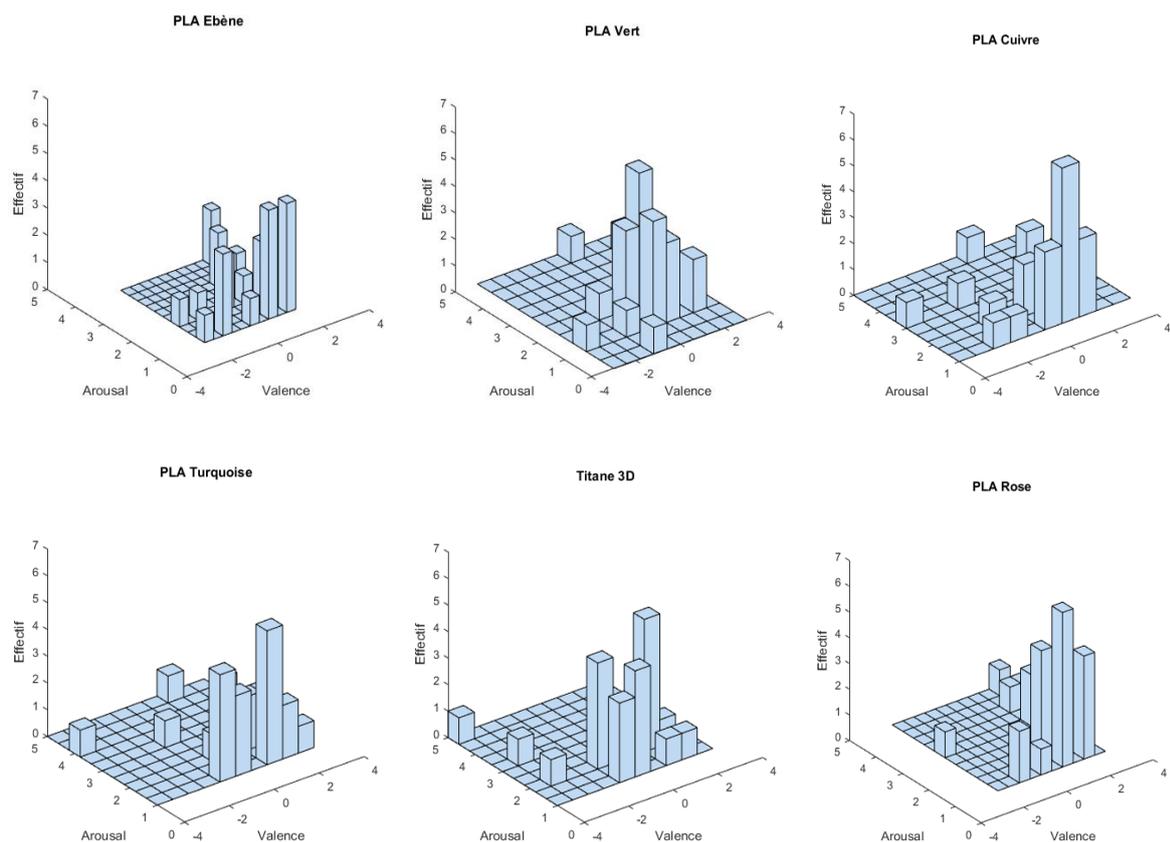


Figure 2.15 - Valeurs émotionnelles des échantillons de la **série 1**

Les valeurs moyennes correspondent aux valeurs d'un « individu type » qui est supposé représenter une grande partie de la population. Les histogrammes 3D présentés dans les Figures 2.15 et 2.16 montrent la variabilité dans les réponses. Cette variabilité s'explique par une connotation assez « personnelle » du souvenir qui est mémorisé lors de la découverte de chaque matériau. Des

chercheurs ont montré que la performance de la mémoire tactile équivaut à la mémoire visuelle et les stimuli tactiles peuvent facilement faire ressurgir un souvenir enfoui (Bigelow & Poremba, 2014). Des chercheurs ont étudié la mémoire haptique à long terme au travers d'une expérimentation portant sur la perception et la reconnaissance « tactile » de près de 168 objets. Leurs résultats ont montré que l'être humain était en mesure de reconnaître à 94 % lors de la présentation de deux images assez similaires un objet qu'il venait de toucher. Des expériences menées une semaine, puis deux semaines plus tard ont montré que les participants à ce test étaient encore capables de reconnaître à 84 %, puis 79 % les objets qu'ils avaient touchés dans le premier test (Hutmacher & Kuhbandner, 2018).

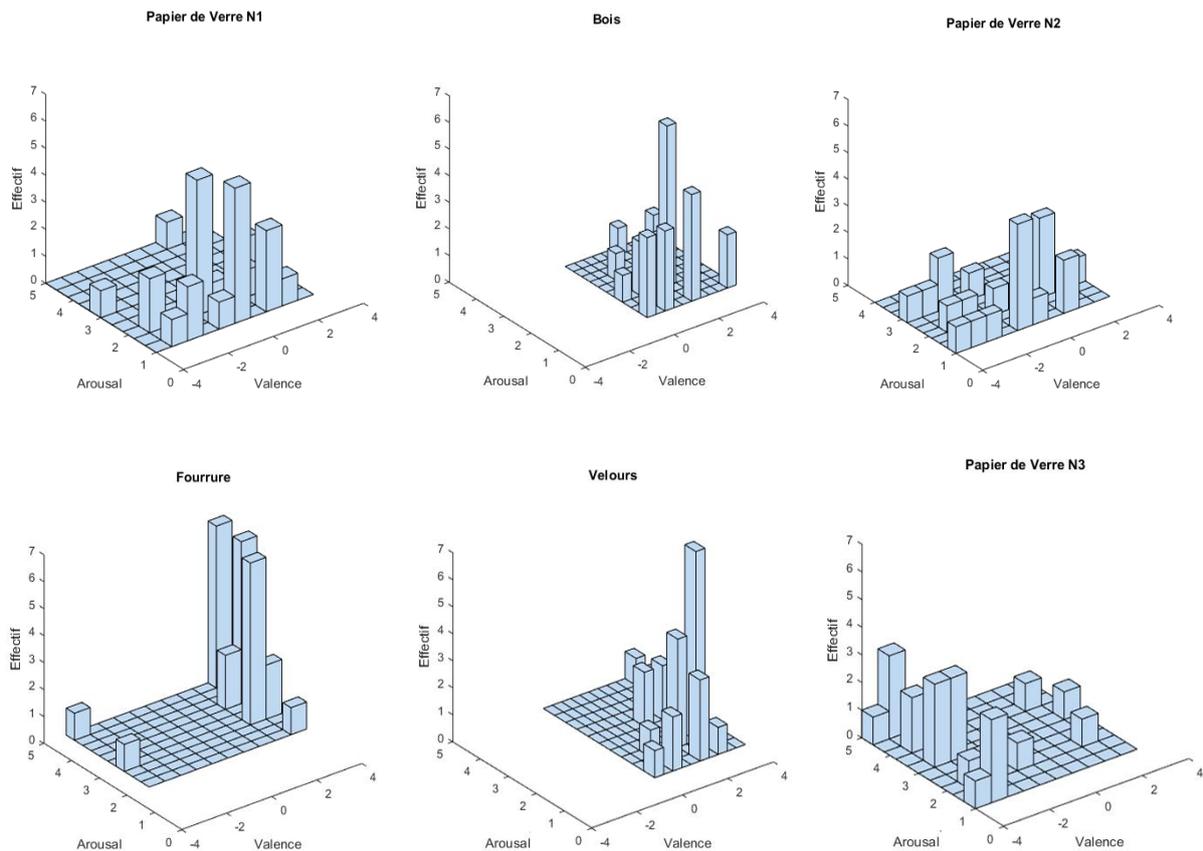


Figure 2.16 - Valeurs émotionnelles des échantillons de la série 2

1.6 Résultats des mesures de pupillométrie

Nous avons effectué un test de Kolmogorov-Smirnov sur cet ensemble de données. À un risque de 5%, les résultats ont montré que nos données ne suivent pas une distribution normale. Les « Boxplot » de ces données sont présentés dans la Figure 2.17. Selon le test d'inégalité de Bienaymé-Tchebychev, dans le cas où les données ne suivent pas une loi normale, la probabilité pour que la variable aléatoire soit réalisée dans l'intervalle $\pm 2 \sigma$ est de 75% et devient 89% dans la plage de $\pm 3 \sigma$.

La Figure 2.18 montre les coefficients de dilatation moyens de tous les matériaux classés de désagréable à agréable. On peut observer sur cette figure que les matériaux à forte émotion

présentent des dilatations pupillaires plus importantes que les matériaux neutres et que les dilatations pupillaires pour les matériaux désagréables et agréables sont assez similaires.

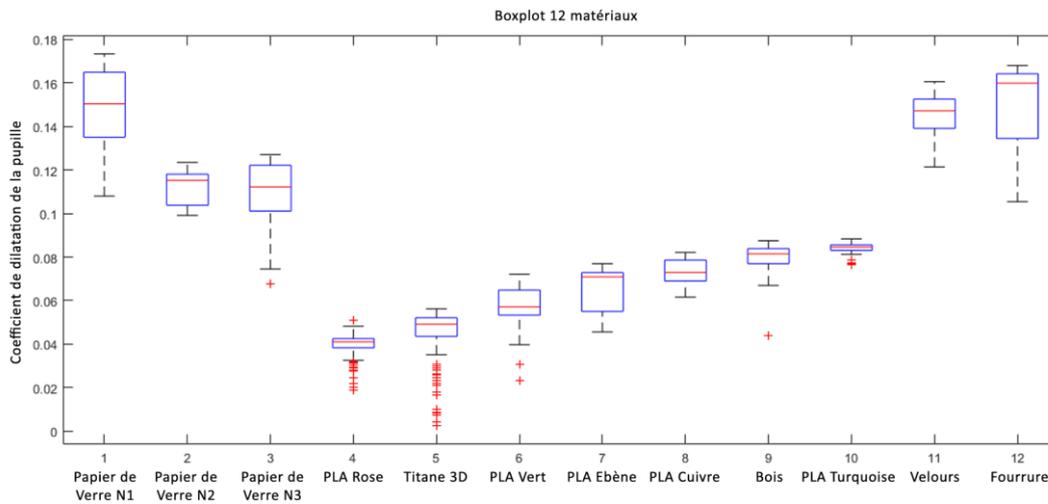


Figure 2.17 – Boxplot des 12 matériaux

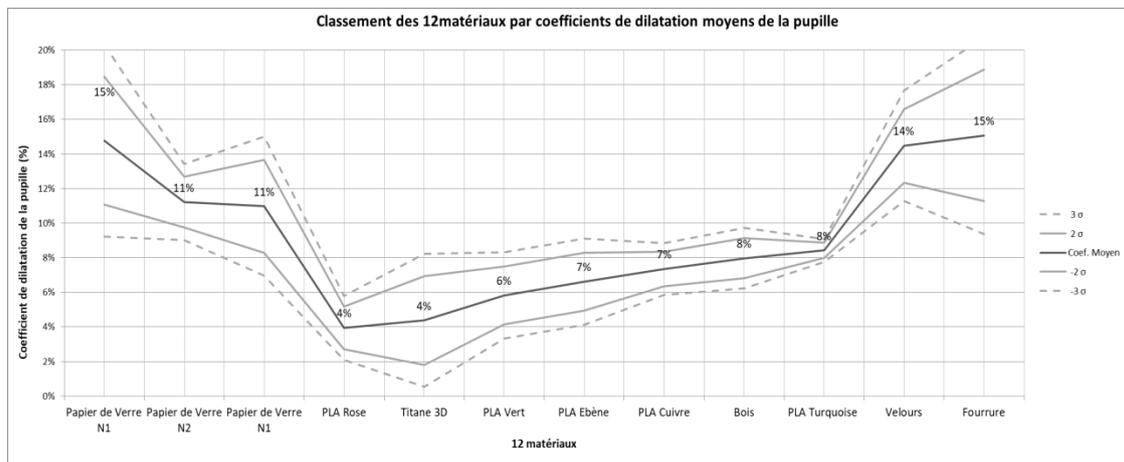


Figure 2.18 - Classification des 12 matériaux par coefficients de dilatation moyens de la pupille

Les Figures 2.17 et 2.18 confirment le classement en trois catégories fait précédemment, à partir des données verbalisées, sans toutefois montrer de différences notables entre les échantillons agréables et désagréables :

- sept échantillons neutres : tous les PLA, le titane et le bois ;
- cinq échantillons émotionnels : les papiers de verre N1 à N3, le velours et la fourrure.

Par conséquent, toutes les données ont été transformées par rang (Conover & Iman, 1981) et soumises à une ANCOVA. Le score HAD a été utilisé comme co-variable puisque des études précédentes ont montré que l'état émotionnel des participants avant le test peut influencer le traitement des données (Mogg & Bradley, 1999; Mogg, Millar & Bradley, 2000). Les résultats ont été traités en incluant dans les analyses un facteur inter-sujet, le genre (*masculin et féminin*), et un facteur intra-sujet, l'émotion. Une analyse de comparaison par paires post hoc avec le test de Bonferroni a également été effectuée. L'ANCOVA n'a montré aucun effet du score HAD sur les résultats globaux, mais les facteurs « genre » et « émotion » se sont révélés significatifs.

L'effet des matériaux émotionnels (désagréable et agréable) est significatif ($F(2,24) = 10,87$; $p = 0,0004$). Par ailleurs, les tests réalisés sur les matériaux neutres conduisent à une dilatation de la pupille inférieure à celle des matériaux agréables ($F(1,12) = 146,07$; $p = 0,0001$) et désagréables ($F(1,12) = 11,99$; $p = 0,004$). La Figure 2.19 présente les coefficients de dilatation moyens de la pupille sur 25 participants durant les deux premières secondes de la Phase de découverte ; les courbes présentées représentent les 3 conditions émotionnelles : désagréable (rouge), neutre (bleu), agréable (vert).

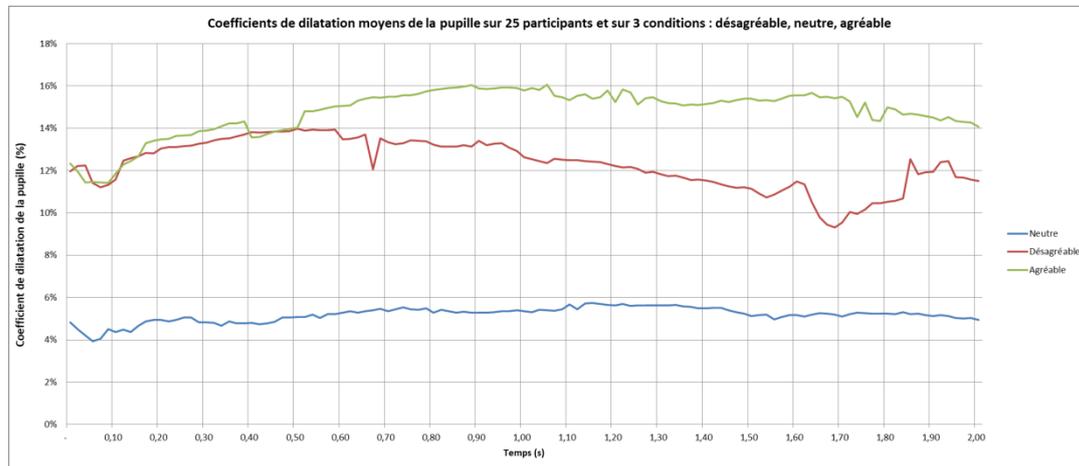


Figure 2.19 : Coefficients de dilatation moyens de la pupille sur 25 participants et sur 3 conditions

Comme dans les travaux de Bradley *et al.* (2008), dans la Figure 2.19, nous pouvons observer une constriction de la pupille qui se situe autour de 0,05 seconde. On constate également que :

- La courbe neutre est assez constante dans le temps ;
- Les courbes agréable et désagréable augmentent légèrement, pendant 0,5 seconde, puis la courbe désagréable diminue, avec une plus grande variabilité à la fin, tandis que la courbe agréable reste sensiblement constante.

Une étude statistique a montré que les conditions émotionnelles des matériaux (désagréables et agréables) deviennent différentes de 0,50 à 2 secondes ($p = 0,03$).

Le facteur de genre (*masculin et féminin*) s'est également révélé significatif ($F(2,24) = 3,42$; $p = 0,04$). La pupille est plus dilatée chez la femme que chez l'homme dans des conditions agréables et désagréables (respectivement : $p = 0,05$ et $p = 0,0001$).

La Figure 2.20 montre que les coefficients de dilatation moyens des pupilles des femmes se situent entre 13 et 19% pour les conditions désagréables et agréables, alors qu'ils varient entre 4 et 6% pour les matières neutres. Une analyse post hoc a montré une différence entre les matériaux désagréables et agréables ($p = 0,01$), désagréables et neutres ($p = 0,001$) et agréables et neutres ($p < 0,0001$). Les stimuli positifs semblent être les plus émotifs pour les femmes. Les courbes du genre féminin présentées dans la Figure 2.20 suggèrent qu'après 0,50 s, le stimulus positif augmente, et que le neutre et le négatif s'installent plus durablement.

Les coefficients de dilatation moyens des pupilles des hommes sont représentés dans la Figure 2.21. Ils varient entre 2 et 12% pour les conditions désagréables et agréables, et entre 6 et 8% pour les conditions neutres. De plus, les courbes présentent beaucoup plus de variations que pour les

femmes. Une analyse post hoc a montré une différence entre les matériaux désagréables et agréables ($p = 0,004$), désagréables et neutres ($p = 0,009$) et agréables et neutres ($p < 0,0001$). Pendant les 2 secondes observées, la courbe neutre est presque constante. Le stimulus agréable montre de grandes oscillations avec un premier pic observé à 1 seconde, et un second pic observé à 1,70 seconde. Le stimulus négatif est situé au-dessus du neutre et en dessous du positif pendant la première seconde, puis une forte diminution se produit qui place le stimulus négatif en dessous des conditions neutre et agréable. Les stimuli agréables semblent être les plus émotifs pour les hommes.

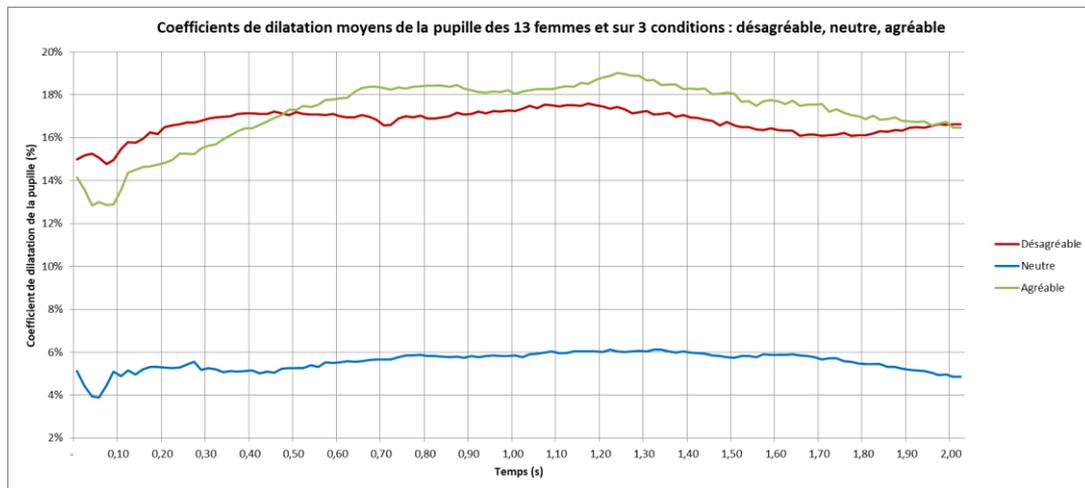


Figure 2.20 - Coefficients de dilatation moyens de la pupille des 13 femmes sur 3 conditions

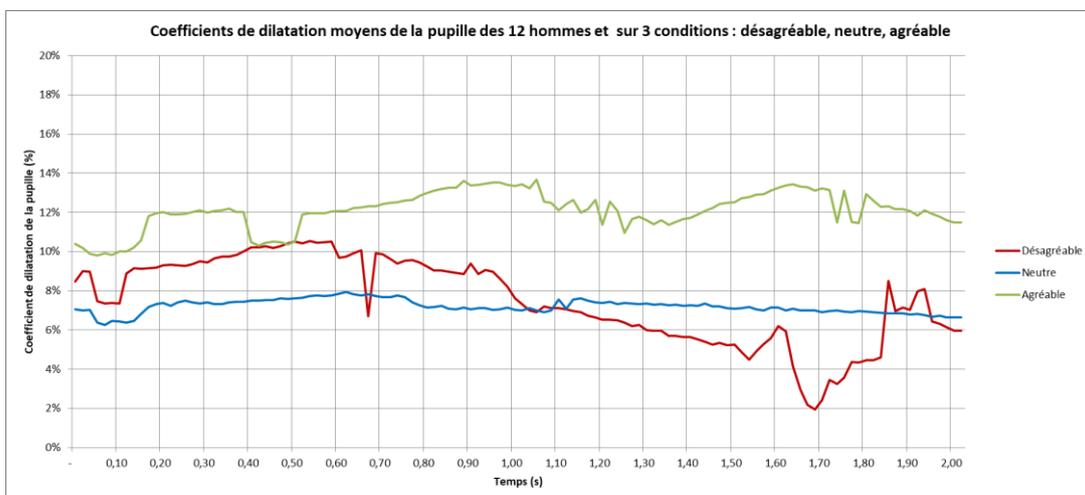


Figure 2.21 - Coefficients de dilatation moyens de la pupille des 12 hommes sur 3 conditions

Les Figures 2.22 à 2.24 présentent l'évolution des coefficients de dilatation moyens de la pupille dans les cas respectivement désagréable, neutre et agréable. Chaque courbe représente la moyenne sur les 13 femmes (en bleu), la moyenne sur les 12 hommes (en vert), et la moyenne globale sur les 25 participants (en rouge),

On peut observer sur ces Figures que:

- Pour les matériaux désagréables, la dilatation de la pupille est plus importante pour les femmes que pour les hommes, avec des évolutions temporelles différentes. La valeur est

quasi constante pour les femmes, alors qu'elle est décroissante après 0,70 seconde pour les hommes (Figure 2.22) ;

- Pour les matériaux neutres, la dilatation de la pupille est à peu près similaire pour les hommes et les femmes (Figure 2.23).
- Pour les échantillons agréables, la dilatation de la pupille est plus importante pour les femmes que pour les hommes, avec des évolutions temporelles similaires, mais avec des courbes légèrement plus fluctuantes dans le cas des hommes (Figure 2.24).

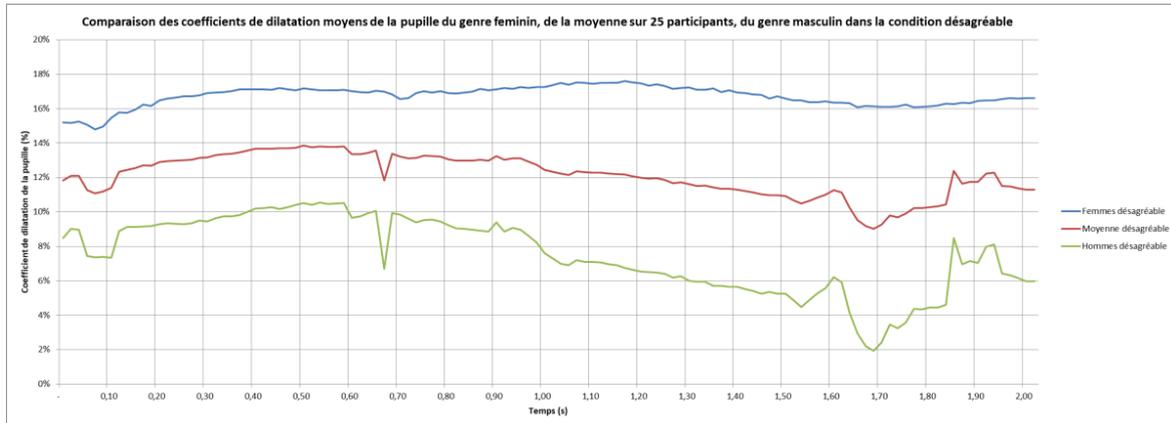


Figure 2.22 - Coefficients de dilatation moyens de la pupille pour les matériaux désagréables

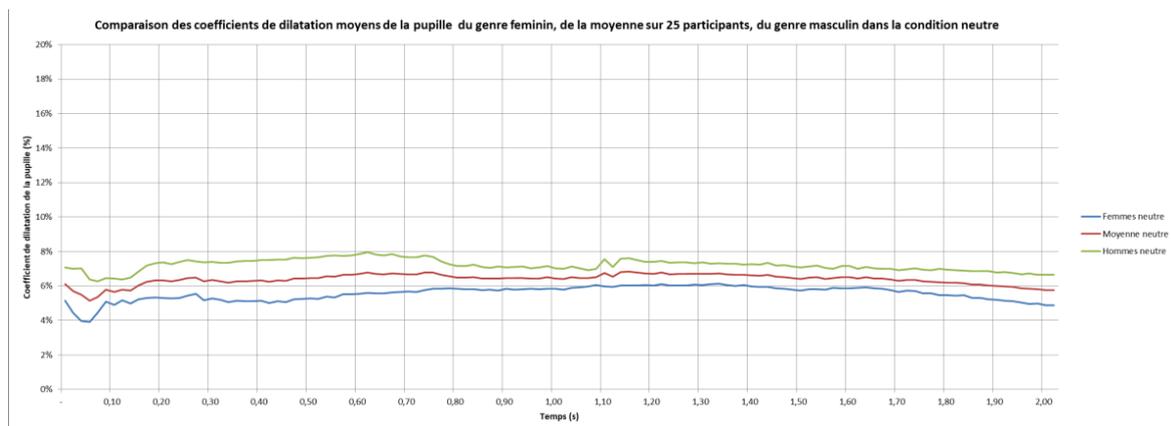


Figure 2.23 - Coefficients de dilatation moyens de la pupille pour les matériaux neutres

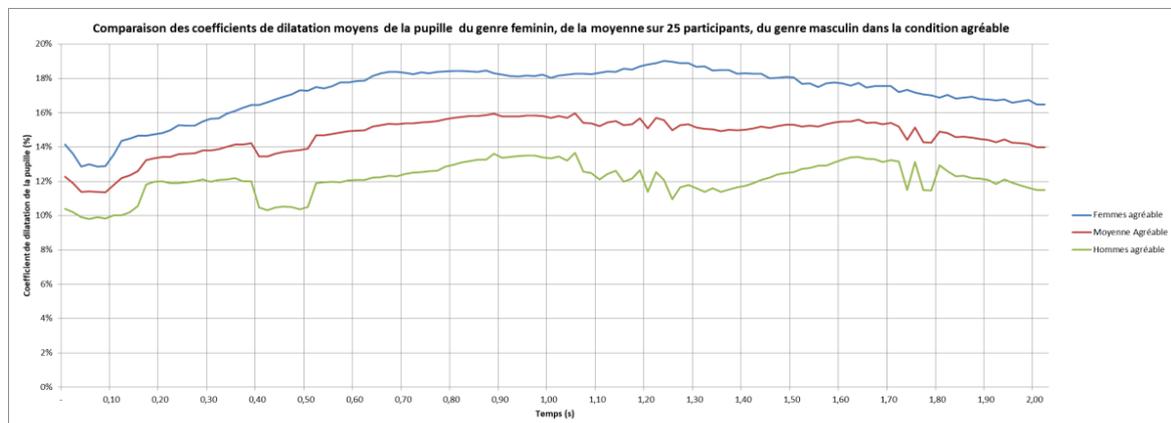


Figure 2.24 - Coefficients de dilatation moyens de la pupille pour les matériaux agréables

Finalement, une analyse en composantes principales (ACP) a permis de classer les matériaux en fonction de la valeur de la dilatation de la pupille moyennée dans le temps au cours des deux premières secondes de la phase de découverte. L'analyse en composantes principales est une méthode qui permet d'éliminer les biais. La Figure 2.25 montre sur le premier axe factoriel qui représente 93,10% des variables expliquées, les matériaux qui sont clairement classés en fonction de leur arousal, du neutre aux plus émotionnels. Il faut noter que ce classement est proche de la classification faite par les participants à l'aide de mesures subjectives. Le second axe factoriel qui représente 2,56% des variables expliquées est plus difficile à analyser car il ne correspond pas à la valence. Il pourrait correspondre à l'intérêt que suscite l'exploration tactile de ce matériau.

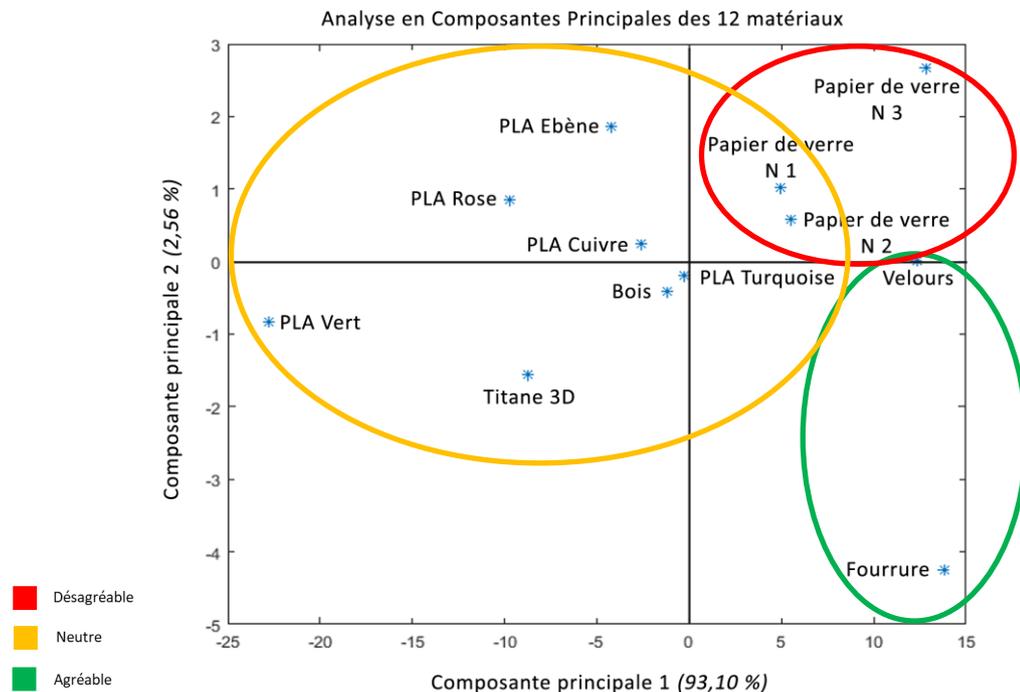


Figure 2.25 – Analyse en composantes principales qui classe les matériaux du neutre aux émotionnels

1.7 Discussion

Le but de cette première expérimentation était d'évaluer si la pupillométrie permet d'objectiver la mesure émotionnelle des matériaux. Les résultats obtenus montrent clairement qu'il est possible de classer des matériaux selon leur niveau d'intensité émotionnelle. Cette mesure précise permet de détecter la valeur émotionnelle des stimuli « tactiles », confirmant ainsi que la mesure du diamètre de la pupille pouvait être considérée comme un marqueur physiologique du système haptique. Pour rappel, la taille de la pupille est fixée par l'activité de deux muscles de l'iris, le sphincter et le dilatateur (Beatty & Lucero-Waggoner, 2000). La constriction des pupilles est maintenue par l'activité parasympathique et la dilatation des pupilles est essentiellement induite par la voie sympathique (Andreassi, 2000). C'est parce que la taille de la pupille est modulée par le système nerveux autonome que nos résultats suggèrent que ce système réagit différemment aux matériaux présentés selon qu'ils soient émotionnels ou neutres. En revanche, nos études émotionnelles n'ont pas permis d'étiqueter l'émotion (Van Hooijdonk *et al.*, 2019). Cette mesure ne permet pas pour l'instant de connaître si le stimulus tactile était « positif » ou « négatif ». Les mesures physiologiques devront encore être couplées aux mesures subjectives.

Babiker *et al.* (2015) ont cherché à savoir s’il était possible de différencier les émotions sonores positives ou négatives en utilisant la pupillométrie comme mesure physiologique. Ils ont enregistré les données durant 5 secondes sur un panel de 17 participants. Le traitement des résultats était réalisé à l’aide d’un algorithme de différenciation qui distinguait les émotions positives des émotions négatives. Il a été observé que :

- Au début de la mesure, la dilation de la pupille est plus élevée pour les stimuli négatifs que pour les stimuli positifs ;
- Après 3 s, le signal négatif maintient sa dilatation avec de légers changements, tandis que le signal positif se dégrade, avec plus d'irrégularité.

Nous n’observons pas les mêmes effets comme le montre la Figure 2.26 qui présente nos mesures pendant 5 secondes. Notre signal décroît après 2 secondes, ce qui semble caractériser les ressentis émotionnels haptiques. Par conséquent, nous recommanderions la plus grande prudence quant à la possibilité d’utiliser le signal de la pupillométrie pour étiqueter l’émotion de manière généralisée. Nos études suggèrent plutôt que les signaux doivent être traités de façon différenciée, car les processus neuroanatomiques des systèmes sensoriels humains sont différents lorsqu’il s’agit de l’audition, de la vue, du toucher, du goût, ou de l’odorat. Plusieurs travaux suggèrent d’ailleurs des modes d’interprétations différents (Bradley *et al.*, 2008 ; Lemerrier, 2014 ; Babiker *et al.*, 2015 ; Van Hooijdonk *et al.*, 2019).

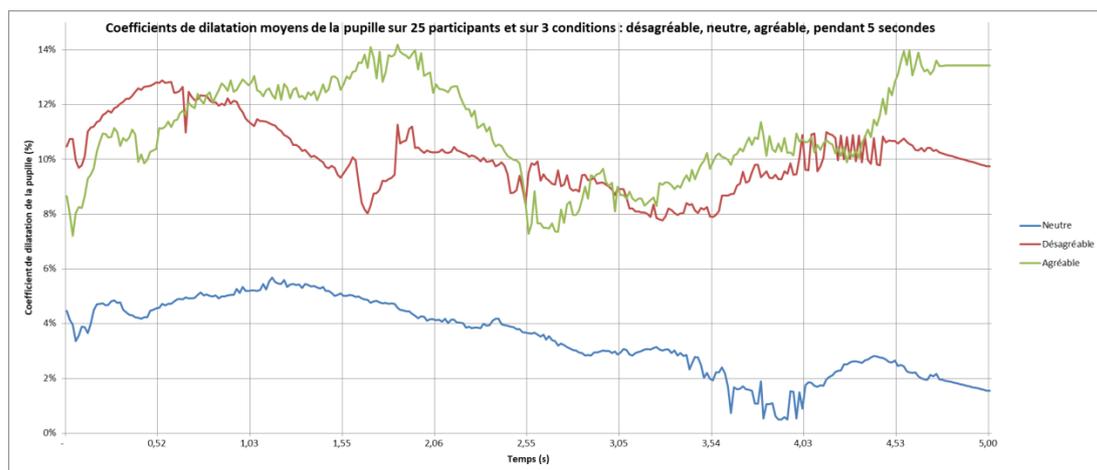


Figure 2.26 – Coefficients de dilatation moyens de la pupille sur 25 participants et sur 3 conditions, pendant 5 secondes.

Dans nos expérimentations tactiles, nous avons observé une augmentation du diamètre de la pupille sur les deux premières secondes du toucher. Bien que les expérimentations présentées dans la publication de Bradley *et al.* (2008) portent sur l’étude de stimuli émotionnels visuels (*utilisation de la norme IAPS*), nous constatons une constriction semblable entre 0,04 et 0,10 s, suivie d’une dilatation des pupilles similaire pour les matériaux émotionnels jusqu’à 0,50 seconde environ. S’en suit une dilatation de la pupille plus importante en réponse aux stimuli désagréables et agréables par rapport aux stimuli neutres. Toutefois, les signaux désagréables et agréables des stimuli tactiles adoptent des comportements différents après la période de 0,50 seconde. Contrairement aux travaux de Bradley *et al.* (2008), nos expérimentations ont montré que la dilatation de la pupille des stimuli agréables était plus importante que la dilatation de la pupille des stimuli désagréables, y compris dans les traitements différenciés par genre.

Concernant la durée d'acquisition de 2 s, plusieurs études ont indiqué que les changements de diamètre de la pupille se produisent dans les premiers dixièmes de seconde après le début du stimulus, les réponses atteignant un pic après 1 à 2 secondes (Andreassi, 2000; Beatty & Lucero-Waggoner, 2000; Loewenstein & Loewenfeld, 1962; Nieuwenhuis, De Geus & Aston-Jones, 2011). Au-delà de 2 secondes de régulation, on peut parfois constater une dilatation du diamètre de la pupille plus importante.

Par exemple Partala et Surakka (2003) qui testaient des stimuli auditifs ont montré qu'aucune dilatation pupillaire n'a été observée avant 0,40 seconde et que la dilatation pupillaire maximale a été observée après 2 à 3 secondes. Ils ont également constaté que la durée d'évolution du diamètre de la pupille était différente pour les sujets féminins et masculins. Les stimuli positifs provoquaient les dilatations pupillaires les plus fortes pour les sujets féminins, tandis que les stimuli négatifs provoquaient les dilatations les plus fortes pour les sujets masculins.

Comme Partala et Surakka (2003), cette expérimentation a montré un effet du genre mais d'une manière différente. Les dilatations pupillaires les plus fortes sont apparues pour les deux conditions émotionnelles chez les femmes et l'activation émotionnelle s'est maintenue dans la durée. Pour les hommes, les conditions émotionnelles induisent une dilatation des pupilles plus élevée par rapport aux stimuli neutres au départ. Néanmoins, une diminution plus forte de l'émotion négative est apparue avec la période de temps chez les hommes. L'explication de ces différences de sensibilité pourrait s'expliquer par la différence d'épaisseur de peau, car la peau dépasse 60 microns pour les hommes (*entre 20 et 30 ans*) et se situe souvent en dessous de 50 microns pour les femmes (Kawabe *et al.*, 1985).

Peters *et al.* (2009) indiquent d'ailleurs que les femmes peuvent percevoir au toucher des détails de surface plus fins que les hommes. Ce phénomène de « meilleure définition tactile » viendrait du fait que chez les femmes la forte densité des récepteurs de Merkel, des corpuscules de Meissner est plus élevée en raison de la plus petite taille de leurs doigts (Dillon *et al.*, 2001; Van Boven *et al.*, 2000; Goldreich & Kanics, 2003, 2006 ; Peters *et al.*, 2009). D'autres différences ont été trouvées entre les hommes et les femmes, comme la différence de seuils de détection vibro-tactile, de volume de la zone de contact avec le matériau ou de densité de crêtes de l'empreinte digitale (Gutiérrez-Redomero *et al.*, 2011; Venkatesan *et al.*, 2015). Par ailleurs une étude récente a montré qu'il existait une relation logarithmique entre la dilatation du diamètre de la pupille et la vitesse d'application du stimulus affectif. Les résultats de cette étude confirment que la pupille répond bien à l'entrée tactile, mais que cette réponse est liée à l'excitation causée par des changements d'intensité du stimulus plutôt qu'à une stimulation des Fibres C-tactile (CT) non myélinisées (Van Hooijdonk *et al.*, 2019).

Des approches « cognitives » ont également montré que les réponses pupillaires sont sensibles à la fois à la charge de travail et au contenu émotionnel (Kuchinke *et al.*, 2007 ; Bayer *et al.*, 2011) et nous savons que les aspects émotionnels du toucher sont importants. Aujourd'hui, les perceptions des consommateurs envers les plastiques résultent de sensations physiques et de ressentis émotionnels, mais aujourd'hui les propriétés des plastiques sont "humanisées" car les concepteurs utilisent différents processus industriels qui rendent les nouveaux matériaux plus familiers, inoffensifs, sensuels, agréables. Ces nouvelles propriétés des matériaux s'opposent aux propriétés animales ou naturelles de certains matériaux qui nous rappellent notre environnement naturel.

Ces matériaux déclenchent plus d'excitation car leur perception tactile réveille plus facilement des processus physiologiques qui mobilisent les ressources de l'organisme impliqué dans la peur ou le plaisir, du fait que le touché de ces matériaux est associé à des stimulations archaïques. L'appréciation d'un matériau variera également d'un individu à l'autre suivant le contexte qui environne sa découverte, par exemple, le papier de verre est parfois utilisé dans la rénovation et certains de nos participants évoquaient souvent un souvenir agréable provenant de moments de loisirs partagés remontant à leur enfance (Gibson, 1977).

Notre expérimentation tactile a montré qu'il était possible de déterminer la valeur émotionnelle du matériau par des mesures subjectives, c'est-à-dire : de savoir si un matériau possède une connotation émotionnelle désagréable, neutre ou agréable. L'étude de la valeur émotionnelle d'un matériau permettra à un concepteur de choisir les matériaux en fonction de leurs identités émotionnelles afin de s'assurer de l'acceptabilité d'un produit au travers de ses perceptions tactiles. La mesure de la valeur émotionnelle est un véritable apport en ingénierie de produit car nous montrerons au Chapitre 3 l'importance des critères émotionnels dans le processus décisionnaire menant à l'acte d'achat ; par ailleurs, nous montrerons qu'aucune mesure de la valeur émotionnelle n'avait été encore proposée dans un processus de conception de produit. Nos expérimentations comblent ce manque de méthode d'évaluation des ressentis émotionnels produits par le contact avec une matière. Nous noterons également que le classement subjectif des matériaux est quasiment effectué dans le même ordre que la classification effectuée à partir du coefficient de dilatation, ce qui traduit l'intérêt de poursuivre ces travaux d'objectivation des ressentis subjectifs à l'aide d'équipements de pupillométrie.

Cette première expérimentation ouvre de nouvelles pistes de recherche dans l'exploration des propriétés des matériaux. Nos résultats prouvent que la réponse pupillaire réagit conformément aux réponses subjectives dans le cadre de l'exploration tactile en aveugle. Il paraît intéressant de continuer ces développements en réalisant une centrale de mesures qui permettrait d'analyser la variation du diamètre de la pupille comme entrée de signal informatique et permettrait par cette seule mesure de classer les matériaux par valeur émotionnelle.

2. Visualisation d'une image

Notre seconde expérimentation a été conduite avec des stimuli visuels qui sont fréquemment utilisés dans les recherches sur l'émotion. Il nous paraissait intéressant d'affiner la procédure et l'analyse des mesures en pupillométrie en incluant des données relatives à la perception d'images afin de bien déterminer à l'avenir les protocoles de tests en conception de produit. Dans ce domaine, la norme IAPS (International Affective Picture System) est considérée comme « la référence » car elle propose des images émotionnelles classées suivant 3 conditions : désagréable, neutre, agréable (Lang, Bradley & Cuthbert, 1999).

Cette bibliothèque de 1200 images est constituée de contenus très variés, nous trouvons par exemple :

- Dans la condition désagréable : des photos de serpents sur l'herbe, de serpents à l'allure menaçante, de chiens aux comportements agressifs, d'insectes, de navires qui coulent, d'avions qui explosent, de scènes dégoutantes, des scènes d'agression, des scènes d'interventions médicales (*dentistes, opérations chirurgicales*)...

- Dans la condition neutre : des champignons, des objets de la vie courante, des végétaux....
- Dans la condition agréable : des paysages, des bébés, des scènes joyeuses montrant des personnages, des scènes de la vie quotidienne, des scènes érotiques, des œuvres d'art, de la nourriture, des photos d'exploits sportifs ou techniques....

Un autre intérêt de l'utilisation de stimulations émotionnelles visuelles est que l'homme analyse son environnement notamment par le visuel qui lui permet de percevoir de nombreuses caractéristiques d'un objet : sa composition, son esthétique, sa fonctionnalité, sa qualité, ses défauts... (Schifferstein & Cleiren, 2005).

La pupillométrie, qui permet la quantification du diamètre de la pupille, est utilisée depuis de nombreuses années dans la recherche avec les images (Hess & Polt, 1960 ; Libby, Lacey, & Lacey, 1973, Steinhauer *et al.*, 1983). Pour réaliser notre expérimentation visuelle, nous nous sommes plus particulièrement inspirés du travail de Bradley *et al.* (2008) qui ont observé que la visualisation d'images émotionnelles augmentait la taille de la pupille. Dans leur expérience, ils ont uniformisé la luminance des images en corrigeant leur niveau de gris pour obtenir une valeur moyenne identique pour toutes les images. Ce traitement de l'image permet de réduire les effets d'accommodation de la pupille aux changements de luminance.

Nous avons choisi un protocole de mesure de la pupille basé sur l'utilisation d'images IAPS en noir et blanc, mais construit sur les mêmes bases que notre première expérimentation, pour :

- Valider par cette deuxième expérimentation le fait que la pupille peut être un indicateur pertinent de l'émotion induite par une image ;
- Valider que la procédure de traitement des données appliquée dans notre expérimentation « tactile » conviendra à cette expérimentation « visuelle »,
- Vérifier si les valeurs des tests déclaratifs sont corrélées avec les réactions pupillaires observées.

2.1 Choix des images

Nous avons sélectionné 21 images (7 images désagréables, 7 images neutres, 7 images agréables) à partir de la base de données IAPS standardisée par Lang, Bradley et Cuthbert (1999). A chacune des 1200 images IAPS proposées, correspond un score de valence et un autre d'arousal, recueillis en utilisant la méthode Self-Assessment Manikin (SAM) (Bradley & Lang, 1994). Pour chaque dimension, de petites illustrations représentent l'évolution du ressenti sur une échelle en 9 points. Par exemple, pour évaluer la valence, à une extrémité de l'échelle apparaît un visage joyeux et à l'autre un visage renfrogné.

Nos images ont été sélectionnées de manière à provoquer de fortes émotions sans pour autant être trop choquantes. La notation obtenue pour nos 21 images est présentée dans la Figure 2.27. Les valences des 7 premières images désagréables sont comprises entre -2,02 et -2,96, celles des 7 images neutres comprises entre -0,13 et 0,04, et celles des 7 images agréables comprises entre 1,81 et 3,02. Lang *et al.* (1997) considèrent que les valeurs du neutre sont les valeurs proches de zéro. Quant à l'arousal, les notes des 7 premières désagréables sont comprises entre 6,52 et 4,54, celles les 7 images neutres comprises entre 1,72 et 2,92, et celles les 7 images agréables comprises entre

5,12 et 7,17. Dans la figure 2.28, les images sélectionnées sont placées dans un diagramme « Valence – Arousal ». On voit bien dans cette figure que nos images peuvent être classées en images neutres ou émotionnelles, ainsi qu'en images agréables ou désagréables.

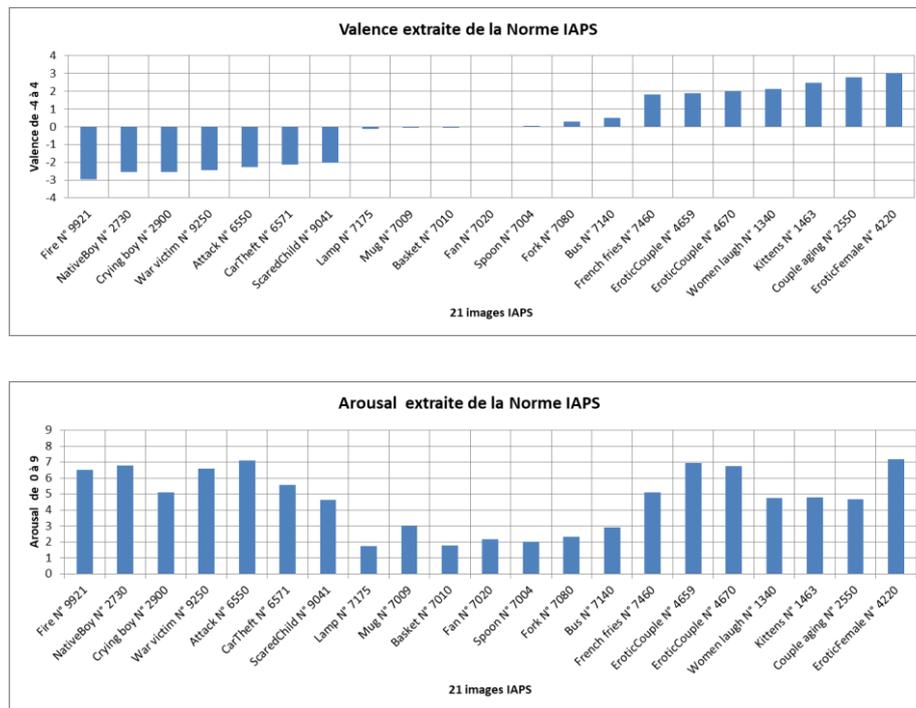


Figure 2.27 – Notes de valence et d’arousal issues de la norme IAPS (Lang et al, 1997)

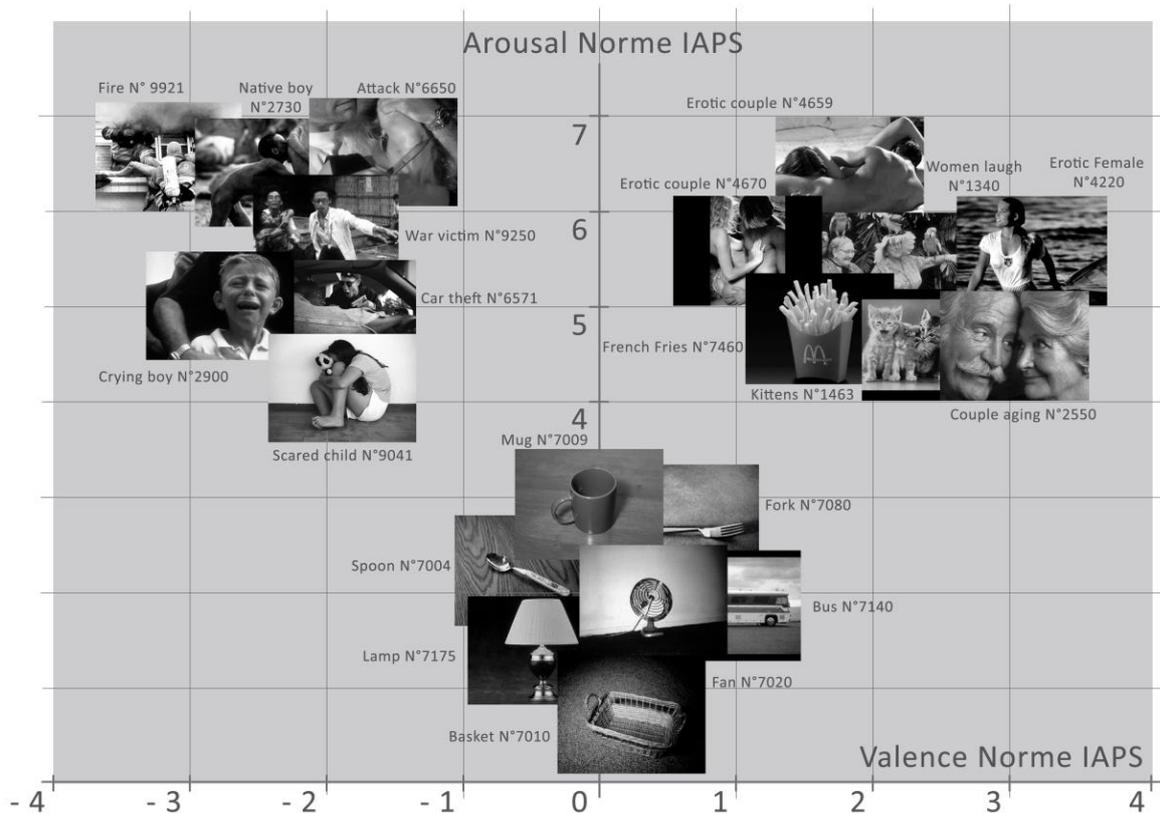


Figure 2.28 – Images IAPS sélectionnées dans un diagramme « Valence – Arousal »

2.2 Protocole et mesures expérimentales

Un panel de quinze étudiants a été recruté, 6 femmes et 9 hommes âgés de 19 à 28 ans (moyenne : 21,53 ; écart-type : 2,85). L'expérimentation a été réalisée dans une salle éclairée artificiellement et avec un fenestron. A leur arrivée, les participants étaient invités à remplir un questionnaire HAD (Hospital Anxiety and Depression scale) afin de quantifier leur état émotionnel initial. Deux sujets présentaient un léger état d'anxiété notamment provoqué par le déroulement du test. Les participants étaient installés sur une chaise de bureau confortable, face à un ordinateur portable muni d'une carte graphique NVIDIA Geforce GT 630M et d'un écran de 17,3 pouces avec une résolution de 1600x900 pixels, rafraîchie à une fréquence de 60Hz. Des mesures de luminance effectuées tout au long du test ont donné une valeur moyenne de 100 Lux. Cette valeur est proche des conditions d'éclairage photopique recommandées (Mabed *et al.*, 2014).

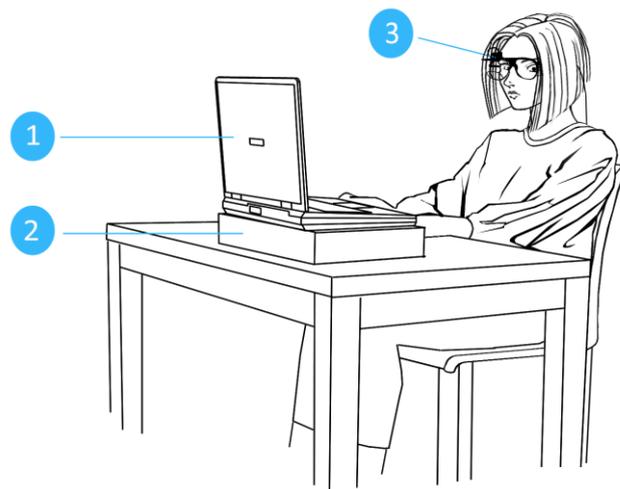


Figure 2.29 – Dispositif expérimental des expérimentations visuelles

Le dispositif expérimental présenté dans la Figure 2.29 est composé de : (1) un ordinateur placé à 70 cm du participant, conformément aux recommandations ergonomiques ; (2) une boîte en carton de dimensions : 50x32x9,5 cm, permettant de surélever l'écran de l'ordinateur afin de favoriser la mesure de la pupille ; (3) une paire de lunettes de pupillométrie permettant l'enregistrement de la pupille droite pendant le visionnage.

Pour concevoir notre expérimentation, nous avons repris le design expérimental développé avec le toucher qui consistait à présenter une « phase de repos » suivi d'une « phase de découverte » et d'une « phase de discussion ». Une première image contenant le nom du test était présentée pendant 20 s. Durant cette phase, le participant était invité à se relaxer, les bras posés sur la table, les yeux fixant un point droit devant. Ensuite, les participants découvraient successivement les 21 images IAPS et après la présentation de chacune de ces images, le participant devait évaluer la connotation émotionnelle de l'image et noter sa réponse sur un questionnaire. Toutefois, pour prendre en compte quelques spécificités liées au fait que le capteur visuel est également notre capteur d'émotion, nous avons adapté la séquence de présentation de chaque image.

Nous avons tout d'abord éliminé le « biais de couleur de l'image » en convertissant les 21 images IAPS en niveau de gris. En effet, la couleur de l'image est susceptible de provoquer de l'émotion, indépendamment du contenu. D'après Robert Floru (1996) les images en noir et blanc présentent

toujours la même luminosité que l'image de couleur d'origine. La conversion d'une image « couleur » en une image « noir et blanc » a été faite en prenant pour chaque pixel la moyenne des trois valeurs représentant les niveaux de rouge, de vert et de bleu. Nous présentons dans la Figure 2.30 l'échelle des niveaux de gris, codée sur 8-bit en $2^8=256$ valeurs.

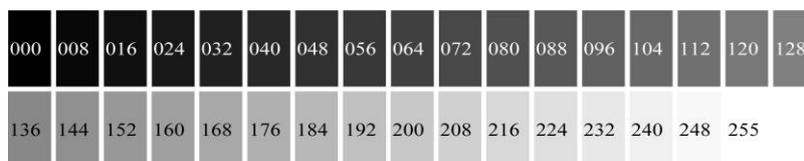


Figure 2.30 – Echelle des niveaux de gris de 0 (noir) à 255 (blanc)

La Table 2.31 montre les niveaux de gris moyens des 21 images IAPS sélectionnées, qui varient entre 31,86 et 130,75. Cet écart étant élevé, nous avons ensuite décidé d'intercaler des images en niveau de gris moyen entre chaque image IAPS pour permettre à l'œil de s'accommoder aux changements de luminance. Partant des valeurs correspondantes aux 21 niveaux de gris moyens des images IAPS nous avons réalisé 21 images en niveau de gris moyen. Les images en niveau de gris moyen ont été présentées pendant 10 s, suivi de l'image IAPS correspondante affichée pendant 15 s.

Images désagréables	Fire N° 9921	NativeBoy N° 2730	Crying boy N° 2900	War victim N° 9250	Attack N° 6550	CarTheft N° 6571	ScaredChild N° 9041
Niveau de gris	106,3255	63,3697	63,9404	62,9652	73,3492	50,8785	130,7506
Images neutres	Lamp N° 7175	Mug N° 7009	Basket N° 7010	Fan N° 7020	Spoon N° 7004	Fork N° 7080	Bus N° 7140
Niveau de gris	35,5287	62,7741	42,1573	103,9269	47,2393	86,3254	97,6554
Images agréables	French fries N° 7460	EroticCouple N° 4659	EroticCouple N° 4670	Women laugh N° 1340	Kittens N° 1463	Couple aging N° 2550	Erotic Female N° 4220
Niveau de gris	31,8624	83,0867	43,437	71,8449	89,3844	79,8617	64,9834

Table 2.31 – Tableau des niveaux de gris moyens pour les 21 images IAPS

Le participant effectuait le lancement du diaporama dès que la consigne était formulée par l'animateur. La projection des images IAPS a été effectuée à partir d'un diaporama minuté, réalisé sur le logiciel PowerPoint. La Figure 2.32 présente le cadencement du diaporama : Affichage d'une première image « titre » permettant la mesure de la pupille du participant au repos (20 s) puis une succession de 21 séquences comportant une image niveau de gris (10 s) puis l'image IAPS associée (15 s). La durée totale du diaporama est ainsi de 545 s, soit un peu plus de 9 mn.

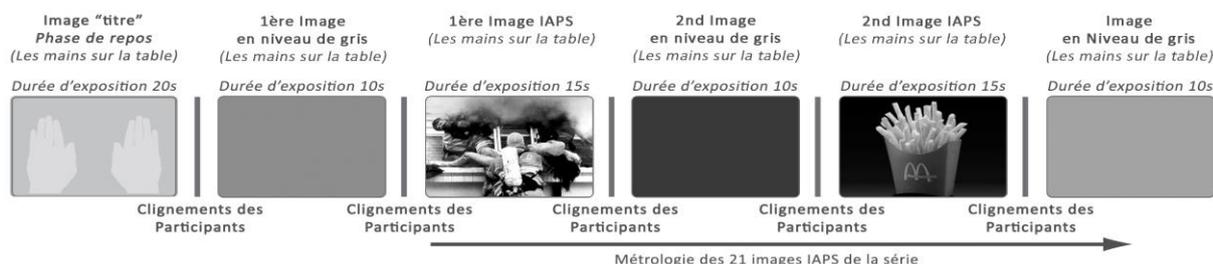


Figure 2.32 – Cadencement du diaporama

Comme lors de l'expérimentation tactile, des mesures verbalisées ont permis de déterminer la composante subjective de l'émotion associée à chaque image, en utilisant le Model Circumplex de Russel (1980) qui collecte deux dimensions : la valence et l'arousal. Juste après avoir vu l'image, le participant était invité à chiffrer entre -4 et 4 l'émotion ressentie (la valence, de désagréable à

agréable), puis de 1 à 5 l'intensité de cette émotion (l'arousal, selon l'échelle SAM). Le questionnaire est présenté dans la Figure 2.33.

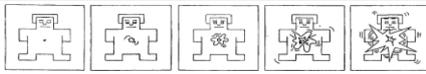
	Quelle émotion cette image provoque-t-elle chez vous?	Et avec quelle intensité?
Image n°x	Désagréable -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 Agréable	

Figure 2.33 – Questionnaire de mesures subjectives de la valeur émotionnelle des images IAPS

Les réponses émotionnelles étaient également enregistrées, comme dans l'expérimentation tactile, par un équipement de pupillométrie de type ISCAN-ETL-100H - Eye Laboratory (*Inc. Eye & Target Tracking instrumentation. Woburn Massachusetts, Etat-Unis*). Le diamètre de la pupille dans le temps $d(t)$ a été enregistré en continu durant toute la durée du test, à une fréquence de 60 Hz. La séquence d'enregistrement a ensuite été partitionnée et les données d'enregistrement de chaque image ont été extraites à l'aide d'une macro Excel. Les images IAPS étaient présentées suivant trois ordres de présentation différents, afin de réduire l'incidence de l'image précédente sur l'image courante. D'autres artéfacts peuvent modifier l'enregistrement de la pupille comme le réflexe de fixation qui correspond à un mouvement oculaire intervenant lors de la transduction du stimulus visuel vers les zones de traitement des informations visuelles, les clignements qui humidifient la cornée environ 15 à 20 fois par minute, les microsaccades qui permettent la visualisation complète de l'image. Comme pour la première expérimentation tactile, un algorithme de nettoyage des données a été appliqué afin de corriger au mieux ces artéfacts.

2.3 Résultats des mesures verbalisées

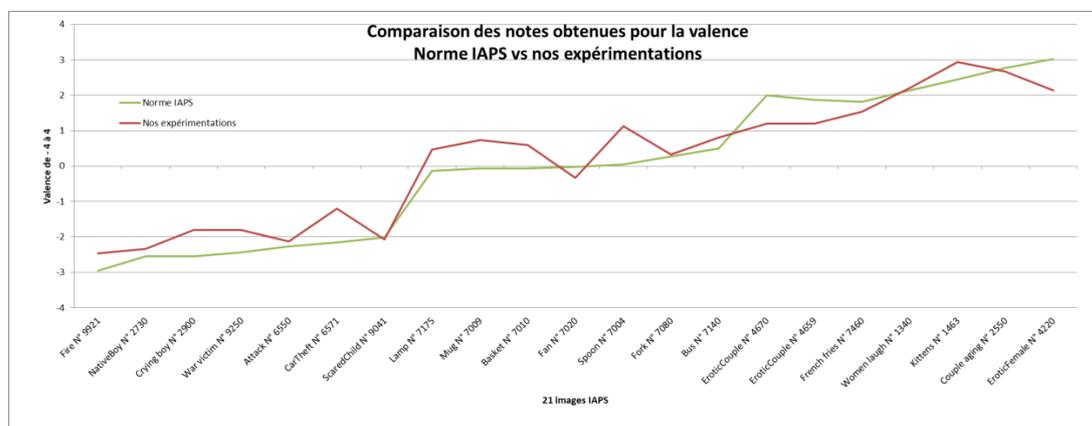


Figure 2.34 – Comparaison de la valence : norme IAPS vs nos expérimentations

Le graphique présenté dans la Figure 2.34 compare les notes de valence obtenues dans la norme IAPS et dans nos expérimentations. Pour réaliser la comparaison présentée ci-après, l'échelle de la norme comprise entre 1 et 9 a été décalée en soustrayant 5 car l'échelle employée lors de nos expérimentations était comprise entre -4 et 4. Le coefficient de corrélation entre ces deux jeux de données est de 0,9635, ce qui valide notre mesure et notre panel au regard de la norme IAPS.

Un test de Kolmogorov-Smirnov a montré que les données explicites ne suivent pas une loi normale. A un risque de 5%, un test de Friedman a montré que l'effet du facteur émotion est significatif pour

ce qui concerne les valeurs de la valence issues de nos expérimentations ($\chi^2 (2) = 27,76 ; p < 0,0001$). Sur ces mêmes données, une analyse post hoc a été réalisée à l'aide d'un test de rangs de Wilcoxon, qui a montré que les stimuli émotionnels se distinguaient des stimuli neutres. Plus précisément, les stimuli neutres étaient significativement différents des images désagréables ($w = 3,40 ; p = 0,0006$) et des images agréables ($w = 3,23 ; p = 0,001$). Les images agréables différaient également des images désagréables ($w = 3,40 ; p = 0,0006$). Par ailleurs, nous avons vérifié l'effet du genre, en réalisant un test de Mann-Whitney sur les données, ce dernier n'est significatif pour aucune des conditions émotionnelles : désagréable ($U = 17,50 ; p = 0,28$), neutre ($U = 23,50 ; p = 0,72$), agréable ($U = 32 ; p = 0,59$).

La Figure 2.35 compare les notes d'arousal obtenues dans les normes IAPS et dans notre expérimentation. Le recalage de nos résultats (arousal de 1 à 5) sur les valeurs IAPS (arousal de 1 à 9) a été effectué avec la formulation suivante : $IAPS = (expérimentation - 1) \times 2 + 1$.

Le coefficient de corrélation entre les deux séries de données est de 0,8076. Ce moins bon résultat que celui de la valence peut être attribué à la difficulté pour un panel de chiffrer une « intensité émotionnelle », difficulté amplifiée par l'échelle réduite (de 1 à 5) que nous avons utilisée. Néanmoins ; on distingue bien dans la Figure 2.35 les images émotionnelles des images neutres.

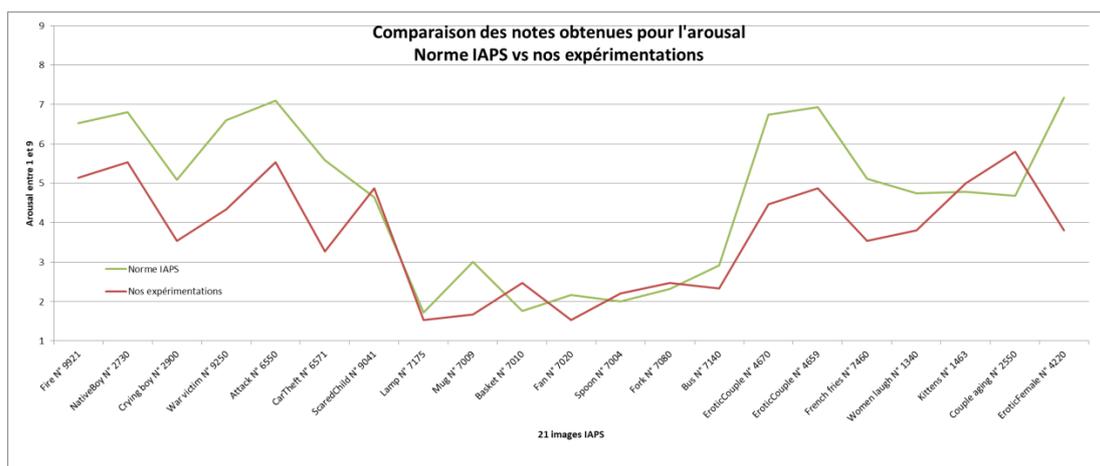


Figure 2.35 – Comparaison de l'arousal : norme IAPS vs nos expérimentations

Comme pour les données de la valence, les courbes montrent des similitudes. A un risque de 5%, un test de Friedman montre que l'effet du facteur émotion est significatif pour ce qui concerne les valeurs d'arousal issues de nos expérimentations ($\chi^2 (2) = 23,42 ; p < 0,0001$). Sur ces données, une analyse post hoc a été réalisée à l'aide d'un test de rangs de Wilcoxon, qui a montré que les stimuli émotionnels se distinguent des stimuli neutres avec une différence entre les stimuli neutres et désagréables ($w = 3,40 ; p = 0,0006$) et entre les stimuli neutres et agréables ($w = 3,40 ; p = 0,0006$). En revanche, la paire « images désagréables vs images agréables » n'est pas significative ($w = 0,25 ; p = 0,8$) ce qui n'est pas étonnant car l'arousal correspond à l'intensité corporelle exprimée de la même manière pour un ressenti émotionnel désagréable ou agréable. De plus, l'effet du genre n'est toujours pas significatif selon un test de Mann-Whitney : désagréable ($U = 21 ; p = 0,51$), neutre ($U = 23,50 ; p = 0,72$), agréable ($U = 30,50 ; p = 0,72$).

Par ailleurs, comme pour notre première expérimentation, il est possible de visualiser la valeur émotionnelle de l'image sur deux dimensions, arousal et valence, par des histogrammes 3D. Nous

présentons dans la Figure 2.36 les histogrammes 3D de 3 images : désagréable (*Fire N° 9921* ; valeurs moyennes valence : - 2,46 et arousal : 3,06), neutre (*Fan N° 7020* ; valeurs moyennes valence : -0,33 et arousal : 1,26) et agréable (*Kittens N° 1463* ; valeurs moyennes valence : 2,93 et arousal : 3).

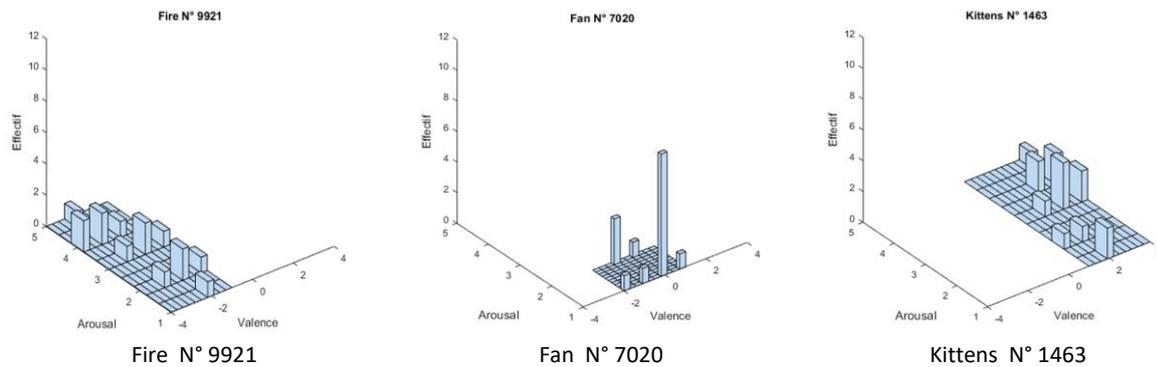


Figure 2.36 – Histogramme 3D représentant la valeur émotionnelle de 3 images : *Fire* (désagréable), *Fan* (neutre) et *Kittens* (agréable)

2.4 Résultats des mesures de pupillométrie

En réalisant cette expérimentation visuelle, nous souhaitons savoir si, comme pour la première expérimentation tactile, la pupille pouvait être un indicateur de l'émotion induite lors du visionnage d'images affectives. Les données brutes provenant des enregistrements de la pupille ont donc été nettoyées à l'aide d'un algorithme qui détecte les clignements, les absences de mesures, les mesures aberrantes et les résultats des enregistrements de la pupille ont été obtenus en calculant la dilatation du diamètre de la pupille de chaque sujet pour chaque image sous la forme $(d(t) - d_0) / d_0$ où $d(t)$ est le diamètre de la pupille mesuré à un instant t et d_0 représente un diamètre initial, dont nous détaillons les calculs ci-après.

Nous présentons ci-après les deux modes de traitement que nous utiliserons pour réaliser le dépouillement des données visuelles.

- Dans le premier traitement, que nous appellerons « d_0 constant », le diamètre initial d_0 est obtenu suivant le même protocole que notre expérimentation tactile, c'est-à-dire sur les 2 dernières secondes de la première image présentée dans le diaporama (*image titre*). Cette image est présentée durant 20 secondes, le sujet au repos, les mains du sujet posées sur la table pour éviter les mouvements.
- Dans le second traitement, que nous appellerons « d_0 adapté », le diamètre initial d_0 est obtenu, pour chaque sujet et chaque image, à partir des 0,3 dernières secondes de l'image en niveau de gris qui précède l'image IAPS. Cette durée correspond au temps nécessaire à la pupille pour se réduire ou se dilater lors d'un changement d'illumination (Charier, 2020).

La valeur $d(t)$ correspond au diamètre de la pupille du participant mesuré au temps t , et le résultat utilisé est une variation relative de diamètre, $(d(t) - d_0) / d_0$, présentée en pourcentage. La durée de 6 secondes utilisée est la même que celle employée par Bradley *et al.* (2008) dans leurs travaux.

2.4.1 Traitement à « d₀ constant »

La Figure 2.37 et la Table 2.38 montrent les valeurs des coefficients de dilatation moyens de la pupille, sur 6 s, pour les 21 images IAPS. Nous avons effectué un test de Kolmogorov-Smirnov sur cet ensemble de données. À un risque de 5%, les résultats ont montré que nos données ne suivent pas une distribution normale. Par ailleurs, selon le test d'inégalité de Bienaymé-Tchebychev, dans le cas où les données ne suivent pas une loi normale, la probabilité pour que la variable aléatoire soit réalisée dans l'intervalle $\pm 2 \sigma$ est de 75% et devient 89% dans la plage de $\pm 3 \sigma$.

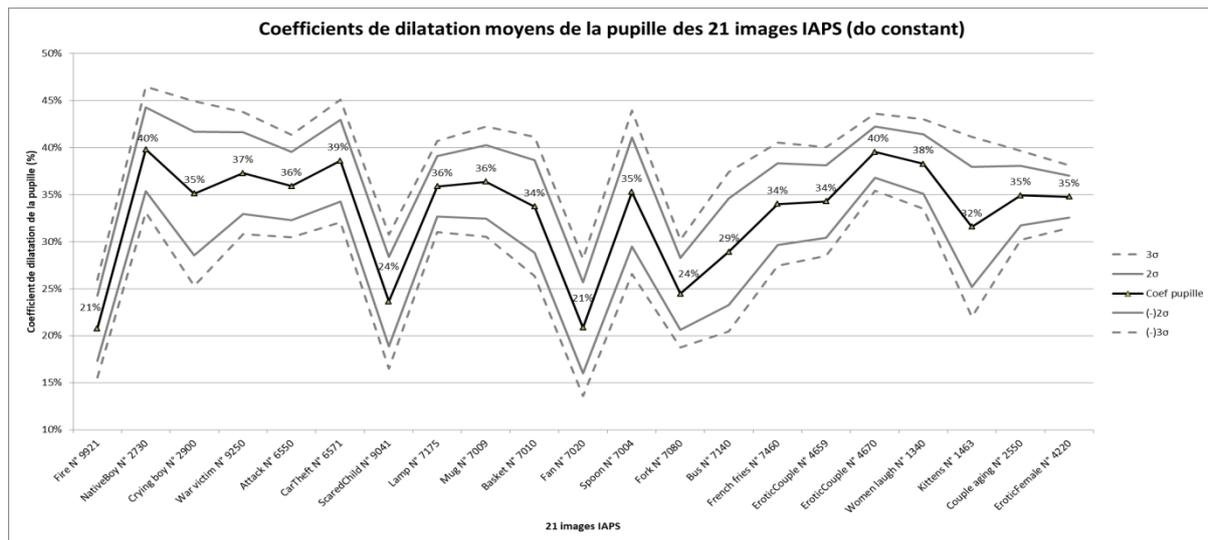


Figure 2.37 – Coefficients de dilatation moyens de la pupille pour les 21 images IAPS (d₀ constant).

Images désagréables	Fire N° 9921	NativeBoy N° 2730	Crying boy N° 2900	War victim N° 9250	Attack N° 6550	CarTheft N° 6571	ScaredChild N° 9041
Coef moyen	21%	40%	35%	37%	36%	39%	24%
Images neutres	Lamp N° 7175	Mug N° 7009	Basket N° 7010	Fan N° 7020	Spoon N° 7004	Fork N° 7080	Bus N° 7140
Coef moyen	36%	36%	34%	21%	35%	24%	29%
Images agréables	French fries N° 7460	EroticCouple N° 4659	EroticCouple N° 4670	Women laugh N° 1340	Kittens N° 1463	Couple aging N° 2550	Erotic Female N° 4220
Coef moyen	34%	34%	40%	38%	32%	35%	35%

Table 2.38 – Valeurs des coefficients de dilatation moyens de la pupille pour les 21 images IAPS

La Figure 2.39 présente les courbes de variation relative aux diamètres de pupilles sur les images désagréables, neutres, et agréables. Ces courbes sont obtenues en réalisant une moyenne des résultats obtenus sur les 7 images d'une même condition. Une étude statistique a finalement été réalisée sur ces données. Compte-tenu qu'elles ne suivent pas une loi normale, nous avons utilisé des tests non-paramétriques pour les interpréter. Un test de Friedman par rangs a donc été réalisé sur les données moyennées pour chaque image et pour chaque participant (Lehmann & D'Abrera, 1975 ; Hollander et al., 1999). Il résulte de ce test que l'effet de l'émotion n'est pas significatif ($\chi^2(2) = 3$; $p < 0,22$), et que l'effet du genre n'est pas non plus significatif, ni pour la condition désagréable ($U = 21$; $p = 0,52$), ni pour la condition agréable ($U = 18$; $p = 0,32$), ni pour la condition neutre ($U = 16$; $p = 0,22$).

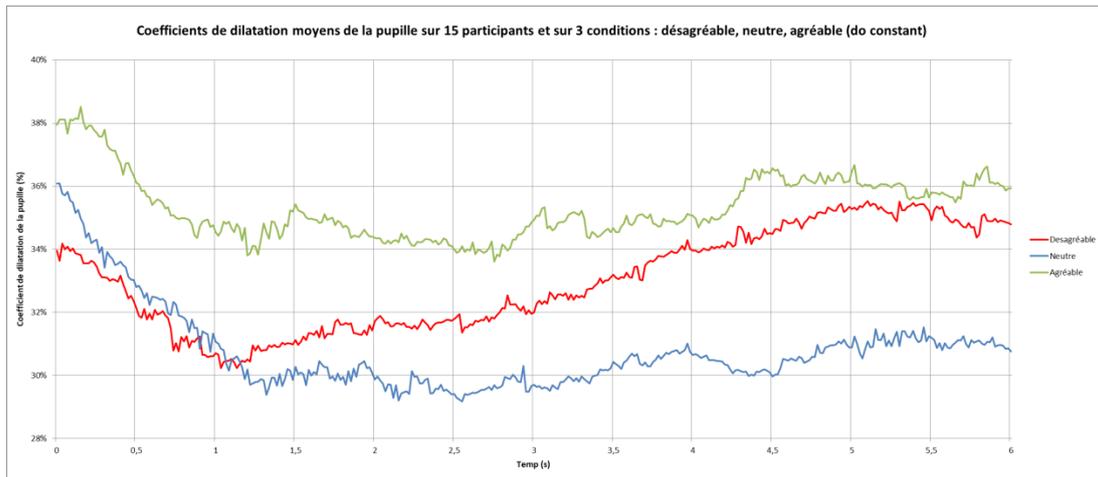


Figure 2.39 – Coefficients de dilatation moyens de la pupille sur 15 participants et sur 3 conditions

La Table 2.31 donne les niveaux de gris moyens de chaque image. On remarque que le niveau de gris moyen des images désagréables (première ligne) est supérieur à 78, tandis que les niveaux de gris moyens des images neutres et agréables sont inférieurs à 70. Ceci pourrait expliquer, dans la Figure 2.39, le positionnement sur des valeurs faibles de la courbe associée aux images désagréables. En effet, la réduction du diamètre de la pupille, pour s'adapter à la luminance de ces images, n'est pas prise en compte dans ce traitement.

Pour confirmer cette hypothèse, nous avons calculé le coefficient de corrélation entre la variation moyenne du diamètre de la pupille sur 6 s, et le niveau de gris moyen des 21 images IAPS. Le coefficient de corrélation obtenu entre ces deux séries de données est de - 0,75, ce qui montre que la variation de niveau de gris entre les 21 images est un paramètre du premier ordre qui masque un éventuel effet de l'émotion ressentie.

2.4.2 Traitement à « d_0 adapté »

La Figure 2.40 et la Table 2.41 montrent les valeurs des coefficients de dilatation moyens de la pupille pour les 21 images IAPS. Nous avons effectué un test de Kolmogorov-Smirnov sur cet ensemble de données. À un risque de 5%, les résultats ont montré que nos données ne suivent pas une distribution normale. Par ailleurs, selon le test d'inégalité de Bienaymé-Tchebychev, dans le cas où les données ne suivent pas une loi normale, la probabilité pour que la variable aléatoire soit réalisée dans l'intervalle $\pm 2 \sigma$ est de 75% et devient 89% dans la plage de $\pm 3 \sigma$.

La Figure 2.42 présente ensuite les courbes moyennes des 3 conditions : désagréable, neutre, agréable. Ces courbes sont obtenues en réalisant une moyenne de chaque valeur (t) dans l'intervalle de 6s des 7 images d'une même condition. Conformément à nos attentes, on observe qu'en appliquant un traitement des données qui prend en compte le niveau de gris de chaque image IAPS, la courbe relative aux images désagréables se rapproche de celle relative aux images agréables, et se différencie nettement de celle associée aux images neutres.

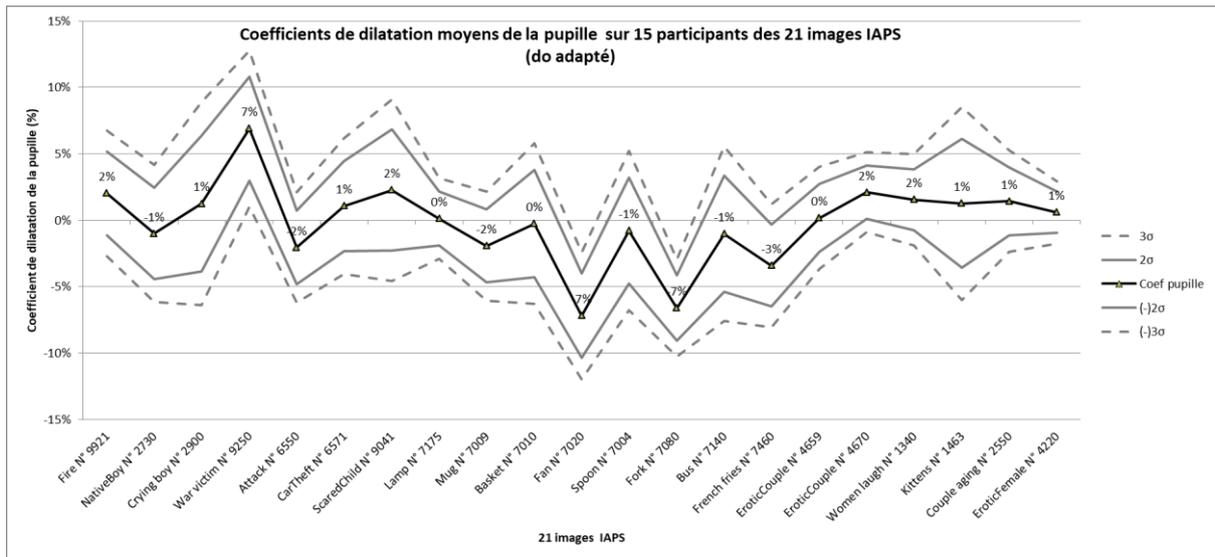


Figure 2.40 – Coefficients de dilatation moyens de la pupille des 21 images IAPS (d_0 adapté)

Images désagréables	Fire N° 9921	NativeBoy N° 2730	Crying boy N° 2900	War victim N° 9250	Attack N° 6550	CarTheft N° 6571	ScaredChild N° 9041
Coef moyen	2%	-1%	1%	7%	-2%	1%	2%
Images neutres	Lamp N° 7175	Mug N° 7009	Basket N° 7010	Fan N° 7020	Spoon N° 7004	Fork N° 7080	Bus N° 7140
Coef moyen	0%	-2%	0%	-7%	-1%	-7%	-1%
Images agréables	French fries N° 7460	EroticCouple N° 4659	EroticCouple N° 4670	Women laugh N° 1340	Kittens N° 1463	Couple aging N° 2550	Erotic Female N° 4220
Coef moyen	-3%	0%	2%	2%	1%	1%	1%

Table 2.41 – Coefficients de dilatation moyens de la pupille pour les 21 images IAPS (d_0 adapté).

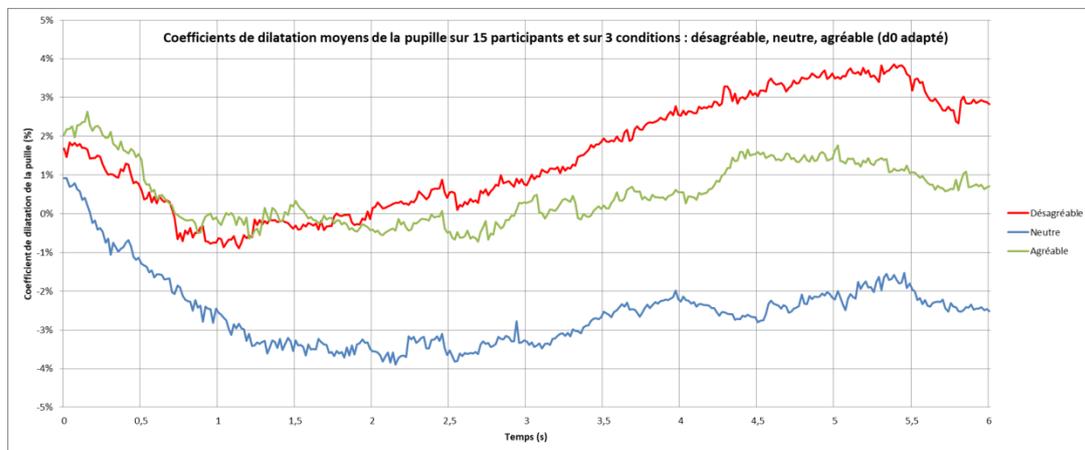


Figure 2.42 – Coefficients de dilatation moyens de la pupille sur 15 participants et sur 3 conditions (d0 adapté)

Une étude statistique a été réalisée sur ces données. Compte-tenu que l'hypothèse de normalité n'est pas acceptable, nous avons utilisé un test de Friedman pour traiter les données moyennées pour chacune des 21 images et pour les 15 participants. A un risque de 5%, on retient un effet de l'émotion ($\chi^2(2) = 8,4$; $p < 0,01$). Une analyse post hoc a montré une différence entre les images neutres vs désagréables ($w = 2,44$; $p = 0,01$) et neutres vs agréables ($w = 2,83$; $p = 0,004$). En revanche, les conditions désagréables vs agréables ne sont pas significatives ($w = 0,39$; $p = 0,69$). Par ailleurs, le facteur genre n'est toujours pas ressorti : désagréable ($U = 16$; $p = 0,22$), neutre ($U = 27$; $p = 0,1$), agréable ($U = 27$; $p = 0,1$).

Les résultats d'une analyse en composantes principales (ACP) sont présentés dans la Figure 2.43. Le premier axe factoriel, qui représente 82,62 % de la variance expliquée (ie. de l'information), classe les images neutres à gauche, et émotionnelles à droite, à l'exception des images French fries N° 7460, Attack N° 6550 et Native Boy N° 2730 qui se situent dans la partie négative de l'axe horizontal du côté des images neutres. Le deuxième axe factoriel représente 9,82 % de la variance expliquée. Cet axe est plus difficile à interpréter.

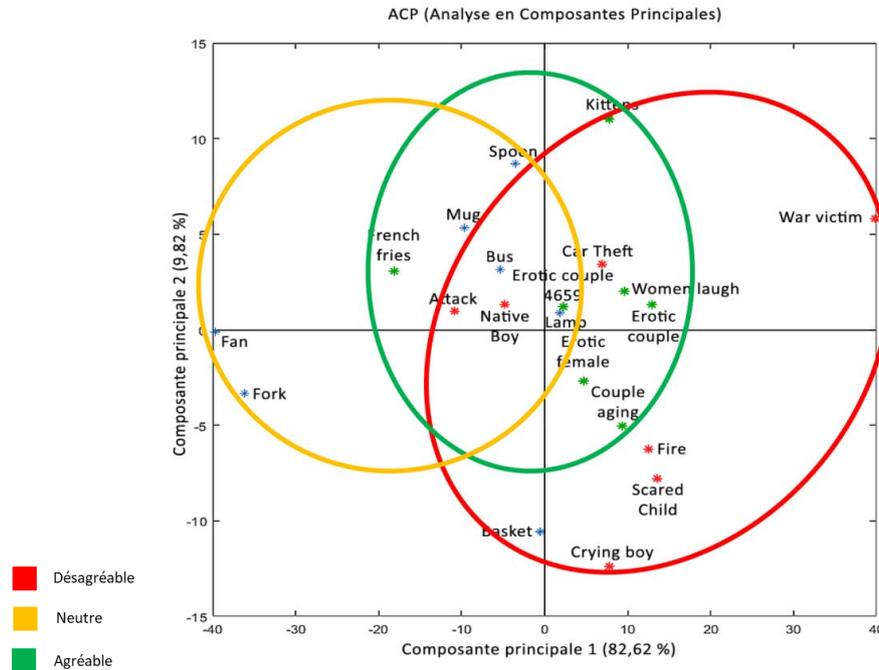


Figure 2.43 – Analyse en composantes principales (ACP) qui classe les images du neutre aux émotionnelles

Les résultats de l'ACP semblent moins pertinents que ceux obtenus dans les expérimentations tactiles. Rappelons que l'ACP a été réalisée à partir d'enregistrements de la pupille qui traduisent les réactions corporelles provenant de traitements émotionnels involontaires et inconscients alors que les résultats des tests déclaratifs proviennent de traitements émotionnels raisonnés et conscients qui intègrent l'opinion, la culture, les expériences, le vécu de l'individu. Par ailleurs, nous avons remarqué que l'expression de l'arousal par les participants était plus difficile que l'expression de la valence, rendant cette mesure déclarative moins fiable.

2.5 Discussion

Les objectifs de cette expérimentation étaient d'une part de montrer jusqu'à quel point des images en noir et blanc émotionnelles induisaient une dilatation de la pupille, et d'autre part de vérifier si l'expression verbale de ces émotions se corrélaient avec la réaction pupillaire.

Pour répondre à nos objectifs, nous avons repris le design expérimental développé dans notre première expérimentation sur le toucher en apportant quelques adaptations afin de respecter les contraintes de la physiologie de la vision. Un diaporama permettait la projection en continu de 21 images IAPS converties en noir et blanc. Comme pour le toucher, la projection débutait par une première image comportant le nom du test destinée à mesurer la pupille du sujet au repos.

Pour réduire l'incidence des changements de luminance sur la pupille, nous avons intercalé entre chaque image IAPS une image en niveau de gris moyen correspondant à la valeur moyenne mesurée sur chacune des images IAPS. Bradley *et al.* (2008) avaient déjà utilisé des images en noir et blanc et manipulé les niveaux de gris afin que les images IAPS présentent la même valeur de luminance moyenne. Contrairement à eux, nous avons choisi de conserver la valeur de luminance initiale en niveau de gris des images et d'utiliser les images intermédiaires en niveau de gris moyen pour accommoder la pupille à la luminance à chacune des images IAPS. L'enregistrement de la pupille s'effectuait en continu et le participant évaluait les composantes de son émotion après avoir visualisé chacune des images IAPS.

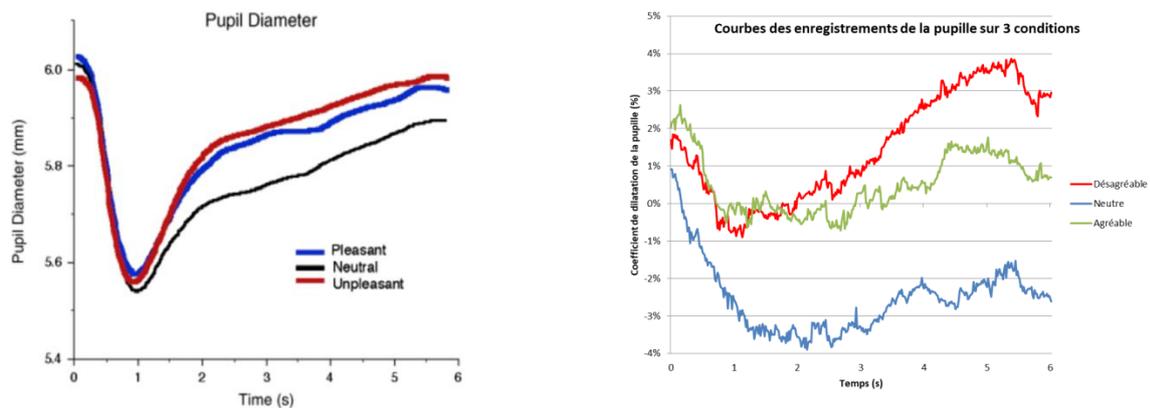
Tout d'abord, nos résultats sur les mesures déclaratives ont montré une très bonne corrélation avec les mesures déclaratives obtenues dans la norme IAPS par Lang *et al.* (1999). L'analyse de régression montre un lien très important entre les données que ce soit pour la valence ou pour l'arousal. De plus, les analyses statistiques de comparaison de moyennes ont révélé que les stimuli émotionnels se distinguaient des stimuli neutres et que les stimuli désagréables se différenciaient des stimuli agréables concernant la valence. L'analyse sur l'arousal révélait une différence entre les stimuli émotionnels et neutres. En revanche, aucune différence n'apparaissait entre les images désagréables et agréables ce qui s'explique puisque l'arousal correspond au niveau d'intensité qu'engendre une réponse émotionnelle.

Ces résultats indiquent que les réponses données par notre panel d'étudiants français étaient très proches des réponses obtenues 21 ans auparavant par un groupe d'américains ce qui tend à prouver une nouvelle fois que l'émotion est universelle. Par ailleurs, le Model Circumplex de Russel (1980) s'est avéré complètement adapté à la mesure émotionnelle déclarative. Il faut noter que dans le test de Bradley *et al.* (2008) les mesures déclaratives ont été effectuées a posteriori après avoir effectué l'enregistrement de la pupille pendant la visualisation des 96 images induisant probablement un « biais de réponse ». Par ailleurs, aucune étude de corrélation ou de classement des images IAPS n'avait été effectuée dans les travaux de Bradley *et al.* (2008).

Dans un premier dépouillement des données, les enregistrements de la pupille de l'expérimentation visuelle ont été traités de la même manière que pour le toucher. Le résultat de ce traitement à « d_0 constant » n'a pas montré d'effet de l'émotion. L'utilisation du test de Friedman ne permet pas de mettre en relief de différence significative entre nos trois conditions expérimentales. Ceci a confirmé que nous devons revoir notre procédure de traitement pour mieux prendre en compte les effets de la luminance dans le dépouillement et ainsi différencier la procédure de traitement de l'expérimentation visuelle de la procédure de traitement réalisée pour l'expérimentation du toucher.

Dans un second traitement des données relatives aux enregistrements de la pupille, nous avons calculé pour chaque participant et pour chaque image un « d_0 » associé au niveau de gris moyen des images IAPS. Ce mode de traitement à « d_0 adapté » a permis de présenter des coefficients de dilatation moyens de la pupille qui tiennent compte de l'adaptation de la pupille à la luminance. Le résultat de ce traitement à « d_0 adapté » a montré un effet de l'émotion avec une différence significative entre les images émotionnelles et les neutres. En revanche, aucune différence n'apparaissait entre les images désagréables et agréables. Les courbes obtenues dans ce second traitement présentent les mêmes tendances que Bradley *et al.* (2008), avec les courbes « désagréable » et « agréable » qui se distinguent de la courbe « neutre ». Nous présentons dans la

Figure 2-44 les courbes obtenus par Bradley *et al.* (2008) et par nos expérimentations avec un traitement « d_0 adapté ».



Extrait de la Figure 2 qui présente les résultats obtenu pour l'enregistrement de la pupille publié par Bradley *et al.*, 2008 sur 3 conditions

Courbes des enregistrements de la pupille obtenus sur 3 conditions dans nos expérimentations sur le visuel avec le traitement « d_0 adapté ».

Figure 2.44 – Courbes des enregistrements de la pupille obtenus sur 3 conditions dans les tests de Bradley *et al.* (2008) et dans nos expérimentations sur le visuel avec le traitement « d_0 adapté ».

Une des grandes différences entre le protocole réalisé par Bradley *et al.* (2008) et le protocole présenté dans cette expérimentation est que nous avons souhaité conserver les caractéristiques émotionnelles propres aux images en noir et blanc en ne modifiant pas les niveaux de gris moyens des images. Bradley *et al.* (2008) avaient choisi d'uniformiser la luminance des images pour qu'elles présentent toutes le même niveau de gris moyen. Nous avons donc préféré supprimer le « biais de luminance » en introduisant avant les images IAPS des images grises réalisées en calculant le niveau de gris moyen correspondant à l'image projetée. Notre traitement à « d_0 adapté » intègre les fluctuations du diamètre de la pupille moyen observées au moment de la visualisation de chaque image en niveau de gris moyen.

Ensuite, comme pour nos expérimentations sur le toucher, nous avons souhaité savoir s'il était possible de classer les images par condition émotionnelle à partir des enregistrements de la pupille. Les résultats obtenus avec le traitement à « d_0 adapté » sont encourageants. Les résultats de notre ACP montrent qu'à l'exception de 3 images (*French Fries N° 7460, Attack N° 6550 et Native Boy N° 2730*), les enregistrements de la pupille permettent de classer les images du neutre aux émotionnelles.

3. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de valider le fait que la pupille peut être un indicateur de l'émotion ressentie, et de vérifier éventuellement si l'on peut discriminer la nature même de l'émotion, positive et négative. Deux modalités d'entrée du système sensoriel ont été mobilisées :

- Le toucher, sens proche et peu testé dans ce contexte, dans lequel le doigt est le capteur sensoriel et la pupille l'indicateur d'émotion ;
- La vue, sens lointain, plus testé grâce à des images calibrées, mais pour lequel l'œil joue à la fois le rôle de capteur sensoriel et d'indicateur d'émotion.

Pour répondre à cette problématique, nous avons mis en place une première expérimentation tactile. Nous avons débuté notre protocole de tests en réalisant plus de 40 échantillons. Une épreuve de sélection nous a permis de choisir 12 échantillons classés sur 3 conditions : désagréable, neutre et agréable. Ce travail préliminaire était nécessaire car aucune publication ne traite à ce jour de la caractérisation de l'émotion lors de l'exploration d'une surface par le toucher et aucun matériel n'est recommandé pour réaliser ces tests. Par ailleurs, aucune procédure permettant l'évaluation des ressentis émotionnels des matériaux ou de textures n'était adaptée à nos tests.

Pour construire notre expérimentation, nous avons développé un dispositif expérimental spécifique adapté aux mesures tactiles en aveugle. Un panel constitué de 25 étudiants (*13 femmes, 12 hommes*) a évalué la valeur émotionnelle des 12 matériaux sur deux dimensions, la valence et l'arousal, en utilisant le Model Circumplex de Russel (1980). Ces mesures déclaratives ont été représentées sur un histogramme 3D qui révèle la valeur émotionnelle du matériau. Parallèlement, nous avons procédé à l'enregistrement du diamètre pupillaire durant l'exploration des surfaces à l'aide d'un équipement de pupillométrie d'une résolution de 60 Hz. Le résultat de ces données a été présenté sous la forme d'un coefficient de dilatation de la pupille qui présente l'avantage de gommer l'effet sujet en procédant au calcul d'une variation relative $(d(t) - d_0) / d_0$. Le d_0 est obtenu en réalisant la moyenne des 2 dernières mesures relevées durant la phase repos. Le $d(t)$ est la mesure à l'instant (t).

Les traitements des données ont été réalisés sur les deux premières secondes de la phase découverte. Une figure propose les coefficients de dilatation moyens de tous les matériaux classés de désagréable à agréable. Une étude statistique de ces données a montré que les trois conditions d'émotion étaient significatives, confortant l'idée que la pupille pouvait être un indicateur de l'émotion suscitée par le toucher. Par ailleurs, le classement des enregistrements de la pupille reprend la tendance observée dans les tests déclaratifs de l'arousal. Un effet de genre a également été relevé. Les réactions pupillaires désagréable et agréable étaient plus fortes chez les femmes que chez les hommes. Cette première expérimentation, nous a montré que la réaction pupillaire est un bon indicateur pour mesurer les ressentis hédoniques haptiques.

La seconde expérimentation est basée sur le visuel. Dans cette expérimentation, nous nous sommes inspirés de l'expérience réalisée par Bradley *et al.* (2008) qui utilisaient des images IAPS regroupées en 3 conditions : désagréable, neutre, agréable, pour étudier les réponses pupillaires à la vision d'images émotionnelles. La norme IAPS donne, pour chaque image, les valeurs correspondantes à la valence et à l'arousal (Lang *et al.*, 1997). L'expérimentation de Bradley *et al.* (2008) montrait une dilatation de la pupille plus importante dans les conditions émotionnelles que dans la condition neutre. Ce protocole a été adapté pour permettre la comparaison des résultats de nos deux expérimentations.

Pour commencer, nous avons sélectionné 21 images IAPS, puis un panel constitué de 15 étudiants (*6 femmes et 9 hommes*) a évalué la valeur émotionnelle des 21 images IAPS sur deux dimensions, la valence et l'arousal, en utilisant le Model Circumplex de Russel (1980). La comparaison des mesures déclaratives réalisées entre les valeurs obtenues dans la norme IAPS et celles provenant de nos tests montre une corrélation significative pour la valence comme pour l'arousal. Comme pour le tactile, la valeur émotionnelle de l'image a été représentée sous la forme d'un histogramme 3D qui reflète visuellement l'identité émotionnelle de l'image.

Les enregistrements de la pupille ont été analysés suivant deux protocoles de traitement. Le premier, traitement à « d_0 constant », a été réalisé en calculant le « d_0 » de la même manière que pour le toucher et en éliminant la « composante sujet » par un recentrage des données individuelles sur la phase de repos mesurée au démarrage du test. Contrairement au « tactile », ces résultats se sont avérés non significatifs. Ces résultats indiquaient que le traitement des données ne pouvait pas être effectué de la même manière que pour la toucher, probablement parce que dans ce test l'œil joue à la fois le rôle de capteur sensoriel et d'indicateur d'émotion. Nous avons également observé que, dans le cas du traitement à « d_0 constant », le niveau de gris moyen des images apparaît comme le premier facteur mesuré.

Fort de cette constatation, un second protocole de traitement à « d_0 adapté » a permis de s'affranchir des caractéristiques physiques de la pupille en calculant un « d_0 » sur chacune des 21 images en niveau de gris moyen calculé sur les images IAPS correspondantes. Les résultats de cette seconde analyse se sont avérés significatifs. Comme pour les résultats obtenus par Bradley *et al.* (2008), nous avons observé une dilatation de la pupille plus importante pour les conditions désagréable et agréable que dans la condition neutre, montrant que la pupille pouvait être un indicateur de l'émotion suscitée par un ressenti. En complément, comme l'expérimentation sur le toucher, nous avons classé à l'aide d'une analyse en composantes principales les images par conditions émotionnelles à partir des enregistrements de la pupille. Les résultats obtenus avec le traitement à « d_0 adapté » sont encourageants, mais ces résultats restent à améliorer, car contrairement au « toucher », les images ne se classent pas de manière satisfaisante. Cette imprécision de mesure s'explique en partie par la complexité du système visuel.

Nos deux expérimentations ont ainsi confirmé qu'il était possible de mesurer la valeur émotionnelle d'un matériau, d'un objet, d'une image, ... à partir de notre modèle de mesures déclaratives inspiré du Model Circumplex de Russel (1980). Les tests déclaratifs ont montré une grande fiabilité et une très forte corrélation avec la norme IAPS dans le cas du visuel. Nos résultats relatifs à l'analyse des enregistrements de la pupille ont montré de plus que la pupille pouvait être un indicateur des réactions émotionnelles. Ceci ouvre une piste intéressante pour la mesure « objective » des émotions.

La réaction pupillaire traduit la réponse du système nerveux autonome, qui résulte de traitements inconscients échappant totalement au niveau de conscience de l'individu. Ceci nous incite à associer la réaction pupillaire à l'intensité de l'émotion primaire, l'arousal. Pour le moment, les informations relatives à la valence ne semblent pas être recueillies par la mesure pupillaire. Dans nos tests, cette information était apportée par les tests déclaratifs.

Un travail plus poussé sur ces deux notions serait sans doute pertinent. D'autre part, Crochemore (2004) s'est interrogé sur l'intermodalité dans le cadre de l'examen « tactile » et « visuel » de planches de bords dans l'automobile. L'intermodalité pourrait être un objectif de recherche qui permettrait de déterminer les stratégies « intermodales » adoptées par le cerveau dans les réactions émotionnelles.

Des études complémentaires devront enrichir ces résultats, avec par exemple l'utilisation des autres sens (ouïe, odorat, goût) et de panels plus larges. Par ailleurs, si nous adossons à notre protocole de mesure d'autres types d'équipements (eye tracking, logiciel de Face reading, ...), nous pourrions

affiner nos résultats et mieux étudier les données relatives à la valence émotionnelle. L'émotion est un phénomène multifactoriel déclenché par un événement, qui engendre une réponse émotionnelle : subjective, expressive et comportementale, physiologique. Dans la présente étude, nous avons uniquement étudié la réaction émotionnelle correspondant à l'évaluation interne de l'événement qui résulte de traitements inconscients et végétatifs responsables de la réponse émotionnelle (*valence*) et le niveau d'activation corporel (*arousal*). L'appréciation d'un produit ne générera pas uniquement des réactions internes comme celles observées dans nos tests, il entrainera également un jugement plus élaboré lors de traitements de haut niveau effectués dans le cortex cortical. Le résultat de ces deux voies de traitement produira un raisonnement qui sera déterminant dans l'acte d'achat car il déclenchera soit un processus d'évitement, soit un désir d'acquisition.

PARTIE II

LE PROCESSUS DE CONCEPTION

CHAPITRE 3

ATTENTES EMOTIONNELLES EN CONCEPTION

Depuis ses origines l'homme conçoit des outils, des objets. Les civilisations du monde ancien, qui démarrent à la Préhistoire pour s'achever à la fin du 17^{ème} siècle, ont toutes contribué à l'éclosion de la conception contemporaine. Les concepteurs de différentes époques ont avancé en se basant sur des échecs et succès, par itérations successives. Ils savaient innover, dessiner, écrire, calculer, analyser et possédaient déjà des connaissances sur la solidité, l'utilité et l'agrément permettant la réalisation de magnifiques ouvrages. D'ailleurs, au 1^{er} siècle avant J-C, l'architecte romain Vitruve (1480) décrivait dans son ouvrage « De architectura » la conception comme suit :

Dans tous ces différents travaux, on doit avoir égard à la solidité, à l'utilité, à l'agrément : à la solidité, en creusant les fondements jusqu'aux parties les plus fermes du terrain, et en choisissant avec soin et sans rien épargner, les meilleurs matériaux : à l'utilité, en disposant les lieux de manière qu'on puisse s'en servir aisément, sans embarras, et en distribuant chaque chose d'une manière convenable et commode : à l'agrément, en donnant à l'ouvrage une forme agréable et élégante qui flatte l'œil par la justesse et la beauté des proportions.

A partir du 18^{ème} siècle, les révolutions industrielles ont modifié la façon de concevoir, produire et utiliser. La première révolution industrielle a démarré avec l'invention et l'utilisation massive de la machine à vapeur comme énergie mécanique. Cette avancée technologique permettra d'augmenter considérablement la production et de diffuser de plus en plus de produits. Cette évolution industrielle a modifié l'organisation de la production qui demandait alors plus de main-d'œuvre, plus de matières premières, plus de charbon et un travail à un rythme soutenu. Plusieurs produits contemporains voient le jour durant cette période. Entre 1850 et 1940, l'Europe, les Etats-Unis et le Japon connaissent une importante croissance économique grâce au développement de l'électricité, des machines-outils, de l'utilisation du pétrole, de l'automobile, de l'aviation,... De nombreuses innovations ont permis d'importants gains de productivité et l'amélioration des modèles financiers et commerciaux. La naissance du « Design », qui donnera un sens esthétique et fonctionnel au produit, et qui favorisera les ventes, apparaît en 1840 avec les chaises de Michael Thonet, qui seront vendues en 50 millions d'exemplaires. Pour lutter contre une concurrence mondiale de plus en plus organisée, avec l'avancée constante des technologies et pour s'assurer de la maîtrise des coûts de production, les bureaux d'études, les industriels cherchent constamment à optimiser les processus de conception en améliorant l'efficacité de l'organisation et de la production.

Après la seconde guerre mondiale commence une phase de reconstruction. Les infrastructures, les bâtiments sont détruits et l'industrie qui était orientée vers l'effort de guerre doit être réorganisée. Fort de la croissance générée par cette réorganisation, les industriels chercheront à vendre de plus en plus de produits. Pour les industriels, il s'agit d'écouler une production toujours plus importante et de dégager toujours plus de bénéfice. Pour les consommateurs, il s'agit de profiter de produits nouveaux qui leur facilitent la vie. Les industriels ont recours à la publicité et au marketing et le

marché se développe, les produits proposés répondent de mieux en mieux aux attentes des consommateurs. Peu à peu, le consommateur prend plaisir à consommer et « faire les magasins » devient un loisir, un élément structurant des relations sociales dans lequel l'individu trouve un moyen de se différencier.

La société passe ainsi d'une société industrielle avec des achats durables et rationnels, à une société hédonique tournée vers le bien-être. L'homme profite de plus de loisirs, de moyens, d'avantages sociaux, se laissant plus de temps à la consommation de hobbies. Pour identifier les nouveaux besoins des consommateurs, les concepteurs pratiquent alors l'analyse fonctionnelle. Ce modèle souvent associé à l'Analyse de la Valeur a été développé aux Etats-Unis par Miles (1961). Cette méthode permet de comprendre si les attributs d'un produit correspondent aux attentes exprimées, à la satisfaction du consommateur, et de confectionner un produit au juste coût.

Les méthodes de conception se sont toujours adaptées à la société. Nous décrivons dans le présent chapitre cette évolution, et le rôle important joué par l'analyse sensorielle dans le développement de la conception anthropocentrée. Les méthodes de mesure associées à ce type de conception sont présentées et classées en fonction des méthodes de dépouillement utilisées.

1. Analyse sensorielle et conception anthropocentrée

La diffusion en masse de produits demande aux industriels de maîtriser la qualité, les fonctions, la logistique et l'acceptabilité des produits par les consommateurs. Dans les années 50, se développent dans l'armée des Etats-Unis les premières techniques d'analyse sensorielle qui visent à étudier les propriétés organoleptiques dans le but d'améliorer l'appétence des rations alimentaires (Peryam *et al.*, 1954). D'autres auteurs s'intéressent à établir une relation entre les aspects émotionnels d'un produit et le comportement du consommateur afin d'établir le processus de traitement de l'information dans l'acte d'achat (Johnson, 1989). Holbrook et Hischanman (1982a) soulignent l'importance d'étudier et de quantifier les besoins relatifs aux loisirs ludiques, plaisirs sensoriels, rêveries, plaisirs esthétiques et sensations émotionnelles.

La notion de plaisir dans la consommation est déjà bien connue des chercheurs en psychologie cognitive. Le plaisir s'explique par l'activation cérébrale du circuit de la récompense et l'action de la dopamine qui est engagée dans les comportements addictifs. Les publicités jouent d'ailleurs sur l'émotion avec l'utilisation de couleurs vives, présentant des personnages à la mode au visage souriant car ils savaient qu'un « message émotionnel » était mieux retenu et que « l'expression de la joie » favoriserait les ventes (Holbrook & Batra, 1987). Plus tard, sous l'influence des développements technologiques, électroniques, informatiques, les produits deviennent de plus en plus sophistiqués. Ces produits alors rendus trop complexes sont parfois incompris par le consommateur (Brocas, 1997).

L'amélioration des connaissances dans plusieurs disciplines permettent le passage d'une conception technocentrée à une conception anthropocentrée, qui consiste à intégrer les facteurs humains dans le processus de conception, afin de s'assurer de la satisfaction du consommateur. Pour faire leurs choix dans un marché saturé de produits, les consommateurs comparent les produits sur des critères de performance, de praticité, d'usage, d'ergonomie, d'esthétique, de fonctionnalité et d'économie.

La prise de décisions conjointes, la formation d'équipes multi-compétentes, et l'intégration d'utilisateurs dans le processus de conception, sont décrits par Plos *et al.* (2006) comme les fondements de cette approche.

La conception anthropocentrée fait intervenir dès la phase amont plusieurs disciplines « métiers ». Aoussat (1990) indique que la conception est une discipline horizontale dans laquelle la maîtrise des points de rencontre avec d'autres disciplines est indispensable. Ces disciplines sont appelées « disciplines carrefours », et sont représentées dans la Figure 3.1.

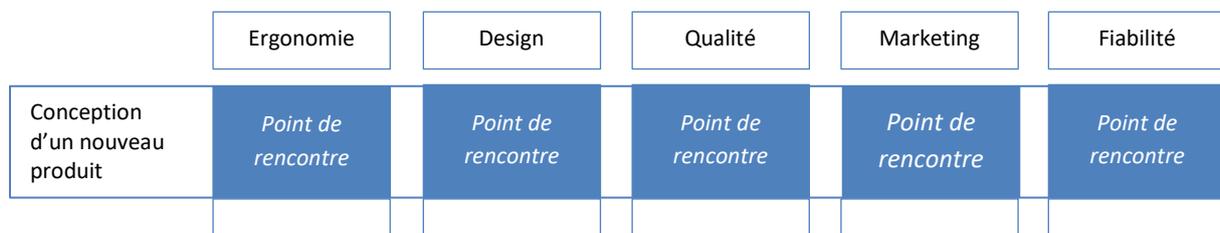


Figure 3.1 : Disciplines « métiers » et points de rencontre (Aoussat *et al.*, 2000)

Les avancées permises par l'intégration de disciplines carrefours dans le processus de conception sont nombreuses et permettent de mieux cerner le marché, les cibles, les fonctions indispensables, la diffusion, les contraintes, les goûts des consommateurs, les limites d'acceptabilité... Dans le même temps, les techniques d'analyse sensorielle se développent. La norme Afnor NF ISO 6658 (2017) d'analyse sensorielle propose un cadre d'expérimentation des ressentis sensoriels basé sur l'entraînement d'un panel. Ces méthodes, employées dans la recherche et développement, les organismes de contrôle, la qualité, le marketing, permettent de décrire les propriétés organoleptiques d'un produit, de déterminer si le consommateur perçoit une différence entre différentes formulations, d'établir les plages d'acceptabilité, les préférences. Ces méthodes apportent une meilleure connaissance du produit et permettent la mesure de l'attractivité du produit.

Ces avancées s'accompagnent de la naissance du design sensoriel. Bassereau *et al.* (2009) proposent les premières recommandations relatives au design sensoriel :

- Etablir un diagnostic sensoriel qui qualifiera la nature et l'intensité des perceptions ressenties lors de l'expérimentation ;
- Identifier les voies d'amélioration, l'impact des perceptions sur le ressenti de manière à les hiérarchiser ;
- Définir les limites d'acceptabilité, l'aversion produite par ces perceptions ;
- Réaliser la correction des biais perceptifs et générer des propositions de design.

L'expression de la qualité perçue est cependant parfois difficile à obtenir. L'appréciation des caractéristiques d'un objet est subjective et varie d'un individu à l'autre. Le besoin d'objectiver les ressentis, de construire une démarche globale mènera les concepteurs à envisager la conception sensorielle, comme une discipline multidimensionnelle qui offrira des outils permettant la maîtrise de la « sensorialité exprimée » d'un produit. Cette sensorialité repose sur de nombreux critères comme la forme, la couleur, l'aspect, le poids, les matériaux, la valeur d'estime (Pensé-Lhéritier, 2014).

L'adoption de ces différents supports méthodologiques a permis aux entreprises de concevoir des produits fiables, robustes, fonctionnels, design, sans cesse plus attractifs. Mais au XXI^{ème} siècle, les entreprises doivent continuellement évoluer, innover pour exister. Depuis les années 1990, plusieurs pays développés enregistrent d'ailleurs un important déclin industriel. L'ergonomie, le design, la sensorialité, l'image de marque, la valeur iconique sont devenus des valeurs « clés » du succès d'un produit, grâce aux apports des « disciplines carrefours », résultant de l'apparition d'une démarche de conception anthropocentrée.

1.1 Recueil du besoin émotionnel

Les consommateurs habitués à consommer de plus en plus de produits éprouvent une certaine lassitude qui oblige les industriels à réveiller le désir du consommateur en jouant sur les valeurs perçues et les valeurs émotionnelles du produit. En 1990, l'acceptabilité du consommateur repose sur deux modèles : la recherche de productivité (*performance, efficacité, facilité d'utilisation*), et la recherche orientée « plaisirs » (*recherche de divertissements, de jouabilité du « produit », augmentation du niveau de vie*). La maîtrise de ces composantes nécessite de recueillir les besoins, les impressions, les ressentis, d'évaluer les appréciations hédoniques et d'évaluer la satisfaction fonctionnelle afin de prédire son comportement (*ou attitude du consommateur*).

De nombreux auteurs s'entendent pour dire que la conception d'un bon produit repose sur la détermination du besoin, l'identification des fonctions, et la réalisation de solutions. Dans la norme Afnor NFX 50 150 (1990), on trouve la définition suivante du besoin : « *Le besoin est une nécessité ou un désir éprouvé par l'utilisateur, et non le volume du marché. Un besoin peut être explicite ou implicite, avoué ou inavoué, latent ou potentiel. Dans tous les cas, il constitue le besoin à satisfaire pour lequel un utilisateur est prêt à faire un effort.* »

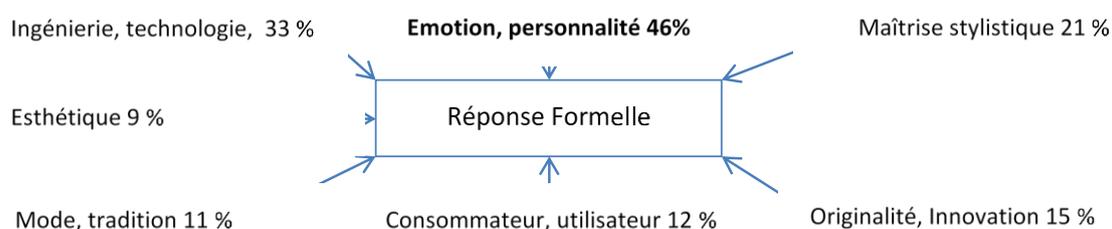


Figure 3.2 : Modalité de la réponse formelle des designers (Bouchard, 1997)

On distingue les besoins objectifs et les besoins subjectifs. Les besoins objectifs correspondent aux performances, aux caractéristiques, à l'ergonomie, à la sécurité, à la disponibilité, à la durabilité, à la maintenabilité, à l'encombrement, au poids. Les besoins subjectifs correspondent à l'image de marque, à la mode, au style de vie, au confort, à l'esthétique, à l'originalité, à l'élégance, à la rareté. Les besoins subjectifs sont également connus sous l'appellation de besoin d'estime, qui appelle à la notion de « valeur d'estime », c'est à dire un besoin qui suscite l'intérêt, le respect, la considération, l'approbation du consommateur. Bouchard (1997) établit la « part de l'émotion » dans l'attractivité d'une formulation esthétique (*dessin, esquisse, rough, maquette, ...*) réalisée par un designer. Cette part est décrite dans la Figure 3.2, et estimée dans ses travaux à 46%. Ces constatations poussent différents auteurs à s'interroger sur l'impact émotionnel d'un produit. L'incidence de la forme sur l'impact émotionnel a été étudiée par Chang et Wu (2007). Selon Tractinsky *et al.* (2000), un produit

« esthétique » semble mieux fonctionner que le même produit avec une « esthétique moins plaisante ». Pour établir cela, ils testent la relation entre esthétique et fonctionnalité en évaluant « l'expérience émotionnelle des utilisateurs » à travers l'utilisation d'un guichet automatique. Les mesures effectuées dans l'étude montrent de fortes corrélations entre l'esthétique et l'appréciation fonctionnelle d'un guichet automatique. Norman (2013) établit le même constat en disant que « Les belles choses fonctionnent mieux ».

En analysant l'attitude du consommateur face à un nouveau produit, Rosenberg *et al.* (1960) ont montré que le comportement du consommateur répond à 3 composantes :

- La **composante cognitive**, qui correspond à l'idée que le consommateur se fait du produit ; que l'on résumera en « je pense que ... », « je sais que ... » ou « je crois que ... ».
- La **composante affective**, qui correspond au sentiment favorable ou défavorable qu'éprouve le consommateur à l'égard du produit ; que l'on résumera en « j'aime » ou « je n'aime pas ».
- La **composante conative** qui correspond au comportement du consommateur, à son intention d'achat ; que l'on résumera en « j'achète » ou « je n'achète pas » ce produit.

Maslow (1943) a établi les hiérarchies des besoins de l'homme décrits dans la Figure 3.3 sous la forme d'une pyramide bien connue. Sa pyramide est constituée de cinq besoins. De bas en haut, on trouve : Les besoins physiologiques (*satiété, santé*), le besoin de sécurité (*abri, protection*), le besoin d'appartenance et d'affection (*amitié et amour*), le besoin d'estime (*reconnaissance, statut*), le besoin d'accomplissement de soi (*identité, personnalité*). Une grande partie de ces besoins est satisfaite dans notre société moderne, avec pour chaque individu des motifs d'insatisfaction qui le motivent pour améliorer sa condition de vie.

Jordan (2002) propose une version de la pyramide de Maslow qui traduit les besoins du consommateur vis-à-vis d'un produit industriel. Ce modèle s'établit sur 3 niveaux décrits dans la Figure 3.3 :

- La fonctionnalité : Un produit doit remplir ses fonctions, au risque d'être inutilisable,
- La facilité d'usage : Un produit doit être facile à utiliser, ergonomique et facile d'accès,
- Le plaisir : Un produit doit être plaisant, à la vue, au toucher, à l'écoute, à l'usage, ...

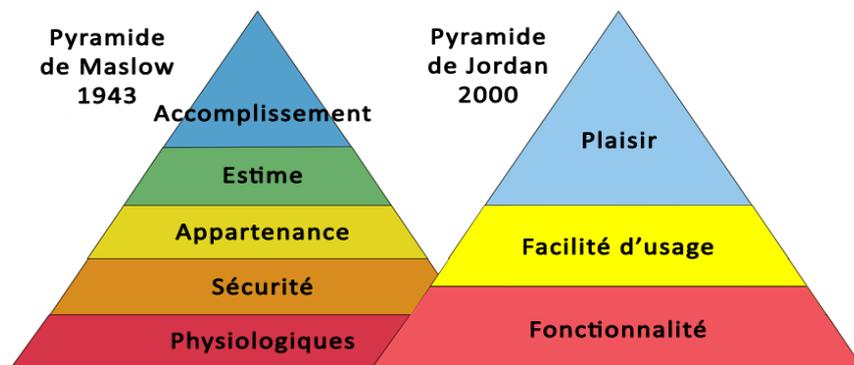


Figure 3.3 : Pyramide de Maslow (Maslow, 1943) et modèle de Jordan modifié (Jordan, 2002)

1.2 Analyse du comportement émotionnel du consommateur

Dans une société où les critères d'apparence comptent autant que les critères fonctionnels, le design, le choix des matériaux, l'esthétique du produit s'avèrent déterminants dans l'appréciation émotionnelle du consommateur. 93 % des consommateurs considèrent en 2019 que l'apparence visuelle est un élément clé de la décision d'achat. L'industrie automobile a bien compris l'importance du design et de la « sensorialité produit » dans la motivation d'achat.

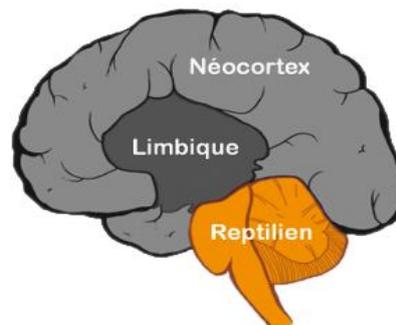


Figure 3.4 – Les trois cerveaux apparus au cours de l'évolution de l'homme, selon MacLean (1949, 1973)

Dans son livre intitulé "Emotional Design", Donald A. Norman (2004) s'est interrogé sur la relation affective qu'il entretenait avec sa collection de théières qui exprimait des inspirations différentes. Ses observations lui ont permis d'établir un lien entre notre attachement émotionnel aux objets et la théorie du cerveau triunique de MacLean (1949, 1973), qui pensait que le cerveau avait connu trois importantes évolutions qui l'avaient amené à avoir 3 modes de fonctionnement (Figure 3.4) :

- Le cerveau reptilien (*Reptilian*), qui assure les fonctions vitales de l'organisme, de la coordination des mouvements, de l'instinct de survie et de conservation. Nous partageons ce cerveau avec les reptiles ;
- Le système limbique (*Paleomammalian*), cerveau des émotions et de la mémoire à long terme, qui serait apparu avec les premiers mammifères ;
- Le néocortex (*Neomammalian*), cerveau du raisonnement, de la logique, des perceptions sensorielles, des commandes motrices volontaires, de la conscience et du langage, qui est le plus récent.

Cette analyse est aujourd'hui jugée trop simpliste. Nous présentons dans le chapitre suivant une analyse plus poussée sur ce sujet. Néanmoins, Norman (2004) pense que la relation affective entretenue avec un objet s'établit à trois niveaux associés à ces cerveaux : Le niveau viscéral (*qui correspond au cerveau reptilien*), le niveau comportemental (*qui correspond au cerveau limbique*), et le niveau réflexif (*qui correspond au néocortex*). Chaque niveau intervient dans le façonnement de l'expérience et l'appréciation du design :

- Au niveau viscéral, notre cerveau jugera de la dangerosité, de la beauté, de la désirabilité de l'objet et informera sur l'intensité du ressenti ;
- Au niveau comportemental, notre cerveau évaluera les fonctions, la facilité d'utilisation, l'efficacité, les sensations physiques et informera sur la valence du ressenti ;
- Au niveau réflexif, notre cerveau formulera un raisonnement basé sur les croyances, les connaissances, l'expérience de l'individu et jugera de l'utilité et du niveau de satisfaction.

L'intérêt de ces travaux est de montrer que l'appréciation mentale d'un produit est complexe, touche plusieurs zones du cerveau, et que les sources pouvant engendrer du « plaisir » sont nombreuses.

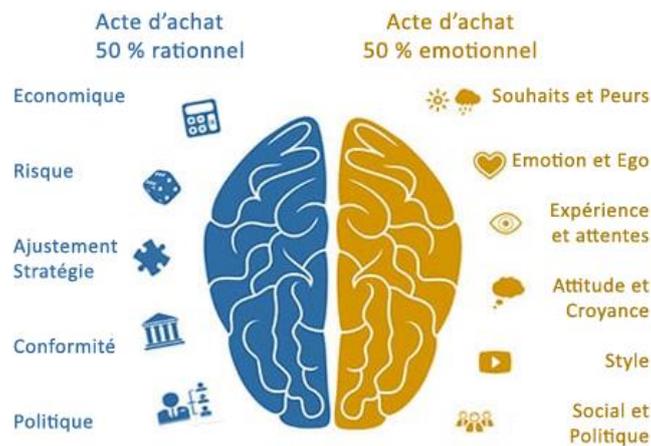


Figure 3.5 – Répartition des effets rationnels et émotionnels dans l'acte d'achat, selon Walter, A. (2011)

Pour favoriser les ventes, les industriels pratiquent donc le marketing sensoriel, qui a pour objectif de toucher l'affect afin de retenir l'attention du consommateur, de créer une identité propre qui permettra de se différencier des concurrents. Le marketing émotionnel regroupe l'ensemble des usages marketing, et vise à tirer parti des émotions ressenties par les consommateurs (Roederer, 2012). Gobé (2001) et Walter (2011) montrent en effet que l'acte d'achat est aujourd'hui réalisé sur des critères 50 % rationnels et 50 % émotionnels. Ceci est illustré dans la Figure 3.5. Dans son ouvrage « le Gouvernement des émotions », le philosophe Le Cozet (2015) confirme le changement de notre société vers une société émotionnelle.

Ce changement serait dû à l'augmentation massive de la présence des médias (*apparition d'internet en 1990, des réseaux sociaux en 2000, des smartphones en 2011*) et à l'impact des leaders d'opinions sur notre société. Les supports numériques sollicitent en permanence le consommateur et créent une addiction émotionnelle. Ce type de contenus multimédias engendre un effet « yo-yo affectif » et durant ces dernières années, le consommateur semble avoir adopté un comportement binaire, passant successivement de la joie à la colère. Dans le même temps, les marques se sont également emparées des réseaux sociaux et les utilisent pour créer une relation « intimiste » avec les internautes, pour segmenter leur clientèle, mieux communiquer, fidéliser leurs clients, créer des événements pour générer des visionnages, se faire remarquer. Les consommateurs se sont également organisés et, depuis l'apparition des réseaux sociaux, ils n'hésitent plus à dénoncer. Dans ce contexte de gouvernance des émotions, les entreprises n'ont plus le droit à l'erreur.

Pour mieux comprendre le comportement émotionnel du consommateur, les industriels ont essayé d'identifier les traitements cognitifs et émotionnels se rapportant à l'acte d'achat. La majorité des études qui traitent du sujet se concentre sur l'acte de « shopping », c'est-à-dire ce qui va amener les consommateurs à acheter le produit ; ce que nous appellerons le processus décisionnel. L'analyse de l'attitude du consommateur porte sur l'examen de l'offre commerciale dans son ensemble, comprenant le type de biens, ses caractéristiques, sa durée d'utilisation, ses fonctions, ...

L'attitude du consommateur est très difficile à maîtriser. Elle concerne aussi bien la manière avec laquelle il va choisir les produits, le type de caractéristiques qu'il recherche, le vecteur commercial par lequel il souhaite être approché, le type de configuration produit qu'il souhaite pouvoir comparer et l'usage qu'il compte faire du produit. Pour Cally (2011), « vendre c'est avant tout convaincre un individu d'acheter ». Des chercheurs ont montré que les motivations à aller faire du « shopping » se

décomposent en deux facteurs : *la motivation utilitaire et la motivation hédonique* (Badin et al., 1994 ; Kim, 2006) :

- La **motivation utilitaire** se décompose en deux dimensions, l'efficacité et la réalisation. L'efficacité correspond au besoin du consommateur de gagner du temps, d'économiser ses ressources et la réalisation correspond à une planification des achats orientés sur les objectifs.
- La **motivation hédonique** correspond aux aspects hédoniques du shopping qui ont été documentés et présentés comme étant : une excitation, une joie, une fête, une évasion, de la fantaisie, une aventure...

Nous savons également que si le consommateur se sent bien il aura une tendance à l'approche, si le consommateur éprouve une gêne il aura tendance à l'évitement (Donovan & Rossiter, 1982). Son comportement est donc bien dicté par des ressentis émotionnels. L'atmosphère des magasins est de nature à influencer l'affect du consommateur. L'expérience sensorielle, l'ambiance, l'animation visuelle, tactile, olfactive, sonore, gustative du magasin sont conçues pour toucher le consommateur (Kotler, 1973 ; Spence et al., 2014). Les produits sont également de plus en plus étudiés pour plaire aux consommateurs sur des caractéristiques sensorielles et émotionnelles (Neff, 2000 ; Spinney, 2013). Une partie des jugements émotionnels des consommateurs provient de la valeur perçue et de la qualité perçue :

- La valeur perçue est une estimation subjective qui permettra de fixer le prix psychologique d'un objet. Cette valeur repose sur l'évaluation des perceptions du produit par les consommateurs, réalisée en marketing à l'aide d'études qualitatives et quantitatives. La valeur perçue intègre plusieurs dimensions relatives à l'usage, à la valeur d'échange, aux qualités intrinsèques du produit, à l'estimation de critères plus subjectifs comme l'image de marque... La valeur perçue prend en compte la mesure de la notoriété, de l'image de marque, de la qualité perçue et de la satisfaction. La mesure de la notoriété correspond au degré de connaissance de la marque par le consommateur. L'image de marque correspond à la représentation que le consommateur se fait de la marque en se basant sur des critères objectifs (*performances techniques, fiabilité, robustesse, ...*) et des critères subjectifs (*valeurs sociétales, sentiment de modernité, écoresponsabilité*).
- La qualité perçue est une évaluation portant sur les attributs sensoriels d'un produit (*aspect, texture, forme, matières, couleurs, appréciations visuelle, tactile, olfactive, auditive, gustative d'un produit*). La qualité de service est définie comme un jugement global ou une attitude portant sur la supériorité d'un produit ou d'un service (Parasuraman et al., 1988). La qualité perçue correspond à l'écart entre les attentes et la performance. Si la qualité dépasse les attentes, la qualité perçue est élevée, inversement si la qualité est en dessous des attentes, la qualité perçue sera faible. L'appréciation de la qualité perçue constitue une part importante de la décision d'achat. Cette appréciation est subjective car elle variera en fonction de l'expérience de vie de chaque utilisateur.

1.3 L'expérience client : satisfaction et plaisir

L'expérience client est la somme de toutes les émotions ressenties par le client dans l'usage de son produit ; de sa découverte à sa fin de vie. L'usage d'un produit suscite de nombreuses émotions au cours de sa sélection : durant les formalités menant à son acquisition, au cours de son règlement, au

cours de son utilisation, lors d'un prêt, lors de son remplacement, ... L'homme s'attache à un bon produit. Cet attachement émotionnel est de nature à le satisfaire, à le fidéliser, ... Lors d'un salon automobile, l'accès et la découverte d'un véhicule en particulier vous aura marqué plus que les autres véhicules. Cet événement aura probablement provoqué chez vous un effet « Waouh », soit une réaction émotionnelle intense. Cette expérience enthousiaste va initier un désir, qui pourrait déboucher sur une acquisition. Pour susciter ce « Wow effect », les entreprises doivent construire une « expérience client enthousiasmante ». La construction de cette expérience client repose sur plusieurs actes de conception :

- La mise en place d'une direction de projet, en créant une équipe projet pluridisciplinaire réunissant des experts en marketing, qualité, design, innovation, ingénierie ;
- L'identification, grâce à des enquêtes consommateurs, du client type « persona ». Il s'agit de définir la personnalité, les habitudes, l'environnement, les opinions, les critères d'achat de ce client type ;
- L'émergence des « clés de l'enchantement du client » et l'identification des « irritants du client », c'est-à-dire des composantes qui pourraient créer des émotions positives, négatives, des motifs de satisfaction ou d'insatisfaction chez le futur client.

Les entreprises savent que les aversions, les émotions négatives sont des freins à la décision d'achat et pour s'assurer que le client ne rencontrera que des émotions positives au cours de l'acte d'achat, les entreprises doivent sécuriser le parcours client. L'impact de l'expérience client sur le marché a été modélisé par Pine *et al.* (1999). Cette modélisation est représentée dans la Figure 3.6.

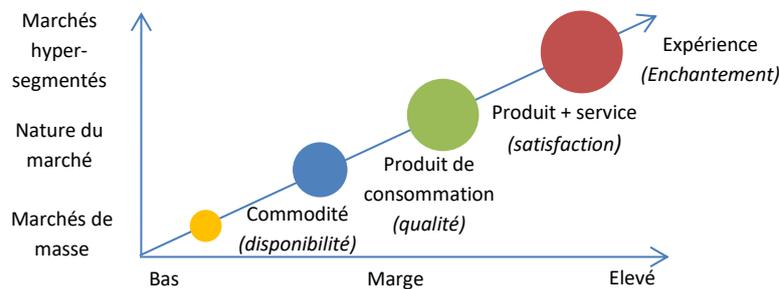


Figure 3.6 – Modélisation de l'impact de l'expérience client sur le marché (Pine *et al.*, 1999).

Une approche commerciale basée sur « l'expérience client » va modifier l'état émotionnel du client qui se laissera plus volontiers porter par ses émotions. Le client qui vivra une expérience émotionnelle plaisante tirera plus de bénéfices de sa démarche prospective et l'incidence des freins qu'il aurait pu identifier vont s'amoinrir. Satisfait de son expérience, il partagera les bienfaits de son expérience auprès d'autres consommateurs.

L'approfondissement des techniques de l'expérience client a permis à Boby et Tallec (2015) d'enrichir la pyramide de « l'expérience client » proposée par Jordan (2002). La pyramide de « l'expérience client » est décrite dans la Figure 3.7.

On pourrait définir la satisfaction comme étant un « état affectif fait de plaisir et de soulagement, éprouvé par celui qui a obtenu ce qu'il souhaitait », mais le fait que la satisfaction soit rattachée à l'émotion fait débat. Pour certains chercheurs la satisfaction est un processus cognitif distinct de l'émotion. Howard et Sheth (1968) donnent à la satisfaction, la définition suivante « l'état cognitif de l'acheteur étant adéquatement ou non récompensé pour les sacrifices consentis » ; Oliver (1993)

décrit la satisfaction comme étant « une évaluation de la “surprise” inhérente à l’acquisition d’un produit et/ou à une expérience de consommation ». Et pour d’autres chercheurs la satisfaction est purement émotionnelle. Bagozzi *et al.* (1999) pensent que « la satisfaction est une émotion comme les autres » ; Westbrook et Reilly (1983) pensent que « la satisfaction est une réaction émotionnelle » ; selon Westbrook et Oliver (1991), « les émotions ressenties à l’usage d’un produit laissent des traces affectives dans la mémoire épisodique, notamment la valence associée à l’événement ».

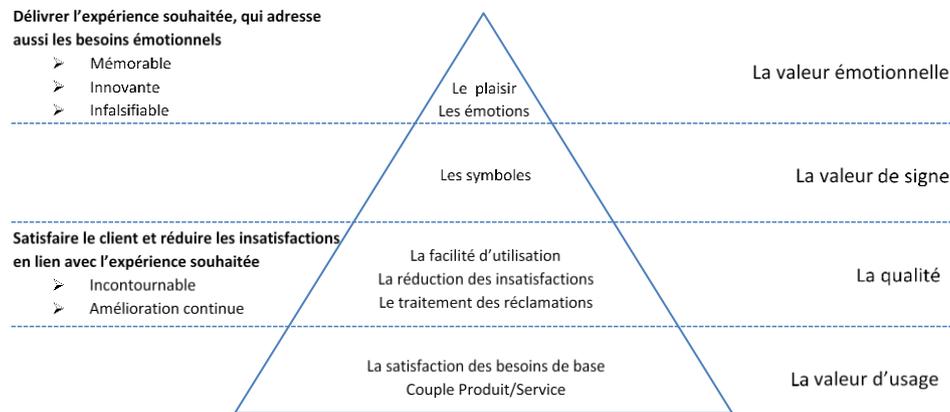


Figure 3.7 – Pyramide de l’expérience client (Boby et Tallec, 2015)

Les chercheurs considèrent aujourd’hui que la satisfaction intègre des processus à la fois cognitifs et émotionnels, et résulte de la comparaison entre performance et attente. L’analyse de la performance et de l’attente donnera naissance à une appréciation subjective, émotionnelle fondée sur deux dimensions : le jugement utilitaire et la valeur hédonique (Mano & Oliver, 1993). En 2017, l’organisme de sondage Ipsos Loyalty a réalisé une étude sur l’attachement émotionnel utilisé comme levier pour créer des relations clients durables. Leurs résultats sont illustrés dans la Figure 3.8 (Sant, 2017). Ils montrent qu’il est essentiel de répondre aux attentes de la dimension fonctionnelle pour développer un engagement émotionnel et que créer une relation émotionnelle semble éliminer l’insatisfaction. D’après cette étude, les leviers de l’engagement émotionnel ne sont pas les mêmes que les leviers de l’engagement fonctionnel. Le moyen proposé pour créer un lien émotionnel consiste à créer des interactions personnelles entre le client et l’entreprise.

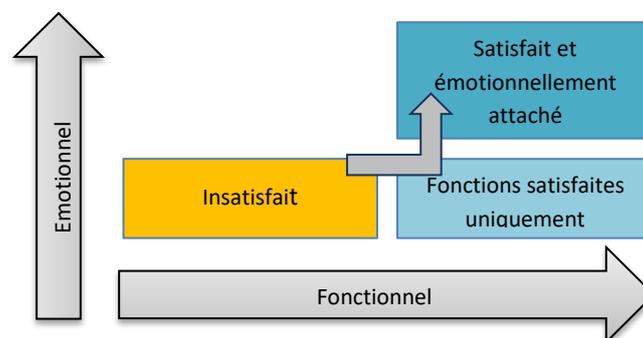


Figure 3.8 – Structure émotionnelle/fonctionnelle (Sant, 2017)

Pour engendrer la satisfaction « émotionnelle », il est donc nécessaire d’avoir déjà satisfait les besoins fonctionnels. Dans notre approche relative à l’étude du rôle de l’émotion dans la conception sensorielle, nous partons de l’hypothèse que la dimension fonctionnelle est satisfaite. Les stimuli émotionnels d’un produit sont très nombreux. La forme, la couleur, le son, la texture, la brillance, la

rugosité, la douceur, le poids, l'image de marque, l'identité du produit ... sont autant de facteurs qu'il faudra maîtriser pour s'assurer de l'engagement émotionnel du consommateur. L'appréciation de ces composantes matérielles et immatérielles doit être plaisante pour retenir l'attention du consommateur.

Une étude sur le comportement a mis à jour la **loi de l'effet** qui stipule que toute action qui amène une situation plaisante tend à être répétée dans le futur (Thorndike, 1911). Ce mécanisme cognitif est basé sur un système de récompense. Pavlov (1941) fut le premier à étudier l'impact de ce système en équipant son chien d'un récolteur de salive et en sonnant une cloche à chaque fois qu'il lui donnait de la nourriture. Un jour, il sonna sa cloche sans lui donner de nourriture et constata que le chien salivait. Pour l'animal, le son de la cloche était associé à la récompense, la nourriture apportée par son maître.

Plus tard, Skinner (1963) a conditionné le comportement des rats en utilisant une boîte équipée d'un levier automatique qui distribuait de la nourriture lorsque l'animal l'actionnait. Le rat avait vite compris qu'actionner le levier libérait la nourriture. Mais ce fut l'expérience de Olds et Milner (1954) qui a vraiment permis de découvrir l'existence d'un centre du plaisir chez l'homme. Dans cette expérience, des rats étaient équipés d'électrodes implantées dans différentes zones du cerveau. L'objet de la recherche consistait à conditionner les rats à éviter une zone d'un enclos en sollicitant une zone cérébrale impliquée dans la vigilance, située à l'arrière de l'hypothalamus. Les observations ont montré qu'il y avait 3 groupes de rats : ceux qui étaient effrayés par le levier et l'évitaient, ceux qui n'ont pas eu de réactions spécifiques et un rat nommé « Jack » qui actionnait constamment le levier. Croyant que ce rat était moins sensible aux sollicitations, les chercheurs ont augmenté la puissance du choc électrique et ont constaté que plus le choc était intense, plus le rat se précipitait vers cette zone. Lors de la dissection du rat, ils ont constaté que l'électrode était implantée par erreur à côté de l'endroit où l'électrode aurait dû se trouver provoquant ainsi une réaction inattendue de « plaisir ».

Plus tard, Milner (1991) implanta des électrodes dans l'aire septale et constata que les rats appuyaient sur le levier en moyenne 200 fois par heure, ne dormaient presque plus, et abandonnaient leur progéniture. Ces expériences ont montré que certaines zones de notre cerveau sont dédiées au « plaisir ». Le rôle du circuit de la récompense est de « récompenser » l'exécution de fonctions vitales comme manger, boire, se reproduire, par une sensation agréable ou de plaisir. Il fournit la motivation nécessaire à la réalisation d'actions ou de comportements adaptés. Le comportement du consommateur sur un point de vente serait donc guidé par un mécanisme de l'organisme qui nous incite à trouver d'éventuelles « récompenses ». **Le cerveau humain élabore naturellement des stratégies menant au « plaisir » ou évitant « les contraintes désagréables ».**

Le circuit de la récompense est constitué de 3 composantes :

- Une composante affective correspondant au plaisir provoqué par les récompenses ou au déplaisir provoqué par les punitions ;
- Une composante motivationnelle correspondant à la motivation à obtenir la récompense ou à éviter la punition ;
- Une composante cognitive correspondant aux apprentissages réalisés par conditionnement.

Le plaisir est traduit par des émotions positives. La sensation de plaisir disparaît dès qu'apparaissent des émotions négatives, la peur, l'anxiété ou la tristesse. Fredrickson (2001) cite les émotions positives suivantes : *la joie, l'espoir, la reconnaissance, la gratitude, l'admiration, l'inspiration, l'amour, l'amusement, l'orgueil, la fierté, l'intérêt, la curiosité, la sérénité*. Les émotions positives influent sur nos comportements en nous rendant plus flexible (Isen & Daubman, 1984), plus créatif (Isen et al., 1987), plus à l'écoute (Estrada et al., 1997), plus efficace (Isen et al., 1991), prêt à effectuer des changements (Kahn & Isen, 1993), plus social (Cacioppo et al., 1999), plus attentif (Derryberry & Tucker, 1994), plus actif (Carver & Scheier, 1990) et bien sûr plus satisfait (Liljander & Strandvik 1997). S'il ressent des émotions positives, le consommateur sera plus ouvert, plus à l'écoute, plus disposé à faire de nouvelles expériences.

Tiger (1992) propose un modèle qui permet de caractériser le plaisir du consommateur. D'après lui, le consommateur éprouve quatre types de plaisir envers un produit :

- Le plaisir physiologique, qui correspond au plaisir que ressent le consommateur en réponse à un stimulus agréable (*une odeur de cuir agréable, un volant confortable, un visuel attractif*). Il s'agit d'un plaisir direct, purement physique provenant des organes impliqués dans les sens qui ne nécessitent pas d'interprétation cognitive.
- Le plaisir sociologique, qui correspond à la dimension sociale du produit, c'est-à-dire ses attributs statutaires. Si le stimulus est valorisant et conforme à sa vision, le consommateur éprouvera de la fierté.
- Le plaisir psychologique, qui correspond aux réactions cognitives et émotionnelles du consommateur. Ce plaisir psychologique s'évalue par une balance entre effort à fournir pour manipuler l'objet et plaisir qu'il éprouvera à le manipuler.
- Le plaisir idéologique, qui correspond aux valeurs sociétales que véhicule l'objet, c'est-à-dire tout ce qui touche aux croyances, jugements, valeurs qu'attribuera le consommateur au produit. Le plaisir idéologique implique la composante cognitive et la composante émotionnelle.

Les sources de plaisir relatives au produit sont nombreuses. La joie d'avoir réussi l'acquisition « du produit », la joie d'avoir trouvé un produit qui correspond aux caractéristiques préalablement définies, la joie d'utiliser un produit au quotidien qui satisfait les attentes, ...

Les émotions négatives ont pour effet de détourner le consommateur, d'affecter l'écoute, la patience du consommateur. L'implication du consommateur en sera également affectée (Baker & Cameron, 1996). Bassereau (1995) propose de s'assurer de l'acceptabilité du consommateur en identifiant les Bugs perceptifs qui apparaissent dans l'utilisation de l'objet. Un bug perceptif est une « aversion, une émotion négative » envers une ou des composante(s), une ou des fonction(s) d'un produit. Identifier les émotions négatives que génère un produit permettra de corriger et d'augmenter l'acceptabilité du produit par le consommateur.

Ces différentes études montrent l'intérêt de mieux maîtriser la ou les composante(s) émotionnelle(s) d'un produit pour s'assurer des ressentis positifs que procurent la vue, le toucher, l'usage, ... du produit. Mais ces ressentis positifs sont fondés sur une appréciation globale des caractéristiques d'un produit.

2. Méthodes d'évaluation de la valeur hédonique

Ainsi, pour être accepté et désirable, un produit doit être utile, satisfaire la dimension fonctionnelle, offrir la meilleure qualité perçue possible et générer le maximum d'émotions positives. Si on se place dans le champ de l'ingénierie qui consiste à étudier un produit sous tous ces aspects, il est nécessaire de mettre en place des techniques qui permettront de maîtriser la « valeur perçue », c'est-à-dire l'appréciation du produit. L'appréciation du consommateur est fondée sur l'examen de deux caractéristiques du produit : la valeur utilitaire et la valeur hédonique. Nous proposons ci-après dans la Figure 3.9, les composantes de la valeur perçue qui sont prises en compte par un consommateur dans sa décision d'achat. Cette représentation est inspirée des travaux de MacInnis et Jaworski qui ont identifié en 1989, les « besoins utilitaires » et les « besoins expressifs » d'un produit.

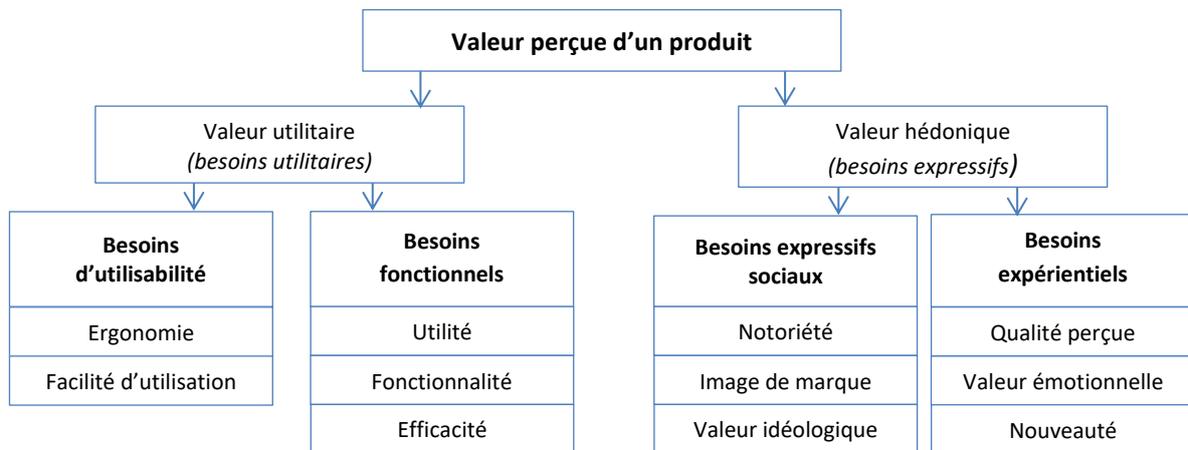


Figure 3.9 – Composantes de la valeur perçue d'un produit

La définition des « besoins d'utilisabilité » et des « besoins fonctionnels » est bien maîtrisée en ingénierie ; les concepteurs établissent généralement les besoins d'utilisabilité et fonctionnels en accord avec la norme Afnor NF X50 – 100 (2011) qui décrit les méthodes d'**Analyse Fonctionnelle du Besoin (AFB)** permettant la prise en compte des besoins, des attentes des utilisateurs, l'étude des fonctions de service (*fonctions d'usage et fonctions d'estime*) ainsi que les contraintes et les méthodes d'**Analyse Fonctionnelle Technique (AFT)** permettant l'étude des fonctions techniques. La définition des « besoins expressifs sociaux » est également bien maîtrisée en marketing. Cette valeur est estimée à partir d'études quantitatives et qualitatives décrites dans la norme Afnor NF ISO 20252 (2012a). La définition des « besoins expérientiels » est en partie maîtrisée. La définition de la qualité est bien maîtrisée par la norme Afnor NF EN ISO 9001 (2015) et la norme Afnor NF ISO 9186-2 (2008) propose les contours de la qualité perçue de symboles graphiques et pictogrammes. La pratique de l'analyse sensorielle est également réglementée par la norme Afnor NF ISO 6658 (2017). En revanche la définition de la valeur émotionnelle d'un produit n'est à ce jour pas réglementée. **Ce manque de cadre normatif montre que l'estimation de la valeur émotionnelle et de la nouveauté d'un produit reste à déterminer.** Bien sûr certaines entreprises ont déjà mis en place des protocoles permettant d'estimer la valeur émotionnelle de leurs produits, mais ces méthodes restent confidentielles car c'est un secret que gardent jalousement les entreprises. Dans le paragraphe ci-après, nous présenterons les rares méthodes qui permettent d'estimer la valeur émotionnelle d'un produit. Dans l'introduction de ce document, nous avons distingué les axes « Sensations » et « Emotions » dans l'estimation de la valeur perçue d'un produit. L'axe « Sensations » concerne la caractérisation

de la « sensorialité produit » à l'aide d'instruments de mesure ou de l'utilisation d'un panel entraîné. Il s'agit de lister et d'évaluer les attributs sensoriels d'un produit, soit par libre choix, soit par consensus :

- L'évaluation sensorielle par libre choix est une approche dans laquelle tous les sujets d'un panel sont libres de choisir les descripteurs et les échelles qui décrivent les propriétés sensorielles d'un ou de plusieurs échantillons. Cette méthode est décrite dans la norme Afnor ISO – 13299 (2016) d'analyse sensorielle. L'intérêt de cette méthode est de recenser les attributs perceptifs du point de vue du consommateur. Cette méthode sert à l'établissement des descripteurs qui s'effectue en amont d'une analyse sensorielle supervisée. Le profil sensoriel par libre choix est constitué par une sélection de descripteurs et par la valeur d'intensité du stimulus correspondant. Le profil sensoriel par libre choix est représenté à l'aide d'un diagramme de Kiviat. Les épreuves de profil sensoriel par libre choix entraînent la collecte de nombreux descripteurs et échelles de cotation qu'il faudra réduire et harmoniser. En analyse sensorielle, cet espace sémantique est réduit en suivant les recommandations relatives au « Profil sensoriel par consensus ».
- Le profil sensoriel par consensus résulte de séances de discussions organisées avec le panel. Les descripteurs sont réduits et améliorés par obtention d'un consensus du groupe.

L'axe « Emotions » concerne « l'étude de l'impact de la sensorialité produit sur le consommateur » à l'aide d'instruments de mesure ou de l'utilisation d'un panel entraîné. Il s'agit d'évaluer les ressentis émotionnels qu'un produit procure.

2.1 Méthodes non-supervisées

L'emploi de méthodes non-supervisées permet de prendre connaissance des ressentis relatifs à l'estimation des propriétés organoleptiques et des caractéristiques physico-chimiques et émotionnelles d'un produit sans avoir d'a priori, c'est-à-dire sans induire de biais dans l'expression des émotions qui pourraient être dûs à un mauvais choix de descripteurs, à une mauvaise définition lexicale de l'environnement émotionnel d'un produit.

L'emploi de ces méthodes suppose que l'analyse des résultats s'effectue a posteriori sans avoir d'attentes particulières sur les résultats obtenus. Ces méthodes sont souvent employées pour segmenter, partitionner des données ou pour recueillir et constituer un espace sémantique adapté aux objectifs de l'étude. Plusieurs méthodes existent, nous en présentons ci-après une liste non exhaustive et plus particulièrement les méthodes qui sont les plus utilisées dans le domaine des sciences affectives et du sensoriel.

La méthode la plus utilisée est « Expérience Maps » également connue sous l'appellation « Customer & User Journey Map (CJM) » qui a été développée par Shostack (1977). Elle s'inscrit dans les méthodes non-supervisées car elle permet de recueillir les ressentis éprouvés par les consommateurs après expérimentation d'un produit. Comme le montre la Figure 3.10, la méthode permet au concepteur de situer, pour chaque étape, l'émotion sur une échelle d'intensité, de prendre connaissance de la satisfaction du consommateur et de déterminer les points d'amélioration, en décomposant chaque étape : avant, pendant, après l'usage (Kalbach, 2016).

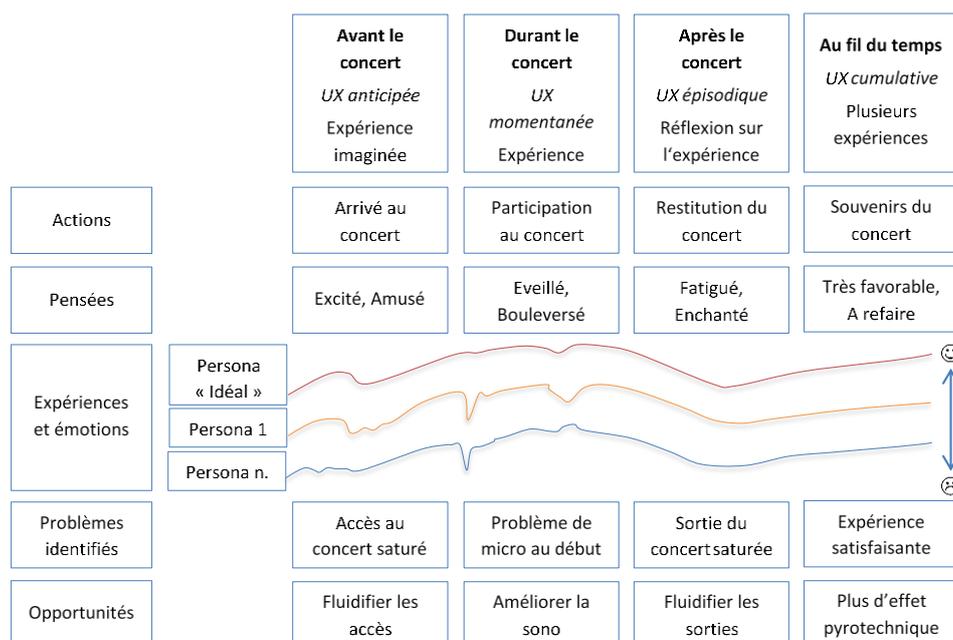


Figure 3.10 – « Expérience Map » d'un concert

Cette méthode permet de mieux connaître les ressentis des consommateurs sur l'utilisation d'un produit, d'un service, d'analyser les différentes étapes de l'expérience client, d'identifier le point de blocage qui pourrait créer de l'insatisfaction. Cette méthode appliquée dans sa totalité demandera d'importantes ressources, beaucoup de temps, différents niveaux d'interprétation et un haut niveau d'implication des panélistes. En effet, cette méthode repose sur le recueil des ressentis, des émotions verbales élaborées à partir d'attributs décrivant l'usage, le plaisir ressenti envers le produit.

Avec les méthodes non-supervisées, on assiste à l'émergence de traitements de données provenant de bases multidimensionnelles issues d'une collecte de données, d'enquêtes consommateurs ou de différents protocoles de recherche impliquant plusieurs disciplines « métiers » (Bourque & Clark, 1992). Cette masse de données peut avoir été collectée dans un but défini préalablement au travers d'études, ou collectée sans avoir d'objectif initialement fixé. Une autre caractéristique de ce type de base de données est qu'elle n'est pas structurée. Pour tirer des connaissances de ces jeux de données également connus sous l'appellation « Big Data », on a recours à des méthodes d'exploration, de forage, de prospection de données également appelées « fouille de données » ou « Data Mining » (Miner *et al.*, 2012). La procédure d'exploitation de ces données consiste (i) à les identifier, les trier, les prétraiter et les normaliser suivant différentes méthodes d'analyse (Leskovec *et al.*, 2014) ; (ii) à établir des corrélations, des relations entre les données suivant des méthodes décrites dans la littérature : arbres de décision, règles d'association, réseaux de concepts formels, analyse hiérarchique de groupes, réseaux de neurones, techniques de classification et apprentissage automatique (Liao *et al.*, 2012) ; (iii) à réaliser des graphiques permettant la visualisation des corrélations possibles détectées par l'algorithme (Oosthuizen & Venter, 1995).

Les méthodes de Data Mining sont appliquées dans de nombreux domaines, et depuis peu en analyse sensorielle. Une analyse de l'espace sensoriel de deux vins : le Chenin blanc et le Sauvignon blanc a été réalisée en partant d'une liste d'attributs sensoriels et aromatiques préalablement collectés par les experts d'un ouvrage spécialisé (Platter's South African Wine Guide, 2017). Des chercheurs ont montré que le Data Mining pouvait être utilisé en science sensorielle. L'intérêt de ce

choix de données est justifié par le recrutement d'œnologues qui s'appuient sur leur expertise dans le domaine viticole et décrivent leurs propres impressions sensorielles des vins évalués en utilisant des indices visuels, une odeur, contrairement à l'utilisation de panélistes qui reçoivent des instructions spécifiques et qui répondent à une liste prédéterminée d'attributs. L'espace produit analysé était constitué au départ de plus de 78000 attributs aromatiques provenant de tests réalisés sur 2500 Chenin blanc (*38500 attributs*) et 4 300 Sauvignon blanc (*71000 attributs*) prélevés sur une période de 7 ans (2008-2014). La méthode des arbres de classification et de régression (CART) a été utilisée pour identifier les indices sensoriels prédicteurs pour les différents styles de vins. Les résultats de cette étude ont montré que 266 attributs aromatiques pouvaient décrire les vins Chenin blanc à partir des attributs correspondant au Sauvignon blanc. Ces résultats ont été confirmés par les œnologues de Platter's South African Wine Guide (Figure 3.11) (Valente et al., 2018).

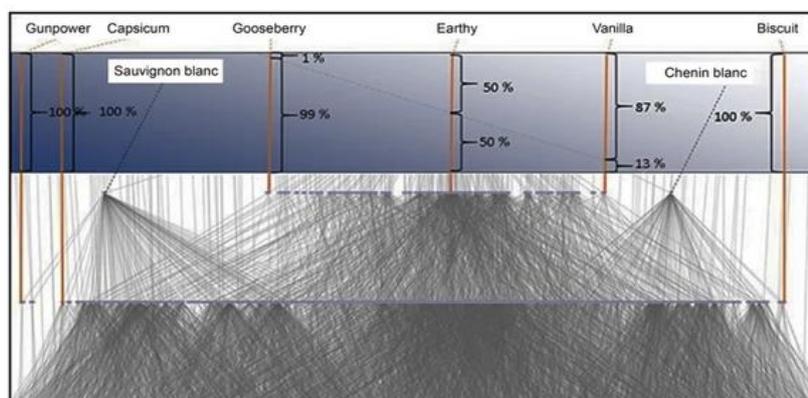


Figure 3.11 – Figure montrant la réduction du nombre d'attributs des vins avec l'application des règles de tri (Valente et al., 2018).

2.2 Méthodes supervisées

L'emploi de méthodes supervisées est utilisé pour « guider » les enquêtes, le recueil des attentes vers des objectifs d'étude préalablement définis. Ces méthodes s'élaborent souvent à l'aide d'espaces sémantiques composés d'attributs ou descripteurs et d'échelles d'évaluation. La sélection des descripteurs doit être pertinente et permettre de décrire la sensorialité du produit, de collecter les ressentis, les impressions des consommateurs.

Ces méthodes reposent souvent sur le montage de tests expérimentaux qui permettront l'évaluation des ressentis sensoriels et émotionnels à l'aide d'un panel naïf, entraîné ou expert. Certaines de ces méthodes intégreront des mesures instrumentales et pousseront leurs modèles jusqu'à l'étude des corrélations entre les notes sensorielles ou émotionnelles provenant d'un panel et les mesures instrumentales.

2.2.1 Attributs et Cotations

La recherche d'attributs dépendra de l'espace produit et des objectifs de l'étude. Certaines études porteront sur l'étude de l'existant et la sélection d'un espace produit dans une base de produits existants. Dans ce cas, il s'agira d'évaluer les grandeurs, les spécifications d'un produit et de sélectionner des caractéristiques comparables. Le choix de l'espace produit est déterminant au regard de l'exploitation des données dans des caractéristiques comparables (Aliouat et al., 2010). Par

exemple, si nous devons concevoir une nouvelle agrafeuse et constituer l'espace produit correspondant (Figure 3.12), nous serions face à une multitude de variables pouvant induire d'importants changements dans la conception du produit final.

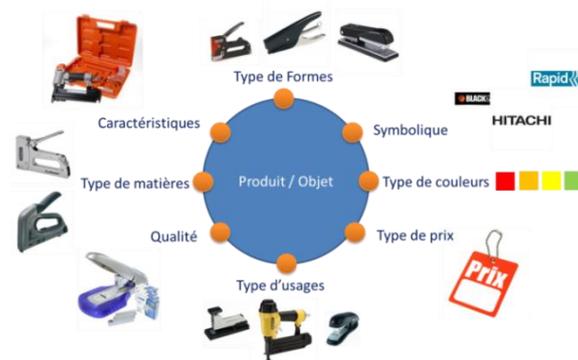


Figure 3.12 – Espace produit d'une agrafeuse avant sélection

Un espace produit « brut » sera difficile à évaluer car il présente trop de caractéristiques : tailles, poids, formes, couleurs, matières, image de marque, types d'usage, type d'architecture cinématique, niveaux de performance, ... Pour mesurer les sensations et les émotions ressenties par des consommateurs, il est nécessaire de réduire cet espace produit à des caractéristiques comparables. La réduction d'un espace multidimensionnel s'effectue en utilisant des plans d'expériences qui permettront de réduire ces caractéristiques à une série de configurations représentatives du grand nombre de possibilités proposées par l'espace produit (Goupy, 2000).

La définition de l'espace produit dépendra de l'objectif. Une fois l'objectif de l'étude communiqué et l'espace produit réduit, il convient d'établir une liste de descripteurs. Cet espace sémantique doit permettre de traduire les impressions, sensations, émotions que dégagent le ou les produit(s).

La procédure de recherche et sélection de descripteurs est décrite dans la norme Afnor NF ISO 11035 – V09 – 021 (1995) d'analyse sensorielle. En complément, il faut noter que les méthodes présentées ci-après proposent déjà leurs propres listes de descripteurs. Ces analyses descriptives peuvent être réalisées sur presque tous les supports, dans toutes les phases de conception, des phases amont aux phases aval, dans toutes les thématiques ; par exemple, en conception produit, il est possible de réaliser des analyses descriptives sur des représentations intermédiaires (dessins, esquisses, rendus réalistes, maquettes, ...), sur des échantillons, sur des prototypes ou sur des produits existants.

Une des premières méthodes développées pour analyser les ressentis hédoniques du consommateur est « l'échelle de Likert » (Likert, 1932). Elle permet d'évaluer différents types de ressentis sur une graduation comprenant plusieurs choix de réponse. Par exemple, à la question « ce produit vous paraît plaisant », les réponses sont graduées de 1 (tout à fait d'accord) à 5 (pas du tout d'accord), et comportent donc une échelle de cotation.

Osgood (1962) propose ensuite d'évaluer la valeur affective qu'un individu attribue à un stimulus au sein d'un espace sémantique grâce à la méthode de « l'échelle sémantique différentielle ». Il propose une cinquantaine de niveaux permettant de déterminer des attributs « perceptifs, affectifs ou descriptifs » sur une échelle allant de favorable à défavorable. Par exemple, la question peut être

« ce produit vous paraît », et la réponse va de « agréable » à « désagréable » avec plusieurs dizaines de niveaux intermédiaires.

La méthode d'Osgood est très utilisée en marketing, par exemple pour évaluer l'odeur d'un détergeant. L'utilisation de cette méthode nécessite au préalable de définir les objectifs de l'étude, de recruter un panel d'utilisateurs suffisamment important, et d'établir lors de séances « amont », les descripteurs qui permettront de cerner les attentes du consommateur. L'avantage de cette approche est de laisser le choix des descripteurs au concepteur en fonction de sa problématique (*qualité, ergonomie, confort, sensoriel, hédonique, stress ou douleur*). La limite de cette méthode est de ne pas disposer de « référentiel » qui permettrait d'étalonner les sensations du panel et donc d'objectiver la mesure car nous rappelons qu'un jugement ne peut paraître « objectif » que s'il est universel.

La méthode développée par Kano (1984) permet le positionnement sur un graphique de la satisfaction des besoins du client. Cette méthode repose sur un questionnaire qui recueille pour chaque fonction le niveau de satisfaction associé. L'évaluation des besoins et des fonctions s'effectue en décomposant les besoins en 4 catégories :

- Les *besoins de performances* : Ce sont des besoins relatifs à la performance du produit, exemple : une pile doit durer longtemps.
- Les *besoins basiques* : Ce sont les besoins qui s'ils sont absents rendent le consommateur insatisfait, exemple : le café doit être servi dans une tasse propre.
- Les *besoins attractifs* : Ce sont les besoins qui ne sont pas forcément attendus, mais qui satisferont pleinement les consommateurs, exemple : Lorsque vous amenez votre voiture au garage pour la révision, vous êtes agréablement surpris de la retrouver propre.
- Les *besoins neutres* : Ce sont les besoins pour lesquels le consommateur est indifférent. Ces besoins ne seront pas indispensables au produit.

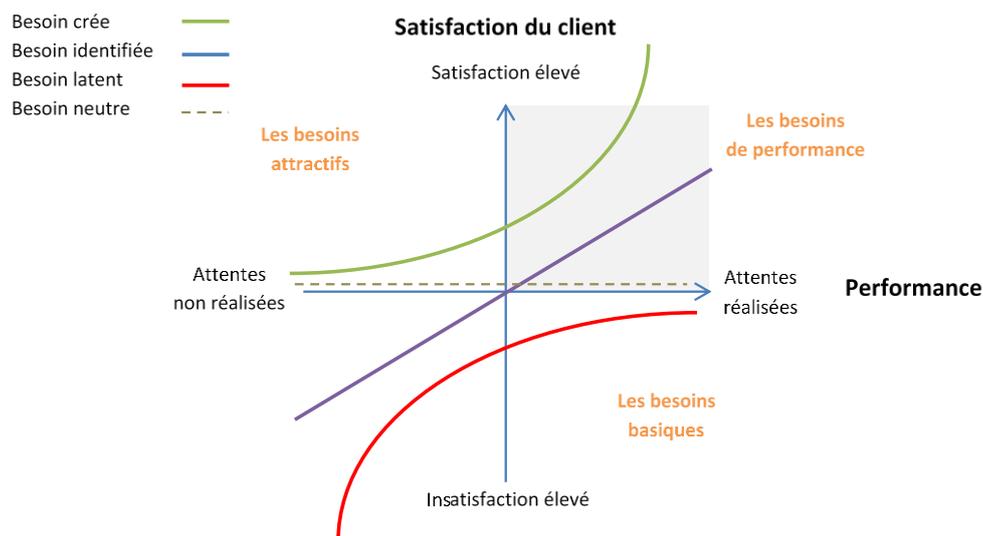


Figure 3.13 – Le diagramme de KANO (Kano, 1984).

Ces besoins sont représentés dans la Figure 3.13 sous la forme d'un diagramme qui présente en abscisse les attentes fonctionnelles réalisées ou non réalisées, traduites en termes de performances, et en ordonnée la satisfaction/insatisfaction. La mise en œuvre de cette approche s'effectue après une analyse fonctionnelle qui permettra de lister les fonctions du produit. Pour chaque fonction, un

panel est interrogé pour déterminer le type de besoin associé à la fonction (*besoin créé, identifié, latent ou neutre, ...*). Sur la base des réponses enregistrées, les fonctions sont placées sur le diagramme de KANO. La lecture du diagramme permet de s'assurer que les fonctions essentielles pour satisfaire les attentes seront présentes dans le futur produit, avec notamment les besoins attractifs qui peuvent correspondre aux valeurs hédoniques du produit.

Le modèle KANO est une méthode de positionnement des fonctions et des attentes du consommateur. Cette méthode permet d'identifier les besoins non satisfaits, et d'étudier les forces et faiblesses du produit en cours de conception. Mais elle ne permet pas l'étude des ressentis émotionnels à proprement parler.

Certains concepteurs utiliseront plus volontiers la méthode QFD : Quality Function Deployment. Cette méthode a été développée par Akao (1972, 1990). Elle est basée sur les connaissances relatives à l'analyse fonctionnelle, et plus particulièrement dans la manière de questionner l'expression des besoins et de déterminer les solutions.

Il s'agit d'une méthode qui utilise une matrice à 3 dimensions (*souvent appelée « maison de la qualité »*) représentée dans la Figure 3.14 :

- En ordonnée, les « attentes des clients », qui répondent à la question : Quoi ?
- En abscisse, « les spécifications du produit » ou « les solutions imaginées pour répondre aux attentes des clients », qui répondent à la question : Comment ?
- Sur le dessus, la demi-matrice en forme de triangle qui permet de qualifier le niveau de corrélation des différentes solutions sur une échelle allant de très négatif à très positif, et d'aider à optimiser les coûts, les délais, tout en vérifiant l'adéquation aux attentes des clients.

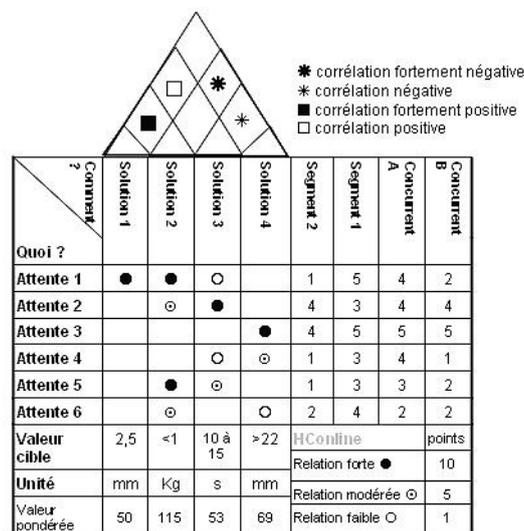


Figure 3.14 – Quality Function Deployment (Akao, 1990) d'après Christian Hohmann.

La matrice permet d'étudier la relation qui existe entre les « Attentes » et les « Solutions » et d'évaluer si la solution imaginée répond faiblement, modérément ou fortement aux attentes. Des poids peuvent être associés à cette relation ; dans l'exemple : la relation forte vaut 10 points, la relation modérée vaut 5 points et la relation faible vaut 1 point. Pour la solution 1, le calcul de la valeur pondérée s'effectue en relevant la valeur de la relation (*dans ce cas 10*) multipliée par la

valeur du segment observé (*dans ce cas : Segment 1*). Cette méthode suppose que les attentes des clients aient été préalablement identifiées par une enquête marketing, et les solutions des concurrents identifiées à l'aide d'un benchmarking. Cette méthode n'intègre pas les attentes hédoniques souhaitées par les clients.

Les normes Afnor XP V 09-500 (2012b); XP V 09-501 (2010); XP V 09-502 (2013) relatives aux épreuves hédoniques, définissent le terme hédonique comme étant un attribut *se rapportant au caractère plus ou moins plaisant*. Les épreuves hédoniques s'intéressent donc aux réponses affectives du consommateur en procédant à :

- Des épreuves de préférences (*exemple : quel échantillon préférez-vous ?*) ;
- Des épreuves de notation hédonique, qui permettent d'évaluer l'intensité du plaisir éprouvé (*Comment appréciez-vous le produit ?*).

Les épreuves de notation hédonique s'effectuent à l'aide d'échelles discontinues sémantiques de 7 à 9 points. Une échelle sémantique à 9 niveaux est par exemple : *extrêmement agréable, très agréable, agréable, plutôt agréable, ni agréable ni désagréable, plutôt désagréable, désagréable, très désagréable, extrêmement désagréable*.

Les épreuves hédoniques sont décrites dans le manuel méthodologique de Depledt (2009). Elles distinguent la préférence immédiate de la préférence à long terme. Cette distinction permet de comprendre l'adoption ou le rejet d'un produit et de cerner les différentes phases d'utilisation du produit (Figure 3.15).

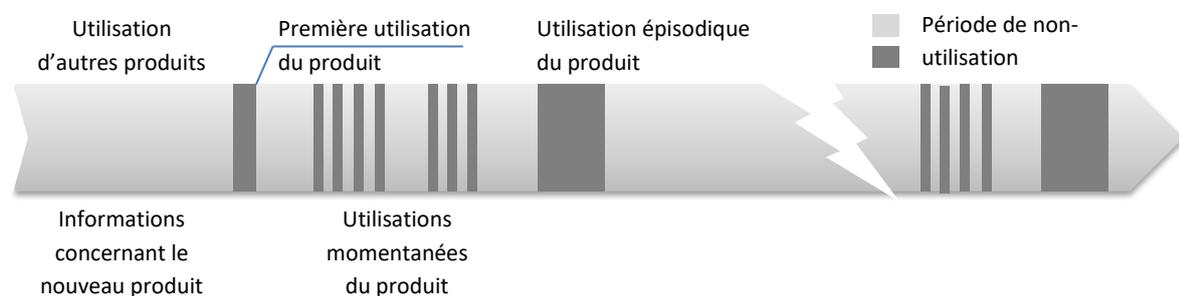


Figure 3.15 – Représentation schématique des différentes phases de l'appropriation d'un produit à travers les phases d'utilisation momentanée ou d'utilisation épisodique du produit (Roto et al., 2011).

Pour étudier la durée du plaisir éprouvé avec un produit, Depledt (2009) rajoutent deux approches de caractérisation hédonique : l'évaluation de la lassitude et de l'aversion. La première utilisation d'un produit peut engendrer une satisfaction qui peut s'atténuer avec le temps. Pour tester l'apparition de cette lassitude, on procède à un test qui est effectué à l'aide d'une série de 15 produits. Les sujets reçoivent 15 échantillons. L'animateur demande au participant de consommer la totalité du produit alimentaire et d'exprimer son ressenti hédonique pour chaque prise alimentaire. Ce test permet de constater si l'appréciation est constante ou si elle baisse avec le nombre de prises. L'épreuve d'aversion consiste à vérifier que le produit ne génère pas d'aversion, de rejet. Dans l'agroalimentaire, ce test est effectué en 5 étapes :

- On présente au participant une petite quantité de produit alimentaire qu'il doit ingérer dans sa totalité avant d'évaluer ses propriétés hédoniques ;

- On présente au participant une grosse quantité de produit (1 fois et demie la quantité normale) qu'il doit totalement consommer avant d'évaluer le produit. Le temps pour consommer le produit est enregistré ;
- On représente une grosse quantité de produit. On lui demande de manger la quantité qu'il désire dans un temps donné, puis on mesure la quantité restante. Le participant évalue à nouveau le produit ;
- On renouvelle encore une fois le test et on pèse la portion restante ;
- Une fois la dégustation terminée, on interroge le participant sur la quantité de produit qu'il pense avoir consommé. On obtient un rapport en divisant le poids estimé par le participant par le poids réellement consommé. Ce coefficient indique si le participant surestime ou sous-estime la consommation.

Cette méthode est principalement utilisée pour caractériser les propriétés sensorielles dans le cadre d'un développement de produit, d'un contrôle qualité, de l'attribution d'un label qui identifiera les propriétés du produit, dans le cas d'une étude marketing qui vise à comparer différents produits, le plus souvent sur la base de ses caractéristiques sensorielles (Pille et Du Boisrouvray, 2003). Les profils sensoriels permettent de cartographier les attributs sensoriels du produit et de les mettre en lien avec les attentes des consommateurs. La valeur hédonique du produit permet de classer les produits par préférence, de vérifier si le produit est accepté. En revanche, cette méthode ne permet pas d'étudier les réactions émotionnelles primaires des consommateurs.

Les méthodes subjectives présentées ici ont été enrichies par des mesures objectives, à l'aide de capteurs physiques, pour évaluer les perceptions au travers d'un protocole confrontant les mesures physiques et les mesures verbalisées provenant d'un panel (Zhou, 2006). L'appellation « évaluation sensorielle » s'est répandue à la suite de la parution d'un manuel méthodologique consacré à l'évaluation sensorielle provenant du SSHA - *Société Scientifique d'Hygiène Alimentaire* (Depledt, 2009). Ce manuel est essentiellement destiné aux domaines de l'agroalimentaire, mais présente dans sa quatrième partie des méthodes dédiées aux produits non-alimentaires permettant d'ouvrir l'évaluation sensorielle à de multiples autres disciplines (*cosmétique, automobile, qualité, ...*). La majeure partie des méthodes proposées dans ce manuel reprend et explicite les méthodologies présentées dans les normes d'analyse sensorielle.

2.2.2 Axe « Sensations »

L'analyse sensorielle est une méthode initialement développée dans l'agroalimentaire, qui permet d'étudier les propriétés organoleptiques d'un produit par les organes des sens. Elle permet dans ce cas de :

- Etablir s'il existe une différence entre différents produits grâce aux tests discriminants ;
- Déterminer et analyser les différentes propriétés physico-chimiques d'un produit grâce aux tests descriptifs ;
- Etablir les préférences des utilisateurs grâce aux tests hédoniques ou études consommateurs.

Selon Depledt et Sauvageot (2002), le terme « analyse sensorielle » a été utilisé pour la première fois en 1961 lors d'une conférence donnée au centre technique de la biscuiterie. Cette méthode demande le recrutement d'un panel, naïf ou entraîné :

- Le panel naïf sera utilisé pour différencier, identifier, évoquer, recenser les descripteurs, les attentes. Ce panel est également utilisé pour établir les préférences du consommateur. L'utilisation d'un panel naïf suppose souvent le recrutement d'un grand nombre de participants qui permettront par l'établissement de moyennes de créer un individu type.
- Le panel entraîné est considéré comme un véritable instrument de mesure car il est entraîné à situer une caractéristique sensorielle par rapport à un référentiel existant.

Par exemple, le Sensotact® est un référentiel de propriétés tactiles de matériaux (Crochemore *et al.*, 2003). Ce référentiel permet d'évaluer huit caractéristiques tactiles : la dureté, l'aspect glissant, le fibreux, la nervosité, l'effet mémoire, le relief, la thermique et le râpeux. Pour l'aspect fibreux, ce référentiel propose 5 échantillons fibreux classés sur 5 notes : de 0 pour pas du tout fibreux, 30 pour légèrement fibreux, 60 pour fibreux, 80 pour assez fibreux, à 100 pour très fibreux. Avant toute évaluation de l'aspect fibreux d'un nouveau matériau, le participant devra développer sa capacité à reconnaître et situer la note correspondant à l'échantillon présenté. Des entraînements répétés permettront au panel d'évaluer de manière objective les propriétés organoleptiques du produit.

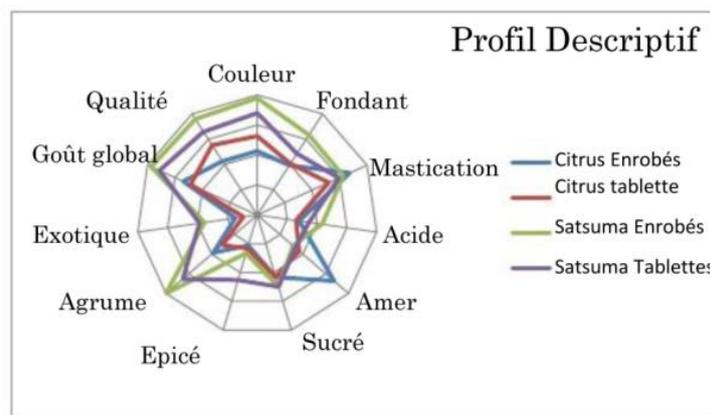


Figure 3.16 – Profil sensoriel d'un produit

L'analyse sensorielle est une méthode qui permet de comparer plusieurs produits en positionnant les descripteurs relevés lors de l'évaluation sensorielle du panel sur un profil sensoriel (Figure 3.16). L'analyse porte sur la performance attendue de chaque caractéristique.

La norme Afnor NF ISO 6658 (2017), présente les principales recommandations relatives aux différentes épreuves d'analyse sensorielle. Ce recueil présente 2 types de tests :

- Les tests discriminants qui servent à : établir s'il existe ou s'il n'existe pas de différence entre 2 produits, identifier la nature de cette différence, comparer 2 produits, analyser les préférences de l'utilisateur et entraîner un sujet.
- Les tests descriptifs qui servent à : identifier, classifier qualitativement et quantitativement la ou les propriété(s) sensorielle(s) d'un produit, établir une représentation sensorielle des propriétés physico-chimiques d'un produit et entraîner un sujet.

La mise en œuvre d'une approche supervisée permet de définir les plages « de confort » d'un accoudoir. Cette méthodologie permet : i) d'établir les descripteurs permettant de définir le confort proposé par le produit (Voir dans la Figure 3.17, les exemples de descripteurs retenus pour décrire le confort relatif à l'usage d'un accoudoir sont présentés dans l'article des techniques de l'ingénieur : le

design sensoriel (Bassereau et al., 2009). Le confort s'évaluera sur plusieurs descripteurs : Les aspects thermiques, accrochant, adhérent, brillant, dureté, opaque, lisse, déformable, réchauffable ; ii) de recruter un panel ; iii) d'entraîner ce panel à reconnaître et évaluer les descripteurs décrits ci-avant ; iv) de déterminer à l'aide de ce panel les plages à éviter, sans spécifications particulières (c'est-à-dire en dessous du seuil de détection), de confort. La cartographie du confort établie sur plusieurs descripteurs par un panel permettra de représenter les attentes du consommateur par des notes sensorielles.

Comme illustré dans la Figure 3.17, les notes sensorielles recueillies par l'analyse sensorielle d'un accoudoir sont ensuite traduites en mesures physiques quantifiables. Ces mesures physiques sont confrontées à une bibliothèque de matériaux. Cette bibliothèque proposera en retour une liste des matériaux correspondant à la plage de confort escomptée. Le prix des matériaux correspondant à cette plage de confort et les caractéristiques de robustesse, de vieillissement du matériau varieront. L'analyse de cette base de données permettra aux concepteurs d'opter pour le matériau le moins cher qui offrira la meilleure « sensorialité produit » et « valeur perçue ».

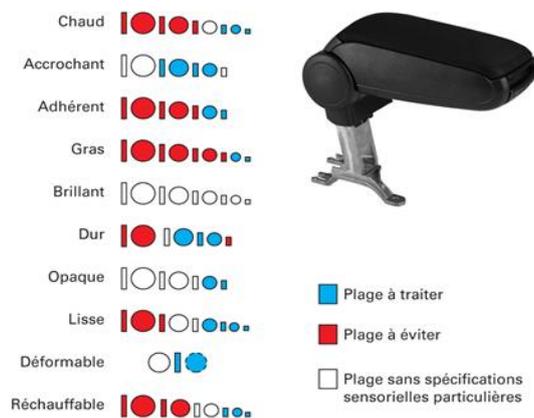


Figure 3.17 – Plages de confort (Bassereau et al., 2009)

Le modèle de « métrologie sensorielle » est particulièrement bien explicité par Petiot (2014). Ce modèle présente une méthode qui comprend 7 étapes (Figure 3.18) :

1. La définition de l'Espace produit
2. La réalisation de Mesure perceptive
3. La réalisation de Mesure objective
4. L'établissement d'un Cahier des charges « sensoriel »
5. La Modélisation des perceptions
6. L'établissement d'un Cahier des charges « technique »
7. Le démarrage de la Conception

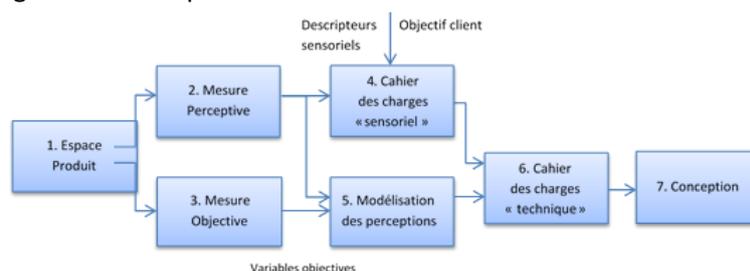


Figure 3.18 – Méthodologie d'étude expérimentale des perceptions (Petiot, 2014)

La première démarche proposée par Petiot et Yannou (2004) consiste à définir l'espace produit. L'espace produit correspond aux échantillons, types de produits, éléments qui seront évalués par des mesures perceptives. La seconde étape consiste à réaliser des mesures perceptives suivant les recommandations établies dans la norme Afnor NF ISO 6658 (2017) d'analyse sensorielle ou dans l'ouvrage Evaluation sensorielle du SSHA (Depledge, 2009). La troisième étape consiste à réaliser des mesures objectives, c'est-à-dire instrumentales sur l'espace produit comme expliqué en design sensoriel (Bassereau *et al.*, 2009). La quatrième étape consiste à intégrer la sensorialité produit mesurée et prescrite dans un cahier des charges « sensoriel ». La cinquième étape consiste à modéliser les perceptions, par exemple avec la méthode décrite par le même auteur (Petiot, 2014). La sixième étape consiste à intégrer ces éléments de conception sensorielle dans un cahier des charges « technique ». La dernière étape consiste à démarrer la conception en se basant sur ce cahier des charges « technique » comme dans un processus de conception traditionnel.

Sensorial Quality Assessment

La méthode de « sensorial quality assessment (SEQAM) » a été développée par Bonapace (2002) pour évaluer la relation entre les propriétés d'intérieurs automobiles, de volants, de poignées de portes et la perception du plaisir ressenti à leur contact. Cette méthode étudie les corrélations entre les propriétés physiques et les notes sensorielles correspondant aux ressentis tactiles, thermiques, acoustiques et visuels exprimés par un panel. Cette évaluation du plaisir est réalisée en 3 étapes :

- Evaluation sur les produits existants dans le but d'explorer la sensorialité du produit ;
- Evaluation sur des maquettes ou prototypes pour évaluer et déterminer les bonnes caractéristiques du produit ;
- Evaluation sur le produit final dans le but de vérifier que la sensorialité escomptée est bien présente.

Cette analyse suppose un grand nombre d'expérimentations, compte tenu du nombre d'étapes. Elle permet de mesurer le phénomène d'intermodalité, c'est-à-dire l'impact qu'aura chaque modalité sur l'autre. Cette méthode est principalement utilisée pour caractériser les propriétés sensorielles, fonctionnelles, ergonomiques d'un produit dans le cadre d'un développement de produit. Cette méthode ne propose pas d'approche des ressentis émotionnels.

Touch-Design®

Le Touch-design® est une méthode développée par le groupe automobile Renault. Elle consiste à définir les attentes et les préférences du client, les caractéristiques fonctionnelles et sensorielles du produit afin de favoriser la création de « valeurs perçues ». La particularité de cette méthode est d'établir une représentation du champ perceptif du produit grâce à l'utilisation d'un plan d'expériences et de pratiquer une analyse statistique grâce aux méthodes de l'analyse conjointe (Crochemore *et al.*, 2004). Asensio et Bouchenoire (2003) proposent d'utiliser cette méthode pour établir le lien émotionnel avec le consommateur en sélectionnant les bonnes caractéristiques du produit.

La méthode de mise à l'échelle Multidimensionnelle est un moyen de visualiser une multitude d'informations perceptives dans un espace perceptuel à l'aide de la projection bidimensionnelle par

un algorithme d'une matrice de distance. Cette méthode a été développée par Shepard *et al.* (1974) pour réaliser des analyses psychométriques et permet de positionner la perception, l'image de marque, la sensorialité d'un produit.

La méthode du Napping®

La méthode du Napping® permet de réaliser une analyse descriptive d'attributs sensoriels à l'aide d'un panel. La première étape consiste à demander au panel de disposer des échantillons en fonction des sensations sur une « nappe » (Pagès, 2005). Si on constate que les échantillons sont regroupés on considère que leurs caractéristiques sont proches, et si les échantillons sont éloignés c'est que les caractéristiques des produits sont différentes. Dans la seconde étape, on questionne les panélistes sur leurs ressentis et perceptions. L'analyse de ce résultat s'effectue à l'aide d'une analyse factorielle multiple (Pagès, 2004). La représentation des données est réalisée sur une carte de facteurs individuels (IFM) qui permet de visualiser la distance entre les échantillons. Cette méthode peut être répétée pour définir plusieurs caractéristiques sensorielles des échantillons. Par exemple des échantillons de métaux peuvent être classés par le sens du toucher en aveugle, puis le sens visuel et enfin les sens du visuel et du toucher simultanément (Faucheu *et al.*, 2015).

Cette méthode permet de caractériser les aspects de surfaces, les descripteurs visuels qui ensemble constituent une grande partie de nos perceptions. Cette approche permet de distinguer les apports de chaque sens et de découvrir l'attractivité des sensations qu'ils produisent. Cette méthode ne propose pas d'étudier les réactions émotionnelles au-delà de leurs qualités hédoniques.

2.2.3 Axe « Emotions »

Analyse de Tendances Conjointes (ATC)

Plusieurs « disciplines carrefours » commencent leur étude par une analyse des tendances qui traduit l'évolution du marché, les nouvelles attentes, les évolutions de la mode, l'emploi de nouvelles matières, les dernières innovations, L'étude des tendances permet d'analyser les comportements des consommateurs, de connaître leurs préférences en matière de style, de couleurs, de matières, d'usages, ... Il s'agit d'un état des lieux des tendances hédoniques et des ressentis émotionnels.

Les designers, stylistes, architectes utilisent des pages tendances pour décrire à partir d'images, les intentions « stylistiques, formelles » qu'ils souhaitent mettre en œuvre afin de les transmettre et en discuter lors de séances de créativité (Figure 3.19).

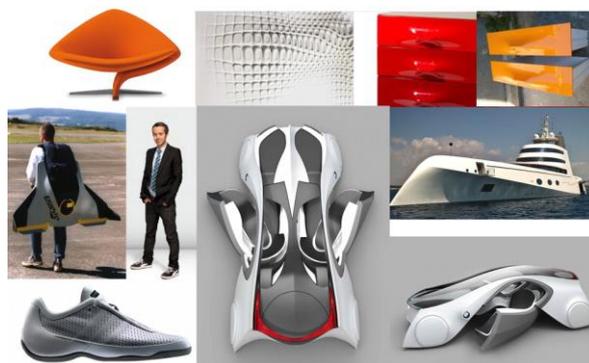


Figure 3.19. Exemple de page tendance

La page tendance est une méthode qui permet d'étudier les phénomènes de société, les pratiques, les usages avec une approche sociologique. La méthode développée par le Laboratoire de Conception de Produits Innovation (LCPI) des Arts et Métiers consiste à identifier les valeurs sociologiques. La valeur correspond aux idéaux, aux préférences qui prédisposent les individus à agir dans un sens donné. Ces valeurs appelées « valeurs terminales » permettent d'établir les « lois de comportement » qui s'appliquent au produit.

La méthode consiste essentiellement à recueillir des « valeurs » dans un secteur donné, dit « secteur influant » suivant l'observation de la nature spécifique du produit et des circonstances de sa consommation. Ces valeurs seront ensuite représentées sur un « mapping axiologique » et des images correspondantes aux termes identifiés seront positionnées. L'analyse de cet espace sémantique s'effectuera suivant la règle « Chaînage valeurs – Fonctions – Solutions » et la finalité de l'analyse de tendances conjointes est de générer des solutions concrètes en termes d'attributs (*forme, couleur, texture, usage*) à partir des valeurs (Lim, 2003). Cette méthode permet d'intégrer les attentes du consommateur dans les phases amont du processus de conception.

Cette méthode permet de construire l'espace sémantique d'un produit dans un contexte spécifique. La rigueur imposée par cette méthode limite l'expression subjective au cadre proposé qui s'apparente donc à une méthode supervisée. Les ressentis émotionnels sont faiblement pris en compte par la méthode.

Kansei engineering

Quand on parle d'évaluation des émotions en conception de produit, on cite souvent la méthode Kansei, qui a été développée à l'Université d'Hiroshima dans les années 90 (Nagamachi, 1990). L'ingénierie Kansei est souvent décrite comme étant une méthode permettant de mesurer les sentiments, les valeurs et les besoins affectifs des consommateurs, et pour les traduire en solutions tangibles en conception de produits. Le but de cette méthode est de fournir des conseils pour réaliser la conception d'un produit en partant d'énoncés subjectifs, sensoriels et émotionnels. Le terme « Kansei » signifie en japonais "sensualité, impressions et/ou émotions" et s'oppose au mot « Chisei » qui signifie « intelligence, capacité à réfléchir, prévoir », soit les critères rationnels. Schütte (2002) explique que la perception d'un nouveau produit engendra chez le consommateur une réponse comprenant des ressentis « émotionnels » et « rationnels ». Ces deux ressentis sont complémentaires et correspondent à l'appréciation globale.

La première étape consiste à recueillir des mots « Kansei », qui traduisent les impressions, les ressentis, les sentiments, l'affect des futurs utilisateurs concernant les formes, couleurs, textures, style, ergonomie, fonctions, ... du produit à concevoir. Une liste de mots est réalisée grâce à l'utilisation d'un panel ou en recherchant dans la presse spécialisée les descripteurs les plus employés. Les mots sélectionnés sont la plupart du temps des adjectifs « rapide, amusant, fonctionnel, tendance, ... ». Ensuite, en utilisant des algorithmes génétiques, des modèles de logique floue ou des réseaux de neurones, ces mots sont corrélés avec quatre bases de données :

- Une Base constituée de mots « Kansei »
- Une Base constituée d'images qui permettront d'illustrer les mots « Kansei » et de préciser leurs sens.

- Une Base constituée de principes d'ingénierie acquis sur des conceptions précédentes. Cette base de données permettra d'établir les liens entre les mots « Kansei » et les fonctions d'un produit. Cette étude de correspondance permettra de traduire les mots en caractéristiques « produit ». Par exemple le mot kansei « rapide » pourrait se traduire en caractéristiques fonctionnelles par « puissance du moteur », « légèreté », « aérodynamique », ...
- Une Base constituée de couleurs et textures. Le mot « rapide » fera référence au rouge, au gris, au jaune, à l'orange, des symboliques « couleur » qui traduisent souvent la sportivité. Le mot « tendance » supposera l'emploi de matières « tendance » (*alcantara, carbone...*).

Les résultats de cette analyse permettent de réaliser un cahier des charges fonctionnel qui prend en compte les attentes des utilisateurs (Mantelet, 2006).

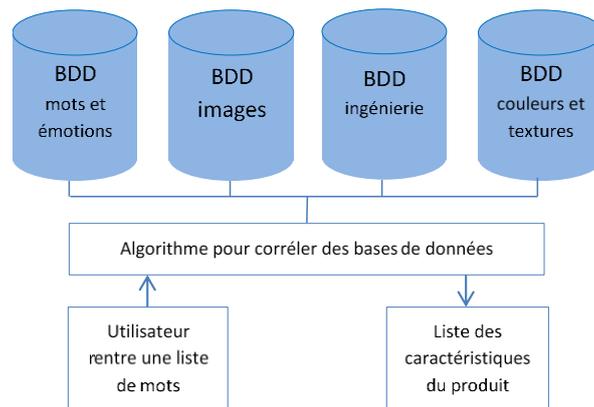


Figure 3.20 – Schéma de principe du Kansei Engineering System (KES) (Nagamachi, 1995)

Le traitement des données est réalisé par un algorithme nommé KES (*Kansei Engineering System*) et décrit dans la Figure 3.20. Levy (2008) décrit six manières de pratiquer l'ingénierie Kansei, en fonction des données disponibles. La méthode du Kansei permet une étude approfondie des besoins, ressentis, des impressions, des attentes des utilisateurs et d'associer le panel aux choix de conception. Cette méthode est assez lourde à mettre en œuvre car elle suppose d'organiser un important recueil de données pour alimenter les bases et demandera de nombreuses séances de travail. La méthode de Kansei Engineering est régulièrement enrichie par de nouveaux apports qui permettent de mieux définir les attentes émotionnelles des consommateurs (Bouchard *et al.*, 2003).

Méthode PrEmo

La méthode PrEmo permet d'étudier les ressentis émotionnels d'un panel envers un produit. Elle est utilisée en amont d'un projet et demande le recrutement d'un panel pour évaluer les ressentis à partir de photos, de descripteurs, de slogans, ... Les stimuli seront évalués à l'aide d'un outil qui présente 7 émotions agréables et 7 émotions désagréables, sous la forme de petites animations qui aident les participants à identifier les émotions. Cette évaluation est réalisée par l'utilisation de l'outil « PrEmo » de la Figure 3.21.

Reprenant les travaux de Tiger (1992), Desmet (2003) distingue les émotions en 5 familles :

- Emotions instrumentales : *fonctionnalité et l'utilisabilité,*
- Emotions esthétiques : *plaisir physiologique,*
- Emotions sociales : *plaisir sociologique,*

- Emotions de surprise : *plaisir psychologique*,
- Emotions d'intérêt : *plaisir idéologique*.

Pieter Desmet propose une exploration des émotions adaptée au métier de « designer » qui est un concepteur créatif en charge des développements stylistiques, graphiques, formels, conceptuels, usuels, matériels du produit. Les formulations esthétiques produites par le designer doivent susciter le désir, émouvoir les futurs acheteurs.

Emotions agréables	Emotions désagréables
Le désir	Le dégoût
La bonne surprise	La mauvaise surprise
L'inspiration	L'indignation
L'amusement	La déception
L'admiration	Le mépris
La satisfaction	Le mécontentement
La fascination	L'ennui

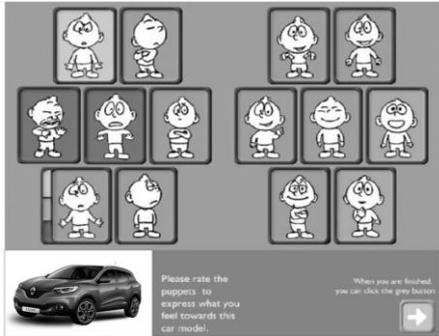


Figure 3.21 – Navigateur des émotions et produits (Desmet, 2003)

La méthode PrEmo se réalise en plusieurs étapes :

- La première étape se réalise en amont. Après sélection d'un espace produit, on établit une liste d'attributs pertinents et on pratique une première mesure sur la base d'échelles sémantiques à partir des 14 types d'émotions destinées à établir une première définition de l'environnement formel et émotionnel que devrait posséder le produit,
- La seconde étape consiste pour le designer à générer des concepts qui répondent à l'environnement formel et émotionnel défini préalablement,
- La troisième étape consiste à proposer des esquisses, dessins, prototypes, maquettes, au panel, pour réaliser une évaluation émotionnelle suivant la méthode décrite ci-avant,
- La quatrième étape consiste à déterminer si les « design » répondent aux objectifs émotionnels que le designer s'était fixé. Si le concept est satisfaisant le projet suit son cours, en revanche s'il ne répond pas aux attentes, le designer va retourner à la seconde étape pour générer des concepts.

Cette méthode permet au designer d'intégrer en temps réel les attentes des consommateurs, de déterminer l'émotion qui caractérise ses créations, de sécuriser la dimension émotionnelle des concepts, de se rapprocher du client. Cette méthode caractérise principalement des concepts, des représentations esthétiques qui focalisent l'attention sur les aspects formels, usuels, graphiques qui comportent beaucoup de niveaux d'interprétations. L'émotion mesurée est plutôt une émotion raisonnée qui prend en compte une impression globale ou un jugement hédonique construit.

Consumption Emotion Set (CES)

La méthode CES a été développée par Richins (1997) pour étudier les émotions liées à la consommation car il pensait que les méthodes d'évaluation émotionnelle développées en psychologie sont difficiles à interpréter et à mettre en œuvre chez un consommateur lambda en raison de l'utilisation d'un vocabulaire que le consommateur n'emploie pas.

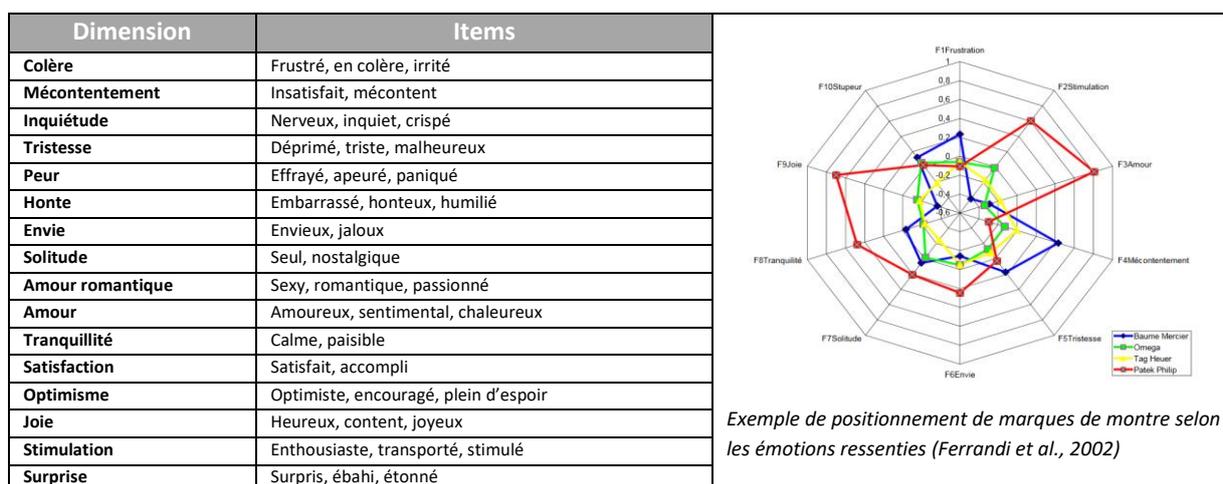


Figure 3.22 – Echelle originale de Richins (1997) traduite en Français par Ferrandi et al. (2002)

Les termes de la méthode CES ont été sélectionnés car ils sont facilement compris par les panélistes (Figure 3.22). Cette méthode permettra de traduire le sentiment global du consommateur envers une marque, une interface, un produit, ...

Méthodes UX – User Expérience

La méthode UX est une démarche de conception centrée sur l'utilisateur initiée par les techniques de design thinking destinée à mieux comprendre les attentes des futurs clients par des techniques au travers de questionnements interactifs, collaboratifs, de terrain. La méthode UX propose une multitude d'outils issus de différentes disciplines (*marketing, design, psychologie, sociologie, ingénierie méthode, ...*). Le chaînage de ces outils permet d'approfondir l'expression des besoins (*focus group*), d'analyser le parcours client (*analyse des tâches, expérience maps*), de trouver des idées (*idéation*), d'appréhender les étapes du développement d'un produit (*roadmap*), de segmenter le marché (*personas*), de développer une stratégie de jouabilité (*gamification*), d'analyser le niveau de lecture de l'information (*iconographie*), d'évaluer les produits avant commercialisation (*tests consommateurs*), ... donc de construire l'enchantement client.

L'enchantement client repose sur des valeurs hédoniques et utilitaires. Le questionnaire AttrakDiff présente une méthode d'évaluation très complète permettant l'évaluation de 28 items utilitaires et hédoniques pour évaluer l'expérience utilisateur de systèmes interactifs. L'évaluation de ces items s'effectue sur une échelle défavorable-favorable (Figure 3.23).

Parallèlement, la méthode UX propose l'utilisation de cartes d'idéation qui offre une base permettant le recueil d'informations hédoniques sur le plaisir, la mesure d'émotions positives, l'évaluation de l'épanouissement des besoins psychologiques fondamentaux (Ux Card, Lallemand & Gronier, 2015) ; des jeux de cartes permettent de concevoir des expériences ludiques (Lucero & Arrasvuori, 2010) ; d'évaluer les émotions positives (Positive emotional granularity cards, Yoon et al., 2015) ; de manager les émotions dans un développement de produit (Yoon et al., 2016) ; de déterminer la valeur émotionnelle d'un produit en le situant sur 16 émotions (Desmet et al., 2001), de décrire ce que l'utilisateur « Pense, Ressent, Entend, Voit, Dit et Fait » (Osterwalder et al., 2011). Ces cartes sont utilisées comme support pour générer des idées, étudier les expériences utilisateur,

améliorer les sessions de brainstorming en fournissant des règles. Les réactions des participants sont riches d'enseignement car ils se prêtent plus facilement au jeu.

<i>Qualité Pragmatique (QP)</i>	<i>Technique – Humain Complicé – Simple Pas pratique – Pratique Fastidieux – Efficace Imprévisible – Prévisible Confus – Clair Incontrôlable – Maîtrisable</i>	<i>Qualité Hedonique Stimulation (QH-S)</i>	<i>Conventionnel – Original Sans imagination – Créatif Prudent – Audacieux Conservateur – Novateur Ennuyeux – Captivant Peu exigeant – Challenging Commun – Nouveau</i>
<i>Qualité Hedonique Identification (QH-I)</i>	<i>M'isole – Me sociabilise Amateur – Professionnel De mauvais goût – De bon goût Bas de gamme – Haut de gamme M'exclut – M'intègre Me sépare des autres – Me rapproche des autres Non présentable – Présentable</i>	<i>Attractivité (ATT)</i>	<i>Déplaisant – Plaisant Laid – Beau Désagréable – Agréable Rebutant – Attirant Mauvais – Bon Repoussant – Attrayant Décourageant – Motivant</i>

Figure 3.23 – Création et validation d'une version française du questionnaire AttrakDiff pour l'évaluation de l'expérience utilisateur des systèmes interactifs. Lallemand et al. (2015).

Un autre apport de la méthode UX est la méthode de la « Gamification ». Ce terme de « Gamification » qui signifie « Transformer quelque chose en jeu » a été inventé par Richard Bartle dans les années 1980 (Kim, 2015). La méthode consiste à appliquer les principes du jeu dans des contextes qui n'ont pas vocation à en proposer. Cette méthodologie est une très bonne base pour intégrer de la « jouabilité », donc du plaisir dans la conception, on parle de création de « *Systèmes Gamifiés* ». Cette méthode peut utiliser un système de gratifications, des récompenses qui enrichiront l'expérience et activeront « le centre du plaisir » humain. Cette méthode est très complète, permet de répondre à plusieurs types d'interrogation, de connaître les ressentis des utilisateurs, d'analyser les différentes étapes de conception, d'identifier les expériences négatives ou positives, d'étudier un marché, d'améliorer le processus d'idéation, ... Cette méthode appliquée dans sa totalité demandera d'importantes ressources, beaucoup de temps, différents niveaux d'interprétations, une importante participation et un haut niveau d'implication des panélistes. Toutes ces méthodes reposent essentiellement sur l'expression des ressentis, des émotions verbales élaborées à partir d'attributs décrivant l'usage, le plaisir ressenti envers le produit.

Méthode 3E

La méthode 3E (*Exprimer, Emotion, Expérience*), est une méthode d'auto-évaluation qui utilise le dessin pour exprimer son émotion. L'utilisation du dessin « sans contrainte » permettra au participant d'exprimer sa pensée et ses émotions. Dans cette méthode les stimuli émotionnels sont également évalués avec les techniques Emocards et SAM (Self - Assessment - Manikin). La technique Emocards renseigne sur l'expression faciale qui correspond au stimulus (*joie, colère, tristesse, dégoût, surprise et peur*) et le niveau d'activation qu'engendre le stimulus. La technique SAM renseigne sur le niveau d'activation, l'information hédonique, et la dominance du stimulus. (Tähti & Arhippainen, 2004).

Cette approche permet la collecte de données verbales et expressives au travers de dessins. Les données verbales renseignent sur la Valence, l'Arousal et la Dominance des stimuli. L'expression graphique révélera l'état d'esprit et le niveau d'affect de l'individu. La limite de cette méthode repose dans l'interprétation des dessins qui sont très subjectifs et personnels.

Approches de traitement de données supervisées

La méthode de classification supervisée consiste à définir des règles permettant de classer des objets, des images, dans des classes à partir de variables qualitatives ou quantitatives. Cette méthode est beaucoup utilisée dans la classification d'images, dans le développement d'outils de télédétection, d'outils d'analyse des expressions faciales.

Dans le cas de l'analyse supervisée, l'algorithme procédera à différentes opérations : la sélection des données (choix de variables), la stratification (découpage de l'espace en zones d'iso-raisonnement), l'apprentissage (définition des règles de décisions), la classification (application des règles de décisions), l'évaluation (confrontation du résultat de la classification avec les connaissances du terrain) et pour finir par la restitution des résultats (cartes thématiques, statistiques) (Hillion & Boucher, 1991).

Ces approches mathématiques ont permis de réaliser plusieurs analyses sur les contenus émotionnels, nous présentons ci-après quelques exemples.

Les méthodes de classification supervisées ont permis d'analyser le contenu de textes émotionnels exprimés dans Twitter. Des chercheurs ont compilé les données provenant de 15000 Tweets d'une longueur maximale de 140 caractères sur la thématique du changement climatique. Ces données ont été analysées suivant un guide d'annotations d'opinion/sentiment/émotions qui permet de classifier les contenus dans 19 classes différentes (*amour ; plaisir ; apaisement : surprise positive ; satisfaction ; accord ; valorisation ; désaccord ; dévalorisation ; insatisfaction ; mépris ; colère ; tristesse ; déplaisir ; ennui ; peur ; dérangement : surprise négative ; instruction demandée*), 3 types de polarité (*positif, négatif, inconnu*), 5 règles de relations et des données concernant les origines de la collecte. Les résultats ont montré qu'il était possible de classifier les tweets à partir d'un plan sémantique sans pour autant avoir des résultats très encourageants pour le moment (Hamon *et al.*, 2015).

D'autres travaux de recherches ont utilisé les méthodes de classification supervisées pour classifier des images suivant des contenus émotionnels en travaillant notamment sur trois points : la représentation des émotions, les caractéristiques de l'image servant à représenter les émotions et les systèmes de classification conçus pour gérer les caractéristiques distinctives des émotions (Dellandrea *et al.*, 2010). Le laboratoire du LIRIS a mis à disposition de la communauté scientifique une base de données LIRIS-ACCEDE: A Video Database for Affective Content Analysis qui a permis d'étudier le contenu émotionnel de films, de bandes sons (Baveye *et al.*, 2015). D'autres travaux menés par ce Laboratoire ont permis le développement d'un modèle de lecture des expressions faciales en 3 dimensions nommé « modèle statistique 3D de caractéristiques faciales » et ainsi d'identifier le type d'émotions en mouvement (Zhao *et al.*, 2011). Ces avancées technologiques permettent notamment d'évaluer le contenu émotionnel d'un film. C'est ce qu'ont montré des chercheurs en évaluant à l'aide d'un modèle bidimensionnel collectant la valence et l'éveil sur près de 30 films. Les résultats de leurs travaux ont montré qu'un réseau de neurones entraîné pouvait prédire le contenu émotionnel d'un film (Baveye *et al.*, 2013). En marketing, ces outils sont utilisés

pour segmenter les données d'une population après le recueil de données de consommation. Dans la caractérisation émotionnelle des produits, l'intérêt de ces outils sera de mieux cibler les consommateurs qui peuvent être touchés par l'offre commerciale.

3. Modèle multidimensionnel de préférence

Les modèles multidimensionnels de préférence permettent de traiter des données provenant des axes « Sensations » et « Emotions », dans le but de dégager les facteurs déterminants dans l'appréciation, les préférences des utilisateurs. Ces méthodes permettent également l'analyse des données provenant de différentes études réalisées préalablement et de déterminer s'il est possible d'établir des corrélations.

3.1 L'analyse conjointe

L'analyse conjointe est une méthode développée par Debreu (1960), puis par Luce et Tukey (1964). L'objectif est de déterminer quels sont les attributs qui influent le choix du consommateur lors de sa prise de décision d'achat. Cette méthode permet de déterminer parmi plusieurs composantes d'un produit (matières, couleurs, formes, prix, ...) quelles seront les composantes qui s'avéreront déterminantes pour le consommateur. Dans cette méthode le consommateur évaluera la configuration du produit qui lui paraîtra la plus satisfaisante. Dussaix *et al.* (1998) décrivent l'analyse conjointe comme étant une méthode qui permet de mesurer l'effet conjoint de plusieurs variables indépendantes (explicatives) sur l'ordre des valeurs prises par une variable dépendante (la préférence).

La méthode consiste à déterminer les différentes variables du produit (*Exemple pour un stylo ; Pointe : large, médium, fine ; Grip : dur, moyen, mou, avec relief, sans relief ; Corps : translucide, opaque, ajouré, plein ; Couleurs : blanc uni, coloré uni, imprimé, soit 180 configurations*). A l'aide d'un plan d'expérience ou de plans factoriels fractionnés orthogonaux (Green & Srinivasan, 1978), les variables seront réduites afin de présenter à un panel, des configurations représentatives des variables explicatives. Les configurations retenues sont présentées dans un tableau à un panel qui les classera par préférence. S'agissant de préférences, on préférera un panel comptant un grand nombre d'individus. Les préférences pourront être relevées suivant plusieurs techniques de classement selon l'ordre de préférence, d'échelles de notation ou de Likert (1932), de comparaison par paires. L'analyse des résultats s'effectuera en calculant les utilités partielles associées à chaque modalité de chaque attribut. Les utilités partielles correspondent au poids de la modalité dans la structure de choix de l'individu. L'analyse se fait en utilisant deux types de méthodes statistiques : L'analyse de la variance basée sur les moindres carrés ou l'analyse de la variance monotone (Kruskal, 1964 ; Petiot, 2015).

3.2 La Cartographie des préférences

Ces méthodes permettent de dégager les variables qui seront importantes pour le consommateur et ainsi d'affiner la ou les configuration(s) du produit qui satisferont le consommateur. Elles permettent également d'écarter des configurations jugées inappropriées, mais pas de relever les réactions

émotionnelles que pourraient procurer les produits, bien que la préférence informe déjà sur l'attractivité, la valeur hédonique de l'objet.

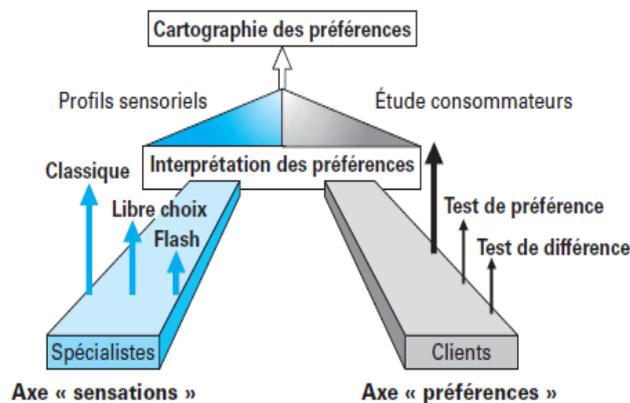


Figure 3.24 – Axe « sensations » et axe « préférences » de Crochemore et al. (2004).

Crochemore *et al.* (2004) ont présenté un modèle de cartographie des préférences également connue sur l'appellation de « preference mapping » (Greenhoff & MacFie, 1994), dans un article portant sur l'analyse sensorielle des matériaux plastiques. Ce modèle est intéressant car il établit un lien entre deux axes complémentaires « sensations » et « préférences » (Figure 3.24). L'axe « sensations » est déterminé par la méthode de sélection de descripteurs pour l'élaboration d'un profil sensoriel par approche multidimensionnelle, décrite dans la norme Afnor NF ISO 11035 (1995). L'axe « préférences » concerne l'aspect hédonique du produit ; s'il est plaisant ou déplaisant (sur une échelle de 0 à 10).

La cartographie des préférences est réalisée en croisant l'axe « sensations » et l'axe « préférences ». L'axe « sensations » permettra de caractériser la sensorialité du produit à partir de l'analyse de différents attributs. L'axe « préférences » permettra de connaître l'intensité du ressenti hédonique suivant les recommandations décrites dans la norme Afnor XP V09-501 (2010).

L'analyse des résultats s'effectuera à l'aide d'analyses factorielles : analyse en composantes principales (ACP), analyse fractionnelle discriminante (AFD), analyse procustéenne généralisée (APG).

La norme Afnor XP V 09-900 (2000) décrit dans son annexe C – Page 289 les modes de traitements des données de sous-groupes de segmentation, la segmentation « *a posteriori* » et la segmentation « *a priori* » :

- La segmentation « *a posteriori* » cherche à expliquer les ressentis, les préférences, les comportements de consommation déjà observés à l'aide d'une démarche de « cluster-based segmentation » dites « *a posteriori* » pour les regrouper en ensembles homogènes.
- La segmentation « *a priori* » cherche à expliquer les ressentis ou les préférences suivant une démarche de « rule-based segmentation ». Cette méthode permet de mettre en relation des variables à expliquer (*sensorielles, cognitives, affectives...*) avec des variables explicatives et des critères de segmentation choisies « *a priori* » et ayant fait l'objet d'enquêtes consommateurs, d'épreuves sensorielles, où les juges notent les produits selon leur appréciation (Krustal, 1964 ; Schlich, 1995 ; Callier & Schlich, 1997).

En sensométrie, la cartographie des préférences s'effectue suivant deux modèles :

- La cartographie interne des préférences (CIP) permet de relier les préférences des consommateurs aux propriétés sensorielles et physico-chimiques des produits. Cette méthode utilise la méthode de l'analyse en composantes principales pour construire une carte de préférences qui positionne les produits sur un axe bi-dimensionnel (Husson *et al.*, 2007 ; Ares *et al.*, 2011).
- La cartographie externe des préférences (CEP) propose de relier les propriétés sensorielles et physico-chimiques des produits aux préférences des consommateurs (Carroll & Wish, 1974 ; Hough & Sánchez, 1998). Dans cette méthode, les préférences des consommateurs sont traitées a posteriori. L'exploitation des données débute par une analyse préalable des propriétés sensorielles et physico-chimiques réalisée pour chaque produit et par individu à l'aide d'une analyse en composantes principales (ACP) si les données sont quantitatives et par l'analyse des correspondances multiples (ACM) si les données sont qualitatives. Le résultat de cette première étape donnera pour chaque individu les coordonnées du plan factoriel (composantes principales) qui résument l'analyse descriptive de chaque produit testé. Dans une seconde étape, ces coordonnées et les notes des préférences des consommateurs alimentent un modèle de régression. Quatre types de modèles de régression peuvent être utilisés : vecteur, circulaire, elliptique ou quadratique (Schlich, 1995 ; Kaaki *et al.*, 2012 ; Cariou *et al.*, 2014 ; Gaze *et al.*, 2015). Les résultats de cette analyse s'observent sur une grille qui représente la somme de toutes les préférences construites pour chaque individu ou par l'utilisation de modèles en pain de sucre (Danzart, 2013).

Mais ces modèles prédictifs peuvent comporter des erreurs compte-tenu de la grande variabilité dans les réponses hédoniques dues à la variété des goûts, de culture, de valeurs sociétales, de différences d'opinions (Bass *et al.*, 1972; Wilkie & Pessemier, 1973). Des expériences ont montré que la mesure des choix des consommateurs n'est pas aisée car elle n'est pas toujours constante. Des changements peuvent par exemple, complètement bouleverser les perceptions des consommateurs. L'introduction d'un nouveau produit sur le marché modifiera le niveau d'attractivité des produits déjà présents sur le marché. Certains auteurs ont montré l'existence de biais de mesure dans les évaluations qui se concentrent uniquement sur le poids des valeurs monétaires et utilitaires oubliant d'intégrer les ressentis de qualité perçue, de confort ou de critères moraux et idéologiques (Baron & Spranca, 1997; Irwin & Baron, 2001; Müller *et al.*, 2012). La fiabilité des modèles de préférences dépendra donc de la qualité du recueil des données, de la sélection des panels interrogés.

4. Conclusion

Les méthodes présentées dans ce Chapitre sont destinées principalement aux domaines de l'ingénierie, du design, du marketing. Elles permettent de quantifier la valeur perçue d'un produit et plus particulièrement d'évaluer les « besoins expérientiels » en mesurant l'appréciation de « la qualité perçue », de « la valeur émotionnelle » et du sentiment de « nouveauté ». Nous avons distingué les approches permettant de mesurer la valeur « sensorielle » du produit, des approches permettant de mesurer la valeur « hédonique » du produit.

La mesure de la sensorialité du produit permet de déterminer les perceptions collectées au travers d'une analyse organoleptique des propriétés d'un produit. Des épreuves discriminatives permettent

de constater si le panel fait une différence entre deux produits. Si le consommateur ne perçoit pas de différence, il n'y a pas d'intérêt à poursuivre les tests. En revanche, si les participants aux épreuves perçoivent une différence, il est nécessaire de déterminer quelle est la nature de cette différence. Des épreuves descriptives permettent de décrire la sensorialité du produit au travers d'une liste de descripteurs constituant un espace sémantique, d'identifier la nature d'une différence. Si plusieurs produits doivent être comparés, il faudra enrichir l'espace sémantique constitué par des descripteurs « convergents » qui rendront possible la comparaison. L'étude approfondie de cet espace sémantique est basée sur une évaluation sensorielle permettant de positionner les sensations procurées par le produit. La comparaison sensorielle de deux produits sera réalisée grâce à l'estimation qualitative et quantitative des descripteurs. Cette étude permettra d'identifier la nature de la différence. Mais la sensorialité effective du produit peut-être plus ou moins désagréable ou agréable.

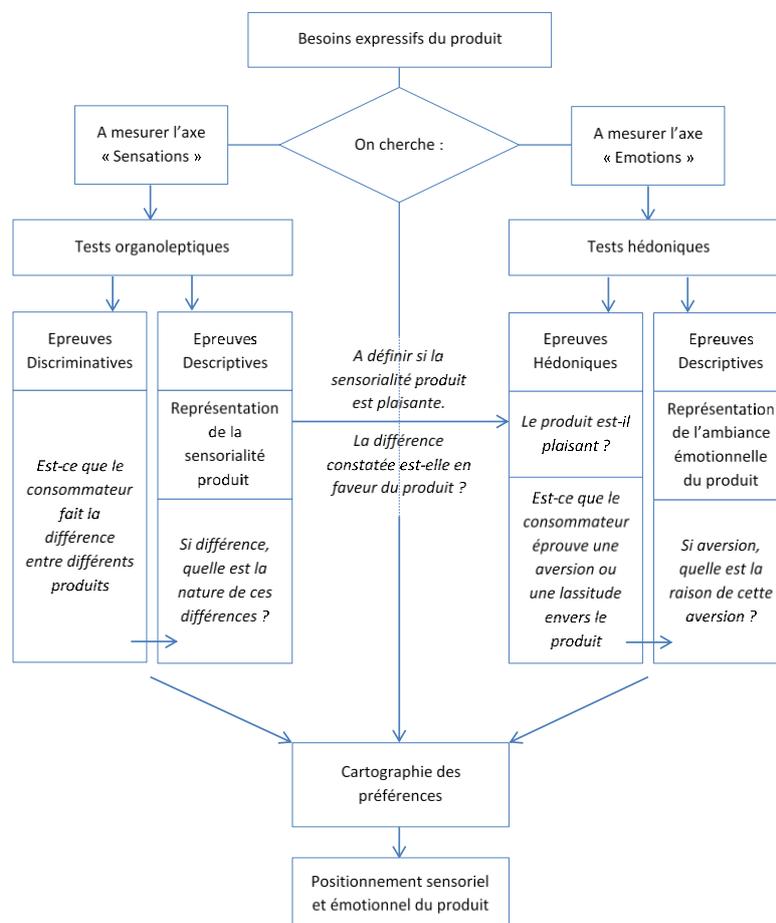


Figure 3.25. Méthodologie d'évaluation des besoins expressifs d'un produit

La mesure de la valeur hédonique permet d'établir si la sensorialité du produit paraît déplaisante, neutre ou plaisante. L'étude de l'espace sémantique permettra de positionner l'ambiance émotionnelle procurée par le produit. L'acceptabilité viendra de l'analyse des deux composantes « Sensorielles » et « Emotionnelles » traitées au travers de la cartographie des préférences. L'approche permettant l'analyse des « besoins expressifs du produit » est résumée sous la forme du tableau de la Figure 3.25. Nous présentons dans le Chapitre 4 un modèle multidimensionnel de préférence qui intègre des données provenant de l'axe « Sensations » et des données provenant de l'axe « Emotions ».

CHAPITRE 4

ETUDES DE CAS

Nous avons vu dans les chapitres précédents que plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour recueillir des données « sensorielles » et « émotionnelles », mais que ces données prises individuellement ne permettent pas de prédire si le futur produit dispose d'une identité émotionnelle ou des caractéristiques suffisantes pour déclencher son achat (Underhill, 1999). Pour déterminer quels attributs sont susceptibles de retenir l'attention du consommateur, on utilise généralement d'autres méthodes comme la cartographie des préférences (Crochemore *et al.*, 2004).

La cartographie des préférences est utilisée pour établir des relations entre les données sensorielles et les préférences du consommateur afin d'identifier quels facteurs doivent être améliorés ou changés pour maximiser l'acceptabilité. Dans ce cadre, l'axe « Sensations » est évalué à l'aide de tests organoleptiques qui traduisent la sensorialité des attributs sensoriels, les préférences sont évaluées à partir de tests consommateurs et/ou d'épreuves de préférences. Ces approches sont décrites dans le Chapitre 3. Dans ces méthodes, lorsque les données qui permettent de renseigner sur les « besoins » sont obtenues en suivant une approche supervisée, elles comportent des biais de réponses qui peuvent conduire le concepteur à surestimer certaines caractéristiques du produit. L'adoption d'une analyse multifactorielle, réalisée suivant une approche non-supervisée, permettra de faire émerger le véritable besoin et d'améliorer la capacité de prédiction des choix du futur consommateur (Silk & Urban, 1978).

Il faut noter que l'analyse des préférences permet d'identifier les différences que le consommateur identifie entre les composantes utilitaires et hédoniques d'un produit, mais cette approche ne renseigne pas sur la valeur émotionnelle du produit. Il s'agit principalement d'estimer le poids des attributs qui compteront le plus dans la décision d'achat (Green *et al.*, 1973 ; Tversky *et al.*, 1988 ; Green & Srinivasan, 1990). Une partie de ces préférences provient de la valeur utilitaire estimée au travers d'une analyse des aspects fonctionnels et des niveaux de performance qu'offre le produit. L'autre partie provient de l'analyse des valeurs hédoniques du produit considérées par l'estimation du niveau d'attractivité du produit.

Nous proposons dans ce chapitre un modèle multidimensionnel de préférence qui permet la prise en compte et l'intégration de données obtenues par une analyse des préférences et par une évaluation émotionnelle. Le modèle multidimensionnel de préférence permet d'une part de déterminer quels sont les attributs déterminants dans l'acceptabilité du consommateur, et d'autre part d'analyser les préférences en tenant compte de mesures déclarative de la valeur émotionnelle. L'adjonction de ces mesures permet d'affiner le modèle prédictif en renforçant les connaissances émotionnelles de l'objet.

Dans un premier temps, nous décrivons les bases théoriques du modèle multidimensionnel de préférence, puis nous l'appliquons à deux cas de conception. Une première étude de cas portera sur l'identification des attributs saillants susceptibles de motiver l'achat dans le cadre de la conception d'un nouveau gant de cuisine. Une seconde étude de cas portera sur l'analyse des critères utilitaires et hédoniques de chaises qui motiveront l'achat dans un contexte de commerce électronique.

1. Description du modèle multidimensionnel de préférence

Le modèle multidimensionnel de préférence qui a été développé repose sur les travaux de Toscano (2018). Son schéma général est décrit dans la Figure 4.1. L'approche est basée sur trois niveaux :

- La définition de l'espace produit ;
- Le processus d'évaluation des axes « Sensations » et « Emotions » ;
- Le traitement des données à l'aide d'un opérateur d'agrégation.

Cette approche mène à une décision finale qui peut être considérée comme un ensemble de recommandations pour la conception du produit final.

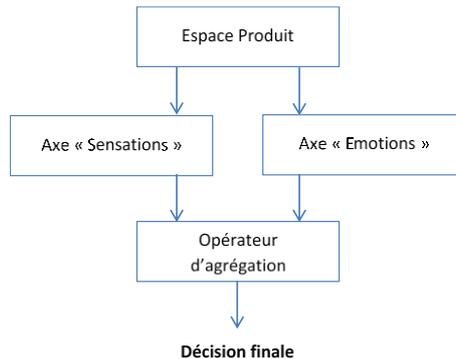


Figure 4.1 - Méthodologie de conception proposée

1.1 Définition de l'espace produit

L'espace produit, noté \mathbf{P} , est un ensemble de configurations (ou produits), notés \mathbf{x} . Cet ensemble contient une configuration (ou un produit) permettant de satisfaire les attentes du futur consommateur. Pour chaque configuration \mathbf{x} , les mesures sensorielles et émotionnelles sont représentées respectivement sous la forme de fonctions $\mathbf{S}(\mathbf{x})$ et $\mathbf{E}(\mathbf{x})$. La fonction $\mathbf{S}(\mathbf{x})$ contient les mesures de l'axe « Sensations », qui augmentent lorsque la configuration \mathbf{x} du produit est bien perçue. De même, la fonction $\mathbf{E}(\mathbf{x})$ contient les mesures de l'axe « Emotions », qui augmentent lorsque l'émotion ressentie au contact du produit \mathbf{x} est agréable. Le problème est donc de trouver \mathbf{x} dans l'espace \mathbf{P} qui maximise $[\mathbf{S}(\mathbf{x}), \mathbf{E}(\mathbf{x})]^T$.

Si les fonctions $\mathbf{S}(\mathbf{x})$ et $\mathbf{E}(\mathbf{x})$ étaient connues, le problème d'optimisation associé serait relativement facile. Mais, dans la pratique, ces fonctions sont inconnues, car il est difficile de relier les données provenant des axes « Sensations » et « Emotions ». Pour les relier, il est nécessaire de constituer un jeu de données qui présente les résultats d'évaluation de toutes les sensations et émotions associées à chaque produit ou configuration \mathbf{x} . En général, ces évaluations sont très coûteuses en temps. Par conséquent, la dimension de l'espace produit doit être raisonnable. Nous utilisons dans ce modèle la notion de structure conjointe pour limiter cette dimension.

L'espace produit \mathbf{P} est dit avoir une structure conjointe s'il peut être défini à l'aide de n attributs ou facteurs \mathbf{A}_i ($i=1, \dots, n$), composés chacun de m_i éléments ou niveaux d'attributs a_{ij} ($j = 1, \dots, m_i$). L'espace produit est alors le produit cartésien de ces attributs, $\mathbf{P} = \mathbf{A}_1 \times \mathbf{A}_2 \times \dots \times \mathbf{A}_n$, et une configuration est représentée par un vecteur \mathbf{x} contenant n niveaux d'attributs a_{ij} , l'indice j prenant pour chaque indice i une des m_i valeurs particulières de l'attribut \mathbf{A}_i .

Avec ces définitions, la cardinalité de l'espace produit est donnée par le produit des cardinalités de chaque attribut A_i et, lorsque tous les attributs ont le même nombre de niveaux m (pour tout i , $m_i=m$), cette cardinalité vaut m^n . Par exemple, un ensemble de pneus peut être défini comme une structure conjointe avec trois attributs : type = {route, tout-terrain, sport}, durée de vie = {80 000 km, 96 000 km, 112 000 km} et prix = {70 k€, 80 k€, 90 k€}. Un pneu x est alors un vecteur de l'espace produit $P = \text{type} \times \text{durée de vie} \times \text{le prix}$ comme, par exemple, $x^T = [\text{route}, 112\ 000\ \text{km}, 90\ \text{k€}]$

La cardinalité de l'ensemble P peut être réduite en introduisant un sous-ensemble $P_S \subset P$ qui préserve autant que possible les informations qui peuvent provenir de l'ensemble P . Si nous sélectionnons deux produits similaires x_1 et x_2 de P , cela ne donne pas plus d'informations que ce qui pourrait être obtenu en considérant uniquement x_1 ou uniquement x_2 . La mesure des écarts entre les produits est le critère utilisé pour estimer leurs similarités, et donc classer les différentes configurations (ou produits) dans l'espace produit. Formellement, deux produits x_1 et x_2 de P sont dits différents si le produit scalaire $x_1^T \cdot x_2$ est petit devant les autres. Ainsi, la manière de générer un sous-ensemble $P_S \subset P$ consiste à sélectionner N produits de P qui sont quasiment orthogonaux. Dans la suite du document, nous noterons P_S l'espace produit, et N le nombre de produits ou configurations dans cet espace.

Dans l'exemple des pneus mentionné ci-dessus, l'attribut type = {route, tout-terrain, sport} peut être représenté par des valeurs numériques, par exemple type = {0 ; 0,5 ; 1}, et les autres valeurs d'attributs sont divisées par la valeur maximale, soit durée de vie = {0,714 ; 0,857 ; 1} et prix = {0,778 ; 0,889 ; 1}, puis les produits scalaires sont estimés de façon classique. Ainsi, l'écart entre $x_1 = [\text{route} ; 112\ 000\ \text{km} ; 90\ \text{k€}]^T$ et $x_2 = [\text{sport} ; 80\ 000\ \text{km} ; 70\ \text{k€}]^T$ vaut $x_1^T \cdot x_2 = 0 + 0,714 + 0,778 = 1,492$, tandis que l'écart entre x_1 et $x_3 = [\text{tout-terrain} ; 80\ 000\ \text{km} ; 90\ \text{k€}]^T$ vaut $x_1^T \cdot x_3 = 0 + 0,714 + 1 = 1,714$. Il y a donc selon ce modèle plus d'écart entre les configurations x_1 et x_2 qu'entre x_1 et x_3 , car le produit scalaire $x_1^T \cdot x_2$ est plus petit que $x_1^T \cdot x_3$.

1.2 Evaluation de l'axe « Sensations »

L'évaluation de l'axe « Sensations » peut être conduit selon deux approches distinctes, à savoir l'évaluation sensorielle et l'étude des préférences. L'évaluation sensorielle est utilisée pour caractériser le produit, ou certaines parties du produit, à partir d'une sélection d'attributs sensoriels liés à nos sens. Dans notre modèle, l'évaluation sensorielle est utilisée pour mesurer, analyser et interpréter les propriétés organoleptiques des produits, matériaux à partir de nos 5 sens : la vue, l'odorat, le goût, le toucher et l'ouïe. Dans la Figure 4.2, nous présentons un profil sensoriel réalisé à partir de l'évaluation de cinq attributs A_1 à A_5 , par des niveaux allant de 0 à 1 par pas de 0,1.

La signature sensorielle de « référence » est obtenue en agrégeant les signatures sensorielles données par chaque expert. Elle peut être considérée comme une variable randomisée multivariée principalement caractérisée par sa valeur moyenne et sa matrice de variance-covariance, mais il existe de nombreuses autres approches d'opérateurs d'agrégation, par exemple utilisant une méthode de logique floue. Une description plus complète du problème d'agrégation peut être trouvée dans la littérature (Detyniecki, 2000 ; Toscano & Lyonnet, 2002). Par souci de simplicité, l'opérateur d'agrégation utilisé est la valeur moyenne, qui donne à chaque produit sa propre signature sensorielle.

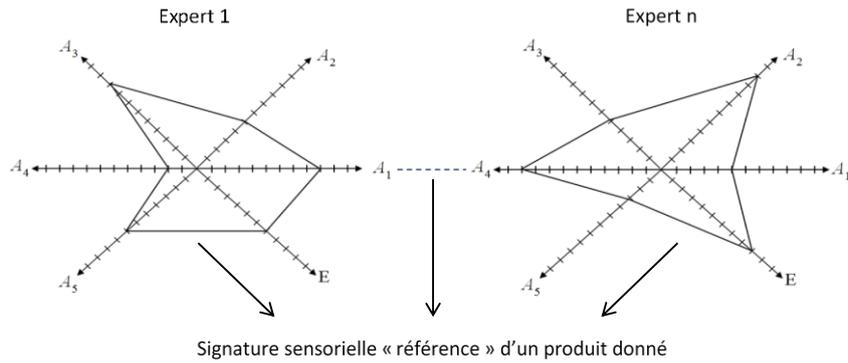


Figure 4.2 - Exemple de signatures sensorielles pour un produit donné

1.3 Développements mathématiques sur l'étude des préférences

Dans l'évaluation sensorielle, le panéliste expert est uniquement invité à donner une note liée à l'ensemble des attributs sensoriels qui lui sont proposés. Cette méthode permet d'établir une représentation de la « sensorialité d'un produit » sur un diagramme « radar ». Mais connaître la sensorialité du produit, n'informe pas sur la préférence. Pour connaître les préférences de consommateurs, le concepteur devra réaliser une évaluation des préférences.

L'évaluation des préférences se fait en demandant au panel d'évaluer ses préférences dans l'espace produit réduit P_s . Plus précisément, chaque participant doit être en mesure de donner sa préférence entre deux produits de P_s présentés. Cette procédure est connue sous le nom de comparaison par paires. Pour N produits, chaque participant doit effectuer $N(N-1)/2$ comparaisons par paires, et si n représente le nombre de participants, nous avons n fois $N(N-1)/2$ évaluations.

Cette comparaison par paires permet d'estimer la probabilité pour qu'une configuration donnée soit préférée à une autre. Sous forme vectorielle, l'évaluation de la préférence donnée par le $k^{\text{ième}}$ participant pour le produit x_i par rapport aux produits x_{i+1} à x_N est donnée par

$$p_i^k = [p_{i,i+1}^k, p_{i,i+2}^k, \dots, p_{i,N}^k], \quad i = 1, \dots, N - 1$$

où $p_{i,j}^k$, $j = i + 1, \dots, N$ est défini par $p_{i,j}^k = 1$ si le produit x_i est préféré au produit x_j par le $k^{\text{ième}}$ participant et vaut 0 sinon. La proportion de participants préférant le produit x_i au produit x_j , $j=i+1, \dots, N$ est alors donnée par

$$p_{ij} = \frac{1}{Pn} \sum_{k=1}^n p_{ij}^k \quad (4.1)$$

Cette proportion peut être considérée comme la probabilité que le produit x_i soit préféré au produit x_j . Ces probabilités sont en général difficilement exploitables dans le cadre des modèles de préférence qui nécessite d'avoir une valeur d'importance pour chaque produit. La loi de Thurstone des jugements comparatifs permet de manière systématique d'affecter une valeur de préférence pour chaque produit conformément aux p_{ij} (Viaene & Januszewska, 1927). Via cette transformation

plus la valeur de préférence est élevée, plus le produit est approprié. Dans ce qui suit, nous noterons par y_i la valeur de préférence du produit x_i .

A présent, le problème est d'exploiter ces valeurs de préférence pour concevoir un nouveau produit ayant une bonne acceptabilité par l'utilisateur. À cette fin, il est important de déterminer quel niveau de chaque attribut est préféré ainsi que l'importance relative de chaque attribut dans l'évaluation des préférences. Cela peut se faire via une régression adaptée à cette problématique que nous nommerons « régression au sens des moindres carrés sur les attributs ».

Régression au sens des moindres carrés sur les attributs

Soit \mathbf{X} la matrice contenant en ligne les configurations (ou produits) \mathbf{x}_i^T de l'espace \mathbf{P}_s , et soit y_i leur valeur de préférence :

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1^T \\ \vdots \\ \mathbf{x}_N^T \end{pmatrix} \text{ et } y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Par exemple, considérons trois attributs **A**, **B** et **C**, ayant chacun trois niveaux, $\mathbf{A} = \{a_1, a_2, a_3\}$, $\mathbf{B} = \{b_1, b_2, b_3\}$ et $\mathbf{C} = \{c_1, c_2, c_3\}$, dans un espace produit \mathbf{P}_s composé de neuf configurations ayant chacune une valeur de préférence :

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_3 \\ a_1 & b_2 & c_1 \\ a_1 & b_3 & c_2 \\ a_2 & b_1 & c_2 \\ a_2 & b_2 & c_3 \\ a_2 & b_3 & c_1 \\ a_3 & b_1 & c_2 \\ a_2 & b_2 & c_1 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix} \text{ et } y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \\ y_9 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Où a_1 correspond au niveau 1, a_2 au niveau 2 et a_3 au niveau 3 de l'attribut A. Mêmes choses pour les attributs B et C. Sans perte de généralité, on suppose que les niveaux d'un attribut sont des variables qualitatives (*par exemple : une forme, une couleur, etc.*). Notons que dans le cas où les niveaux d'un attribut donné sont numériques, ceux-ci peuvent toujours être considérés comme des variables qualitatives via un codage approprié. Cette hypothèse n'est réalisée uniquement que pour une question d'homogénéité. Ainsi nous n'aurons pas à considérer le cas hétérogène où certains niveaux sont qualitatifs et d'autres numériques.

Pour déterminer l'importance de chaque niveau d'un attribut donné et l'importance relative de chaque attribut, l'approche consiste à faire une régression linéaire par rapport à chaque attribut. Par exemple pour déterminer l'importance de chaque niveau de l'attribut A on recherche un modèle linéaire de la forme suivante

$$a(\xi_1, \xi_2) = w_{a0} + w_{a1}\xi_1 + w_{a2}\xi_2 = [1 \quad \xi_1 \quad \xi_2] \begin{bmatrix} w_{a0} \\ w_{a1} \\ w_{a2} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Où $a(\xi_1, \xi_2)$ représente le niveau d'importance des niveaux de l'attribut A, w_{a0}, w_{a1}, w_{a2} sont les coefficients du modèle à déterminer, et ξ_1, ξ_2 , sont des variables fictives utilisées pour coder les niveaux a_1, a_2 et a_3 de l'attribut A. De manière similaire, les modèles postulés pour représenter l'importance des niveaux des attributs B et C s'écrivent comme suit

$$\begin{cases} b(\xi_1, \xi_2) = w_{b0} + w_{b1}\xi_1 + w_{b2}\xi_2 \\ c(\xi_1, \xi_2) = w_{c0} + w_{c1}\xi_1 + w_{c2}\xi_2 \end{cases} \quad (4.5)$$

Dans notre contexte (niveaux qualitatifs), les variables fictives sont codées en binaire et ne peuvent donc prendre que deux valeurs 0 ou 1. Notons que nous avons utilisé deux variables fictives pour coder 3 niveaux, ce qui est suffisant car 2 variables binaires permettent de coder 4 niveaux (2^2). Dans l'exemple considéré le premier niveau peut être codé par (0, 1), le second par (1,0) et le troisième par (0,0). Ce codage est purement arbitraire et n'a pas d'influence sur les résultats de l'étude. Simplement seuls les coefficients seront modifiés en conséquence. Etant donné le codage adopté, la matrice X_w utilisée pour calculer les coefficients du modèle est la suivante

$$X_w = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Notons que dans cette matrice les niveaux sont dans l'ordre : niveau 1 (0,1), niveau 2 (1,0) et niveau 3 (0,0). Le vecteur des coefficients de chacun des modèles $w_a = [w_{a0}, w_{a1}, w_{a2}]^T$, $w_b = [w_{b0}, w_{b1}, w_{b2}]^T$ et $w_c = [w_{c0}, w_{c1}, w_{c2}]^T$, peuvent alors être calculés à l'aide de la formule classique des moindres carrés

$$\begin{cases} w_a = (X_w^T \cdot X_w)^{-1} \cdot X_w^T \cdot y_a \\ w_b = (X_w^T \cdot X_w)^{-1} \cdot X_w^T \cdot y_b \\ w_c = (X_w^T \cdot X_w)^{-1} \cdot X_w^T \cdot y_c \end{cases} \quad (4.7)$$

Où y_a est le vecteur des évaluations correspondant aux niveaux 1, 2 et 3 de l'attribut A, de même pour les vecteurs y_b et y_c , on a

$$y_a = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \\ y_9 \end{pmatrix}, y_b = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_4 \\ y_7 \\ y_2 \\ y_5 \\ y_8 \\ y_3 \\ y_6 \\ y_9 \end{pmatrix}, y_c = \begin{pmatrix} y_2 \\ y_6 \\ y_8 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_7 \\ y_1 \\ y_5 \\ y_9 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

Ainsi la relation (4.7) nous permet de déterminer les vecteurs des coefficients des modèles (4.4) et (4.5). Nous sommes alors en mesure d'évaluer l'importance de chaque niveau d'un attribut donné ainsi que l'importance relative de chaque attribut sur la préférence.

Evaluation de l'importance de chaque niveau d'un attribut

L'importance du niveau a_1 de l'attribut A est donné par $a(\xi_1 = 0, \xi_2 = 1)$, en effet (0,1) représente le codage du niveau 1. D'après la relation (4.4) on a donc

$$a(\xi_1 = 0, \xi_2 = 1) = w_{a0} + w_{a2} \quad (4.9)$$

De la même façon, les importances des niveaux a_2 codé (1,0) et a_3 codé (0,0) sont données, respectivement par

$$a(\xi_1 = 1, \xi_2 = 0) = w_{a0} + w_{a1} \quad (4.10)$$

Et

$$a(\xi_1 = 0, \xi_2 = 0) = w_{a0} \quad (4.11)$$

La plage de variation, notée r_a , des niveaux de l'attribut A est donc donnée par

$$r_a = \max(w_{a0} + w_{a2}, w_{a0} + w_{a1}, w_{a0}) - \min(w_{a0} + w_{a2}, w_{a0} + w_{a1}, w_{a0}) \quad (4.12)$$

Des calculs analogues à (4.9), (4.10), (4.11) et (4.12), s'appliquent aux attributs B et C.

Importance relative de chaque attribut sur la préférence

Soit r_a , r_b , et r_c la plage de variation des niveaux des attributs A, B et C respectivement. Les importances relatives I_A , I_B , I_C , sont définies comme suit

$$I_A = \frac{r_a}{r_a + r_b + r_c}, I_B = \frac{r_b}{r_a + r_b + r_c}, I_C = \frac{r_c}{r_a + r_b + r_c} \quad (4.13)$$

Notons que la somme des importances relatives est égale à 1. Les différentes étapes de l'approche développée ci-dessus seront illustrées sur l'étude de cas de la section 2.

1.4 Evaluation de l'axe « Emotions »

Cette étape du modèle consiste à évaluer la valeur émotionnelle d'un produit donné. On pourrait s'attendre à ce que les résultats de l'évaluation émotionnelle des caractéristiques du produit donnent les mêmes résultats que ceux de l'étude des préférences, mais en réalité la mesure de l'évaluation émotionnelle donnera un tout autre niveau d'informations. L'évaluation émotionnelle renseignera sur les réponses émotionnelles que produisent l'usage, les fonctions, le contact, la vue, l'audition, le goût, l'olfaction, les caractéristiques du produit, ... alors que l'étude des préférences permettra de classer les produits ou les caractéristiques d'un produit ; par exemple la matière 3 est préférée à la matière 1, elle-même préférée à la matière 2. L'évaluation émotionnelle permet d'évaluer l'émotion selon deux dimensions : la valence, si le stimulus paraît agréable ou désagréable, et l'arousal, qui est le niveau d'activation corporel produit par le stimulus suivant le Modèle Circumplex déjà présenté dans le Chapitre 2 (Russel, 1980). Cette mesure émotionnelle donnera la « valeur émotionnelle » de l'objet du produit.

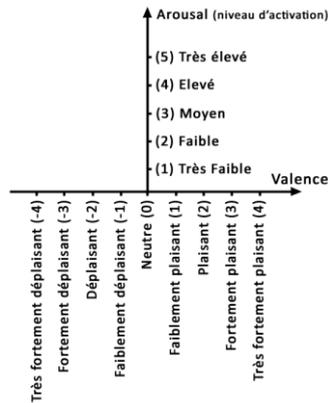


Figure 4.3 - Descripteurs sémantiques utilisés pour l'évaluation du couple (valence, arousal)

Comme décrit dans la Figure 4.3, l'évaluation émotionnelle des caractéristiques du produit se fait par auto-évaluation via une double échelle de Likert (Likert, 1932), dans laquelle chaque grade est associé à un descripteur sémantique. La valence est évaluée sur une échelle allant de - 4, pour une sensation « très fortement désagréable », à 4, pour une sensation « très fortement agréable ». De même, l'arousal est évalué sur une échelle allant de 0 pour « neutre », c'est-à-dire sans activation, à 5 pour un niveau d'activation « très élevé ». Il convient de souligner que les graduations présentées dans la Figure 4.3 ne sont pas strictement exprimées en nombres, mais que seuls les symboles sont représentés par des descripteurs sémantiques. En d'autres termes, l'échelle est de type ordinal.

Un traitement correct de l'évaluation ordinale nécessitera de définir en amont la signification ou la sémantique des descripteurs utilisés. Le modèle proposé nécessite uniquement l'évaluation de la valence et de l'arousal pour estimer l'émotion globale ressentie par les participants qui interagissent avec le produit considéré.

Dans ce modèle, la valence et l'arousal sont considérés comme des variables linguistiques, c'est-à-dire des variables qui prennent des valeurs linguistiques (Zadeh, 1975).

Formellement, une variable linguistique est définie par le triplet $\{x, T(x), X\}$ où x est le nom de la variable, $T(x)$ représente l'ensemble des valeurs linguistiques prises par x . Une valeur linguistique de $T(x)$ est définie à l'aide d'un sous-ensemble flou de l'ensemble X qui représente le domaine de variation de la variable x . Dans notre cas, les deux variables sont :

$$\begin{aligned} \text{Valence} &= \{v, T(v) = \{\text{très fortement désagréable}, \dots, \text{très fortement agréable}\}, X_v = \{-4, \dots, 4\}\} \\ \text{Arousal} &= \{a, T(a) = \{\text{neutre}, \dots, \text{très intense}\}, X_a = \{0, \dots, 5\}\} \end{aligned}$$

La signification des attributs de $T(v)$ et $T(a)$ est définie par des ensembles flous sur X_v et X_a respectivement. On notera V_i ($i = -4, \dots, 4$) l'ensemble flou utilisé pour définir l'élément numéro i de $T(v)$. De même, A_i ($i = 0, \dots, 5$) est l'ensemble flou utilisé pour définir l'élément numéro i de $T(a)$. Par exemple, V_{-1} représente la valeur floue associée à la valeur sémantique « légèrement désagréable » de $T(v)$ et A_1 représente l'ensemble flou associé à la valeur linguistique « très faible » de $T(a)$.

Ces ensembles flous V_i et A_i sont respectivement définis par des fonctions d'appartenance μ_{V_i} et μ_{A_i} , qui plongent X_v et X_a dans l'intervalle $[0,1]$.

$$\tilde{V}_i = \{(v, \mu_{\tilde{V}_i}(v)) \mid v \in X_v\}, \text{ avec } \mu_{\tilde{V}_i}(v) : X_v \rightarrow [0,1], \text{ pour } i = -4, \dots, 4 \quad (4.14)$$

$$\tilde{A}_i = \{(a, \mu_{\tilde{A}_i}(a)) \mid a \in X_a\}, \text{ avec } \mu_{\tilde{A}_i}(a) : X_a \rightarrow [0,1], \text{ pour } i = 0, \dots, 5 \quad (4.15)$$

Nous avons choisi dans ce modèle des fonctions d'appartenance en forme de cloches, avec une valeur modale égale à la note de l'étiquette linguistique correspondante, et avec un facteur d'échelle de longueur permettant un chevauchement entre les étiquettes linguistiques. Ce chevauchement signifie qu'il n'y a pas de changements brusques entre une valeur linguistique et une autre. Ceci est conforme à la façon dont l'humain évalue une situation perçue. Les fonctions d'appartenance pour les valeurs linguistiques des variables valence et arousal sont ainsi définies comme suit :

$$\mu_{\tilde{V}_i}(v) = e^{-(v-i)^2}, \text{ pour } i = -4, \dots, 4 \quad (4.16)$$

$$\mu_{\tilde{A}_i}(a) = e^{-(a-i)^2}, \text{ pour } i = 0, \dots, 5 \quad (4.17)$$

A partir de ces deux ensembles flous, nous définissons un prototype émotionnel, noté \tilde{E}_{ij} comme un point flou de l'espace bidimensionnel défini par le produit cartésien $X_v \times X_a$ partitionné par les valeurs linguistiques des variables floues v et a . Formellement le prototype flou \tilde{E}_{ij} est donné par $\tilde{E}_{ij} = \tilde{V}_i \times \tilde{A}_j$. La fonction d'appartenance de ce prototype émotionnel est donnée par :

$$\mu_{\tilde{E}_{ij}}(v, a) = \min(\mu_{\tilde{V}_i}(v), \mu_{\tilde{A}_j}(a)), \text{ pour } i = -4, \dots, 4 \text{ et } j = 0, \dots, 5 \quad (4.18)$$

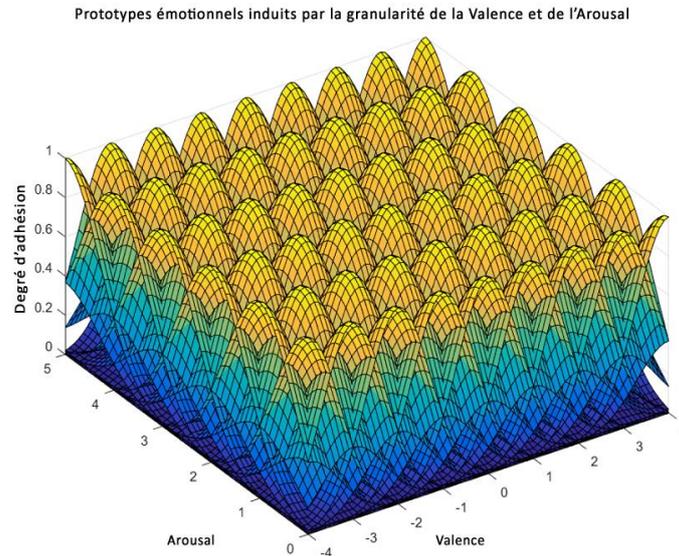


Figure 4.4 - Les prototypes émotionnels induits par la granularité de la valence et de l'arousal

La Figure 4.4 montre les prototypes émotionnels ainsi créés, en fonction de la valence et de l'arousal. L'objectif du modèle d'évaluation floue émotionnel dans ce document est de déterminer le prototype émotionnel ressenti par un ensemble de participants interagissant avec un produit donné. Pour ce faire, nous devons agréger les évaluations émotionnelles données par chaque participant.

Nous utilisons pour cela une combinaison linéaire convexe des différents prototypes, où les coefficients sont liés aux notations faites par chaque participant sur les échelles ordinaires :

$$\mu_{\tilde{E}_k}(v, a) = \sum_{i=-4}^4 \sum_{j=0}^5 \alpha_{ij}^k \mu_{E_{ij}}(v, a) , \text{ pour } k = 1, \dots, N \quad (4.19)$$

Dans cette équation, les coefficients α_{ij}^k représentent la proportion de participants qui ont sélectionné le couple $(\tilde{V}_i, \tilde{A}_j)$ lorsqu'ils ont interagi avec le produit N°k (i.e. la configuration \mathbf{x}_k) de l'espace produit \mathbf{P}_5 . Pour obtenir le prototype émotionnel \tilde{E}_{ij} le plus proche de l'évaluation donnée par l'équation (4.13), on minimise la distance $d_{ij}(\tilde{E}_k)$, entre ce prototype \tilde{E}_{ij} et l'évaluation \tilde{E}_k , définie par :

$$d_{ij}(\tilde{E}_k) = \sqrt{\sum_{m=-4}^4 \sum_{n=0}^5 (\mu_{E_k}(m, n) - \mu_{\tilde{E}_{ij}}(m, n))^2} \quad (4.20)$$

L'évaluation émotionnelle globale du produit \mathbf{x}_k est alors associée au prototype émotionnel \tilde{E}_{ij} pour lequel la distance $d_{ij}(\tilde{E}_k)$ est minimale.

1.5 Opérateur d'agrégation

A cette étape nous disposons de deux informations pour chaque produit x_k de l'espace produit P_5 , c'est à dire une valeur de préférence y_k et un prototype émotionnel \tilde{E}_k . Afin d'obtenir un indicateur global de l'acceptabilité par l'utilisateur des produits considérés, nous devons tenir compte à la fois de la valeur de préférence et de l'évaluation émotionnelle. A cette fin nous devons définir un opérateur d'agrégation permettant de combiner ces deux informations (la valeur de préférence et le prototype émotionnel). Dans ce cadre nous avons défini l'opérateur d'agrégation (4.21) donnant la mesure u_k de l'acceptabilité par l'utilisateur du produit N° k :

$$u_k = \alpha_1 y_k + \alpha_2 N(\tilde{E}_k) \quad (4.21)$$

Dans cette équation, y_k est la valeur de préférence du produit N° k , obtenue par une analyse conjointe sur l'axe « Sensations », \tilde{E}_k est le prototype émotionnel de ce produit, et α_1 et α_2 sont des coefficients définis pour refléter l'importance accordée aux deux types d'évaluation (axe « Sensations » et axe « Emotions »). Dans notre modèle, nous avons choisi une importance analogue de ces deux types d'évaluation, de sorte que $\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{1}{2}$, ce qui représente la valeur moyenne de y_k et $N(\tilde{E}_k)$. La fonction $N(.)$ est définie de la façon suivante :

$$N(\tilde{E}_k) = v_k + \text{sgn}(v_k) a_k \quad (4.22)$$

Où $\text{sgn}(.)$ représente la fonction signe, v_k et a_k sont respectivement la valence et l'arousal telles que $\mu_{\tilde{E}_k}(v_k, a_k) = 1$, c'est à dire le noyau de \tilde{E}_k . La signification de cet opérateur est que pour un produit ressenti comme désagréable, la mesure d'acceptabilité tend à décroître et vice versa.

2. Analyse des préférences sur des gants de cuisine

Cette étude de cas vise à étudier l'intérêt d'un nouveau concept en le comparant avec des produits existants qui peuvent être trouvés sur le marché. Ce nouveau concept que nous appellerons « pince-plats » permettrait de manipuler des assiettes, plats, tasses, matières chaudes provenant d'un four ou d'un micro-ondes. Ce concept aurait l'avantage d'être plus léger qu'un gant de cuisine classique et pourrait être apposé sur un support à côté d'un four pour permettre une prise en main rapide et simplifiée. Ce « pince-plats » pourrait être réalisé en silicone thermo-chromique dans le but de prévenir des brûlures à l'aide de l'utilisation d'un code couleur qui informe l'utilisateur sur la température des plats ou des autres matières avec lesquels il pourrait être en contact (Figure 4.5).



Figure 4.5 – Concept du pince-plats

L'objectif de cette étude est de vérifier dans un premier temps si notre modèle multidimensionnel de préférence permet d'identifier les attributs utilitaires ou hédoniques qui seront déterminants dans l'acceptabilité du consommateur et dans un second temps d'intégrer dans ce modèle des mesures de la valeur émotionnelle de l'objet dans le but d'améliorer le modèle prédictif. L'application de ce modèle permettra de déterminer l'importance de chaque attribut de manière à en déduire la préférence. L'opérateur d'agrégation permettra d'obtenir pour chaque configuration « produit » un score d'acceptabilité.

Pour étudier l'intérêt de ce nouveau concept, nous avons commencé par sélectionner un espace produit assez représentatif des produits présents sur le marché (Figure 4.6). Il doit être suffisamment large pour présenter l'ensemble des configurations « produit » existantes. L'étude de cet espace produit nous a permis de déterminer l'objet de notre étude, à savoir : un concept de gant de cuisine destiné aux particuliers. Pour connaître le potentiel du concept « pince-plats », il est nécessaire d'évaluer ses caractéristiques en comparant le nouveau concept aux gants de cuisine classiques. La visite de plusieurs points de vente a révélé que les principaux concurrents à notre concept étaient les gants en silicone et les moufles en coton / polyester (Figure 4.7).

Cette étude préalable, nous a permis de décomposer l'espace produit sélectionné en quatre variables (*forme, matériau, couleur et prix*) qui seront utilisées pour réaliser l'analyse des préférences.



Figure 4.6 – Espace produit préalable



Figure 4.7 - Les trois types de forme du gant de cuisine

2.1 Protocole expérimental

Pour réaliser cette étude de cas, 20 étudiants (11 femmes, 9 hommes) âgés de 22 à 37 ans ont été recrutés. Ces 20 participants ont été conviés à des entretiens individuels d'une durée de 50 minutes. Le participant était accueilli dans une salle lumineuse éclairée avec un éclairage naturel, puis installé sur une chaise confortable face à l'animateur. Au départ, l'animateur informait le participant de l'objectif du test et demandait l'accord du participant pour procéder aux différentes expérimentations. Comme évoqué dans la méthodologie présentée ci-avant, il s'agissait d'effectuer i) l'évaluation émotionnelle et ii) l'étude des préférences.

Nous avons commencé notre expérimentation par réaliser les évaluations émotionnelles des gants de cuisine en réalisant un test d'essayage des gants en aveugle. Ces mesures émotionnelles ont été réalisées avec le Model Circumplex de Russel (1980) qui collecte deux dimensions : la valence et l'arousal. Dans ce Modèle, la valence est exprimée sur une échelle de cotation allant de (- 4) très fortement déplaisant à (4) très fortement plaisant et l'arousal est évalué sur une échelle allant de (0) neutre à (5) très élevé. Comme nous l'avons expérimenté dans le Chapitre 2, ce premier test permettait de mesurer la réaction émotionnelle « brute » qui intervient dès le premier toucher indépendamment de la vue. Dans cette expérimentation, le participant était invité à essayer successivement les trois gants dissimulés dans un sac pendant que l'animateur interrogeait le participant sur ses ressentis et notait les réponses sur un questionnaire. Les 3 gants de cuisine étaient présentés de manière randomisée suivant 3 ordres.

Nous procédions ensuite à l'étude des préférences à l'aide de la méthode d'analyse conjointe qui permet de déterminer la préférence des utilisateurs. L'animateur commençait par présenter au participant les 12 attributs distinctifs de nos 3 gants de cuisine. L'espace produit était donné par $P = \text{forme} \times \text{matériau} \times \text{couleur} \times \text{prix}$. Le participant devait ensuite répondre à un questionnaire qui permettrait de collecter ses préférences.

Sur la base de l'ensemble de ces résultats, notre modèle a permis de calculer le score d'acceptation des 3 produits.

2.2 Résultats relatifs à l'étude des préférences

Comme nous l'avons évoqué ci-avant, l'étude des préférences a été évaluée à l'aide de la méthode d'analyse conjointe. Pour commencer, nous avons considéré que la préférence provient de la variété des attributs qui constituent les 3 gants de cuisine. Trois de ces attributs sont sensoriels car ils sont perçus par nos 5 sens, l'analyse du prix fera appel à des raisonnements cognitifs. En conséquence, l'espace produit retenu est donné par $P = \text{forme} \times \text{matériau} \times \text{couleur} \times \text{prix}$ ce qui donne $3^4 = 81$ produits différents.

Les 12 attributs considérés par P sont : i) la forme = {gant (F1), moufle (F2), pince-plats (F3)}, ii) la matière = {silicone (M1), coton / polyester (M2), silicone thermo-chromique (M3)}, iii) la couleur = {bleu (C1), orange (C2), vert (C3)}, et prix = {14 € (P1), 4 € (P2), 7 € (P3)}. Si nous en étions restés à l'espace produit complet, nous aurions dû évaluer 81 produits différents mais l'évaluation de ces 81 configurations aurait pris beaucoup de temps.

Pour faciliter l'évaluation, l'espace produit a été restreint par la méthode de TAGUCHI qui permet une réduction importante du nombre d'essais, tout en gardant un bon niveau de précision (Pillet, 2001). Cette méthode permet de limiter le nombre de configurations à évaluer tout en s'assurant que les configurations restantes soient représentatives de l'espace produit. L'évaluation des préférences de notre étude a porté sur 9 configurations « produit » ; chacune étant évaluée sur une échelle allant de 1 à 10. La Table 4.8 donne le résultat des 9 valeurs de préférence des configurations retenues moyennées sur 20 sujets. Les valeurs de préférence ont été obtenues conformément à la méthode décrite à la section 1.3.

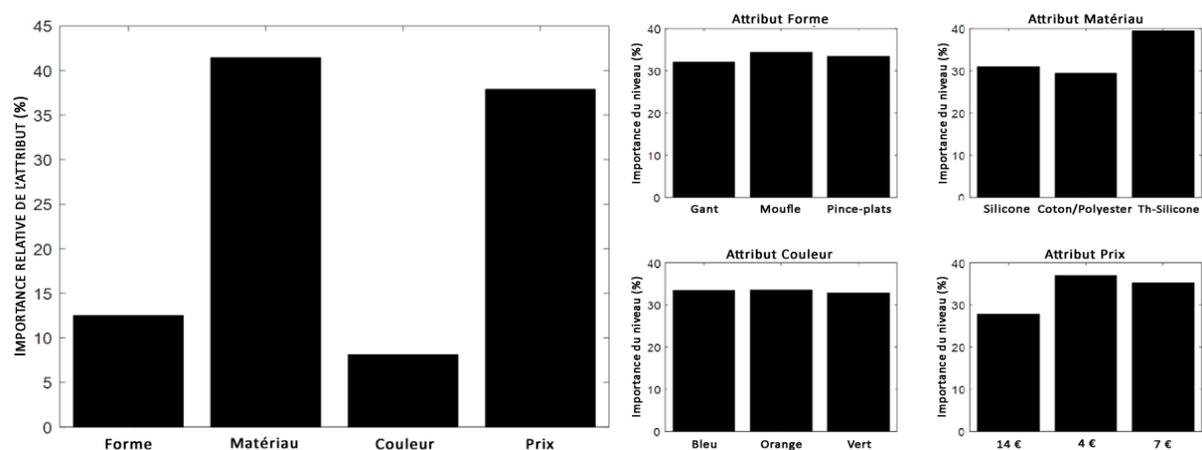
Forme	Matière	Couleur	Prix	Valeur de Préférence (1 à 10)
F1	M1	C3	P2	7.56
F1	M2	C2	P1	6.55
F1	M3	C1	P3	9.41
F2	M1	C1	P3	8.31
F2	M2	C2	P1	6.93
F2	M3	C3	P2	9.99
F3	M1	C1	P1	6.89
F3	M2	C2	P2	8.11
F3	M3	C3	P3	9.58

Table 4.8 - Matrice de configurations utilisée pour réaliser l'analyse conjointe

L'application de la Régression au sens des moindres carrés sur les attributs (cf. section 1.3) conduit aux formules suivantes permettant d'évaluer la contribution de chacun des attributs sur la préférence :

- Contribution de la forme : $F = 8,19 + 0,22\xi_1 - 0,35\xi_2$
- Contribution de la matière : $M = 9,66 - 2,46 \xi_1 - 2,07 \xi_2$
- Contribution de la couleur : $C = 8,02 + 0,19\xi_1 + 0,18 \xi_2$
- Contribution du prix : $P = 8,61 + 0,43 \xi_1 - 1,82\xi_2$.

Dans ces formules, ξ_1 et ξ_2 sont des variables fictives prenant des valeurs de 0 ou 1 (cf. section 1.3). Sur la base de ces modèles, la préférence des niveaux pour chaque facteur ainsi que l'importance relative de chaque facteur ont été déterminées et sont représentées sur la Figure 4.9.



De nombreuses informations peuvent être tirées de cette expérience. Comme le montre la Figure 4.10, le matériau joue le rôle le plus important dans la préférence de l'utilisateur final. Le silicone thermochromique est le matériau préféré car il a la particularité de changer de couleur lorsque la température est élevée. Cet aspect a probablement été perçu comme quelque chose d'important lorsqu'on manipule des assiettes. Le deuxième facteur qui a eu un fort impact sur la préférence des utilisateurs est le prix. Comme nous le savons, nous préférons les « prix bas ». Le troisième facteur important est la forme avec une préférence pour la moufle et le pince-plats. Cela s'explique par le fait que ce type de forme est facile à prendre en main lorsque l'on s'apprête à sortir un plat du four. Enfin, il semble que la couleur ne joue pas un rôle fondamental pour la préférence de l'utilisateur. Ceci est confirmé par le fait que les trois couleurs proposées obtiennent des scores pratiquement équivalents.

2.3 Résultats relatifs à l'évaluation émotionnelle

L'évaluation émotionnelle a été faite à partir de mesures déclaratives réalisées à l'aide du Model Circumplex de Russel (1980) qui collecte deux dimensions la valence et l'arousal. Cette mesure donnera la valeur émotionnelle des 3 gants de cuisine. Comme pour la première expérimentation du Chapitre 2, nous avons souhaité nous affranchir de l'impression visuelle en focalisant la mesure sur les réactions émotionnelles produites par les perceptions tactiles à l'intérieur du gant. Pendant ce test, les produits étaient masqués avec un sac afin que les participants ne puissent pas savoir quel produit ils évaluaient. Le participant glissait la main dominante dans le sac puis manipulait le gant.

L'animateur interrogeait le participant et relevait la valence sur une échelle de cotation « déplaisant – plaisant » allant de -4 à 4 et l'arousal sur une échelle « pas d'éveil – éveil » allant de 0 à 5.

La partie haute de la Figure 4.10 montre en 3D, les coefficients α_{ij} obtenus pour chaque produit (cf. relation (4.19)). La partie basse de cette figure présente le prototype émotionnel des 3 gants de cuisine (cf. relation (4.20)).

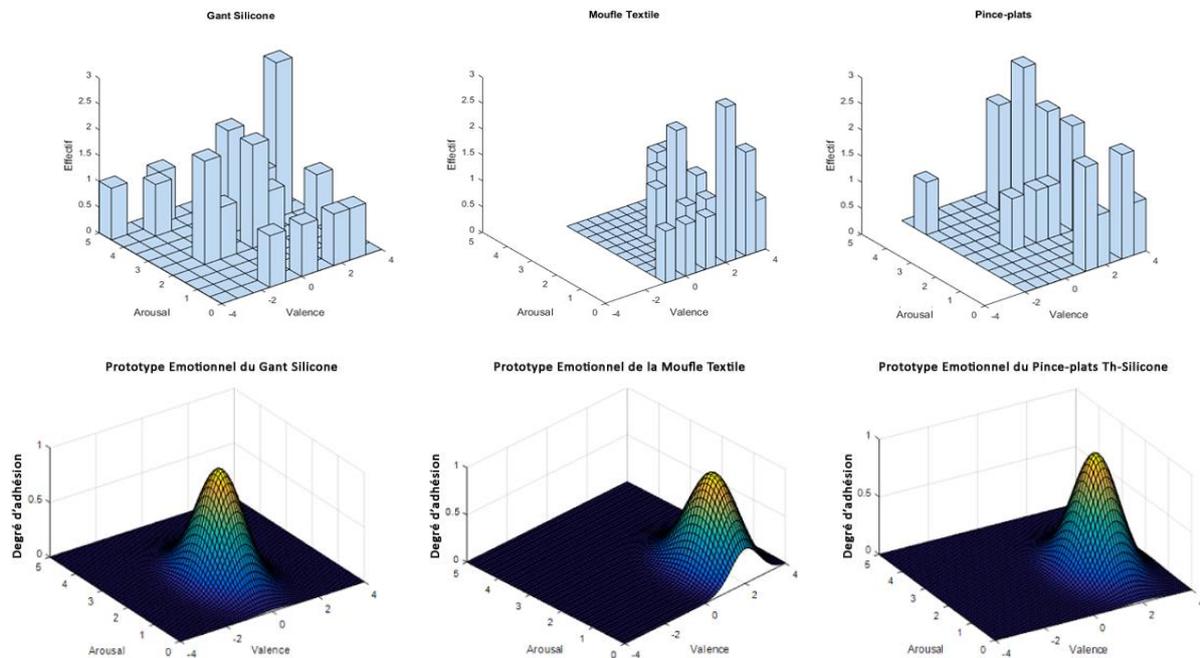


Figure 4.10 – Ensemble de coefficients α_{ij} obtenus pour chaque produit et prototype émotionnel correspondant: gant silicone = (neutre, faible)=(0,2), moufle = (agréable, très faible)=(2,1), pince-plats = (agréable, faible)=(2,2)

Comme pour nos expérimentations sur le toucher et le visuel, la valeur émotionnelle permet de classer les trois gants de cuisine en fonction de la valence et de l'intensité émotionnelle. Le gant en silicone est considéré comme neutre mais ne laisse pas indifférent compte tenu du niveau d'arousal relevé. La moufle textile est considéré comme agréable mais provoque assez peu d'éveil corporel. Comme la moufle textile, le pince-plats est considéré comme agréable avec un arousal plus élevé. Ces produits se classent comme suit (le symbole \succ signifie «mieux que») : Pince-plats \succ Moufle Textile \succ Gant Silicone. On peut également observer que le gant en silicone n'est pas ressenti comme agréable. Cela peut s'expliquer par l'aversion provoquée par la transpiration de la main lorsqu'elle est enfermée dans un gant en silicone. Ce phénomène de transpiration n'est pas un problème pour le pince-plats car le silicone est à l'air et ne provoque pas d'effet de moiteur.

2.4 Opérateur d'agrégation et décision finale

Dans cette méthode, notre opérateur d'agrégation est utilisé pour obtenir un indicateur de préférence global basé sur l'étude des préférences et de l'évaluation émotionnelle. D'après l'analyse conjointe et l'évaluation émotionnelle nous avons obtenu les résultats présentés dans la Table 4.11.

	Valeur de préférence	Prototype émotionnel (valence, arousal)
Gant silicone	7.56	(0,2)
Moufle	6.93	(2,1)
Pince plat	6.89	(2,2)

Table 4.11 – Valeurs de préférence et coordonnées du degré d'adhésion du prototype émotionnel

Les résultats obtenus par l'opérateur d'agrégation (4.21) donnent : $u_1 = 0.5 (7.56 + 2) = 4.78$, $u_2 = 0.5 (6.93 + 3) = 4.97$, et $u_3 = 0.5 (6.89 + 4) = 5.45$, où u_1 représente l'acceptabilité par l'utilisateur du gant en silicone, u_2 est l'acceptabilité par l'utilisateur de la moufle textile, et u_3 représente l'acceptabilité par l'utilisateur du pince-plats en silicone.

Sur la base de ces résultats, on peut conclure que le nouveau concept de « pince-plats » présente une bonne acceptabilité par l'utilisateur final et constitue une alternative sérieuse à la forme classique des mitaines. L'avantage de ce produit est sa facilité d'utilisation car il peut être pris en main immédiatement et ses propriétés tactiles sont jugées agréables. Pour complètement satisfaire l'utilisateur final ce produit devrait être réalisé avec un silicone-chromique à un prix TTC compris entre 4 € et 7 €.

2.5 Discussion

Cette étude de cas permet de donner un aperçu sur la mise en œuvre du modèle multidimensionnel de préférence qu'il est possible d'utiliser dans le domaine de la conception sensorielle. Pour avoir une vision d'ensemble sur les facteurs susceptibles de déclencher les préférences, il est nécessaire de collecter des données de l'axe « Sensations », de l'étude des préférences et de l'axe « Emotions ». Comme nous l'avons vu précédemment, ces trois niveaux d'analyse apporteront : i) des réponses sur les propriétés organoleptiques qui permettront d'établir la sensorialité du produit, ii) des réponses sur la propriété, la matière, l'objet préféré et iii) des réponses sur les réactions émotionnelles que produit l'ensemble de ces stimulations. L'opérateur d'agrégation présenté dans la section 1.5 permettra l'analyse de ces métadonnées dans le but d'établir un score d'acceptation pour les différentes configurations étudiées.

L'étude de cas des gants de cuisine est basée sur la notion d'espace produit, qui se compose en différentes versions de produits ou concepts existants. Pour limiter le nombre de configurations nous avons réalisé une réduction du plan d'expérience basé sur un critère d'orthogonalité.

Pour cette expérimentation, nous avons considéré que l'étude des préférences était plus appropriée pour étudier quelles sont les composantes « expressives » du produit qui engendreront la préférence. Toutefois, étudier les propriétés organoleptiques d'un produit aurait été un plus pour affiner la causalité de cette appréciation mais la mise en œuvre des méthodes d'évaluation sensorielle demande un protocole très strict et d'importantes analyses statistiques pour interpréter les données correspondantes.

Pour simplifier l'expérimentation, nous avons préféré évaluer les préférences des utilisateurs en mesurant l'impact de 9 configurations « produit » sélectionnées pour être les plus représentatives de

l'espace produit complet, qui au départ comptait 81 configurations. Ces 9 configurations ont été obtenues en décomposant l'espace produit en attributs et en niveaux. Ainsi l'espace produit considéré était décomposé en 4 attributs : forme, matériau, couleur, prix ; tous déclinés en 3 niveaux.

Les préférences ont été mesurées sur la base d'un questionnaire qui demandait aux participants de classer les configurations par préférence et d'évaluer indépendamment les 12 attributs. Un modèle de régression qualitative a ensuite permis l'étude des attributs de manière à déterminer l'importance de chaque attribut des différentes configurations.

L'évaluation émotionnelle consistait à évaluer l'émotion ressentie au contact du produit sur deux dimensions à partir d'une échelle de Likert. Cette mesure permettait d'évaluer la valence, c'est-à-dire si la perception tactile ressentie à l'intérieur du gant de cuisine était agréable ou désagréable ainsi que d'évaluer l'arousal pour savoir quel était le niveau d'éveil émotionnel correspondant. Un modèle d'évaluation émotionnelle floue a été introduit afin de tenir compte de l'imprécision inhérente à l'évaluation faite par l'homme. L'approche proposée permettait de déterminer le prototype émotionnel de chaque gant de cuisine. Un opérateur d'agrégation était utilisé pour combiner les informations provenant de l'étude des préférences et de l'évaluation émotionnelle afin d'évaluer le score d'acceptabilité considéré par l'utilisateur.

Les résultats de l'analyse conjointe ont montré que l'acceptabilité du concept « pince-plats » était très bonne notamment pour son caractère non couvrant, pour sa praticité, pour l'intérêt que présentait la matière thermochromique qui le composait. Pour maximaliser l'acceptation du produit sur l'utilisateur, il faudra également positionner le produit sur un prix assez bas comme le montrent les résultats. L'évaluation émotionnelle des perceptions tactiles ressenties à l'intérieur de la moufle présentait un niveau d'acceptabilité du matériau coton / polyester assez bon, l'acceptation du silicone était moyenne du fait des effets de transpiration causés par la caractéristique couvrante du gant. Le silicone thermochromique du concept « pince-plats » était apprécié car il avait la propriété d'offrir un silicone à l'air libre.

Cette étude avait pour objectif d'étudier le potentiel d'un nouveau concept de gant de cuisine appelé « pince-plats ». Le modèle multidimensionnel de préférence a permis de dégager les facteurs d'attractivité des produits et d'obtenir un score d'acceptabilité pour les 9 configurations « produit » étudiées. Sur cette base, un concepteur pourrait facilement déterminer le produit qui a des chances de rencontrer le meilleur niveau d'acceptabilité. Bien sûr, ce modèle serait encore plus complet si nous rajoutions des sets de données physico-chimiques et sensoriels.

3. Evaluation émotionnelle de chaises

L'objectif de cette évaluation est de comprendre le processus émotionnel lors de l'achat en ligne de chaises. Dans ce contexte la décision d'achat repose notamment sur l'évaluation de critères fonctionnels et hédoniques du produit que sont l'esthétique, la sécurité et le confort. Par ailleurs, le processus décisionnel engagé dans l'étude comparative de différents produits résulte d'une analyse multicritère qui donne lieu à un jugement hédonique assez élaboré, dont le processus a été décrit par Arnold (1960) dans sa théorie des « appraisals ». Pour un même événement, les individus

produisent des évaluations cognitives et des réactions émotionnelles différentes (Nugier, 2009). Ainsi, le déclenchement des émotions ne provient pas de l'élément déclencheur mais plutôt de l'interprétation que l'individu se fait de l'événement lors de deux phases d'évaluation de la situation. Dans la première phase nommée « appraisal primaire », le stimulus est immédiatement comparé aux buts, motivations, expériences de l'individu afin d'étiqueter la valence de l'événement. Ce premier niveau d'interprétation permet à l'individu d'évaluer la dangerosité, la pertinence de la situation et d'adapter rapidement sa réponse. Dans la seconde phase nommée « appraisal secondaire », l'individu estime si l'évènement est conforme à ses attentes, normes personnelles et sociales. Le résultat de ces processus d'intégration entraîne une réponse émotionnelle qui dictera le comportement du consommateur à savoir : renoncement ou achat.

3.1 Analyse de l'espace produit complet

Ces dernières années, l'achat en ligne est devenu un moyen d'achat très populaire, pourtant le commerce digital base son approche sur un nouveau modèle de commerce, sur de nouvelles stratégies de prospection, de nouveaux modes de présentation des produits, de nouvelles interfaces, ... Mais de manière générale l'acte d'achat reste motivé par le besoin du client qui recherche des solutions pour satisfaire ce besoin. En général, plusieurs produits du marché répondent à ce besoin et le client tente d'affiner son choix, en fonction de ses attentes et du budget disponible (Engel *et al.*, 1973).

Grâce aux technologies numériques, il est facile de consulter les sites internet qui proposent des produits qui conviendront à ce besoin. Cette navigation permet au consommateur d'évaluer et de comparer différents produits sur la base d'informations visuelles et d'un processus d'intégration cognitive (Fang & Holsapple, 2007; Stenger, 2008). Les informations visuelles proviennent des illustrations et de la mise en page proposées par le site Web (Ladwein, 2000). Huizingh (2000) décompose l'architecture d'un site Web en deux parties: i) le contenu et ii) la conception. Le contenu présente les informations commerciales et des fonctionnalités qui seront prises en compte pour évaluer les caractéristiques du produit. La conception concerne l'interface utilisateur: les fonctionnalités de navigation, les fonctions de recherche et les contenus perceptifs comprenant des images, la police, le style et la charte graphique. C'est après l'examen de l'ensemble de ces critères que le consommateur prendra sa décision d'achat.

Or une grande partie de ce processus décisionnel provient des qualités du produit en lui-même. Dans le cadre du commerce en ligne ces qualités doivent être perçues en quelques secondes à la lecture de la fiche produit et de l'analyse des visuels proposés par le site internet. Pour étudier les réactions émotionnelles suscitées par la perception visuelle d'objets dans l'acte d'achat dans un contexte de e-commerce, nous avons sélectionné 70 chaises dans les Collections Design du Musée d'art moderne et contemporain de Saint-Etienne. Cette étude vise donc i) à établir la valeur émotionnelle des chaises et ii) à déterminer sur quels critères repose l'appréciation d'un produit dans un contexte de commerce électronique.

Dans cette étude de cas, le modèle multidimensionnel de préférence sera utilisé pour relier la valence émotionnelle des chaises provenant d'une évaluation émotionnelle aux notes obtenues dans des épreuves descriptives effectuées sur des descripteurs esthétiques, sécuritaires et de confort.

Cette analyse permettra de connaître quels sont les critères utilitaires et hédoniques des chaises qui sont susceptibles de déclencher un achat dans un contexte de commerce électronique.

L'espace produit considéré dans cette étude est composé de 70 images de chaises toutes sélectionnées dans « Les Collections Design – Objets et mobiliers XX^e et XXI^e siècles dans les collections publiques françaises » constituées par le Musée d'art moderne et contemporain de Saint-Etienne ([Musée d'art moderne de Saint Etienne Métropole, 2008](#)). Ces 70 chaises ont généralement été réalisées dans différents pays, par différents auteurs, à différentes époques et appartiennent à différents mouvements artistiques qui sont décrits par Dent Coad (1986) et Branzi (2009). Cette sélection représente un siècle de design (1900-2014) et correspond à la genèse et à l'histoire du design Industriel.

Nous présentons ci-après la liste des auteurs des chaises répartis par pays :

France	François Arnal, Jean René Caillette, Pierre Delaye, Marcel Gascoin, Pierre Guariche, René Herbst, Jacques Hitier, Eric Jourdan, Jules Emile Leleu, Mathieu Matégot, Michel Mortier, Olivier Mourgue, Pierre Paulin, Charlotte Perriand, Jean Prouvé, Louis Sognot, Hugues Steiner, Roger Tallon
Italie	Joe Colombo, Antonio Citterio, Michele de Lucchi, Gaetano Pesce, Giancarlo Piretti, Gio Ponti
Allemagne	Helmut Bätzner, Konstantin Grcic, K. Schäfer
Danemark	Alvar Aalto, Arne Jacobsen, Verner Panton, Hans Wegner
Royaume-Uni	Ron Arad, Jasper Morrison
Etats-Unis	Ray et Charles Eames, Eero Saarinen
Autriche	Josef Hoffmann, Michael Thonët
Suisse	Josef Hans Bellmann, Wilhelm Kienzle
Pays-Bas	Maarten Baas
Finlande	Ilmari Tapiovaara
Japon	Toshiyuki Kita

3.1.1 Procédure expérimentale

Pour réaliser les expérimentations, 80 étudiants d'une école d'ingénieurs âgés de 19 à 27 ans (moyenne 22 ans, $\pm 1,52$) ont été recrutés, avec seulement 33% de femmes. Cet effet de genre ne limite toutefois pas la généralisation des résultats. Tous étaient volontaires et non rémunérés. Certains d'entre eux n'ont pas accepté l'utilisation de leurs données, tandis que d'autres ont commis des erreurs lors du test. Pour ces raisons, les données ont été exploitées sur un groupe de 65 personnes.

Les participants étaient accueillis par petits groupes allant 6 à 20 personnes dans une salle lumineuse avec des éclairages naturels et artificiels. L'animateur du test commençait par expliquer l'objectif du test et présentait le protocole de test et les échelles d'évaluation. Les 70 images de chaises étaient projetées successivement sur un écran par un ordinateur couplé à un vidéo-projecteur. Un diaporama a été réalisé sur Power Point pour projeter les images des chaises. Nous débutons ce diaporama par une image « titre » affichée pendant 9 secondes immédiatement suivie par une première image blanche également affichée pendant 9 secondes. Chaque image de chaise était ensuite affichée pendant 8 secondes intercalée par une image blanche affichée durant 3 secondes. Les images étaient présentées en couleur sur un fond blanc normalisé comprenant le nom de l'auteur, le nom et le numéro de la chaise. La durée de ce diaporama était de 13,13 minutes.

Des évaluations émotionnelles ont été réalisées sur chaque image de chaise à l'aide du Model Circumplex de Russel (1980) qui collecte la valence et l'arousal (Figure 4.12). Comme pour les expérimentations sur le visuel du Chapitre 2, la valence était mesurée sur une échelle en neuf points allant -4 désagréable à 4 agréable et l'arousal a été évalué sur une échelle en cinq points d'après la méthode Self-Assessment Manikin (SAM) (Bradley & Lang, 1994).

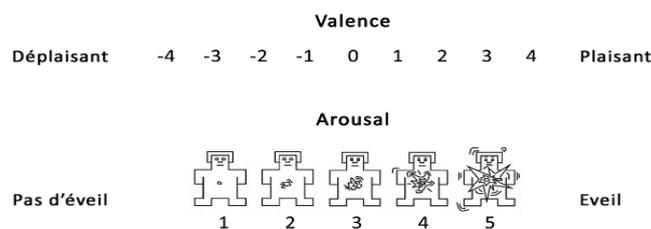


Figure 4.12 – Notation de la valence et de l'arousal

Chaque participant recevait un questionnaire imprimé sur papier. Les participants devaient exprimer leur avis sur la valence émotionnelle et l'intensité du ressenti (arousal), lors de la vision des chaises en entourant leurs réponses sur le questionnaire.

3.1.2 Résultats

Les données ont été analysées et comme pour les expérimentations du Chapitre 2, les notes de valence et d'arousal collectées auprès des 65 participants ont été moyennées pour créer la valeur émotionnelle de l'image de la chaise. Les notes moyennes de valence ont permis de classer des chaises suivant 3 conditions émotionnelles : désagréable, neutre, agréable. La Figure 4.13 classe les 70 chaises par valence : de désagréable à agréable.

Rappelons que cette expérimentation n'a pas pour but d'évaluer les auteurs, leurs performances, le niveau esthétique, la valeur artistique des chaises ... L'objet de cette expérience vise uniquement à évaluer la réaction émotionnelle provoquée par la vision des 70 images de chaises. La Table 4.14 présente les notes de valence et d'arousal moyennées obtenues sur 65 participants pour les 70 chaises.

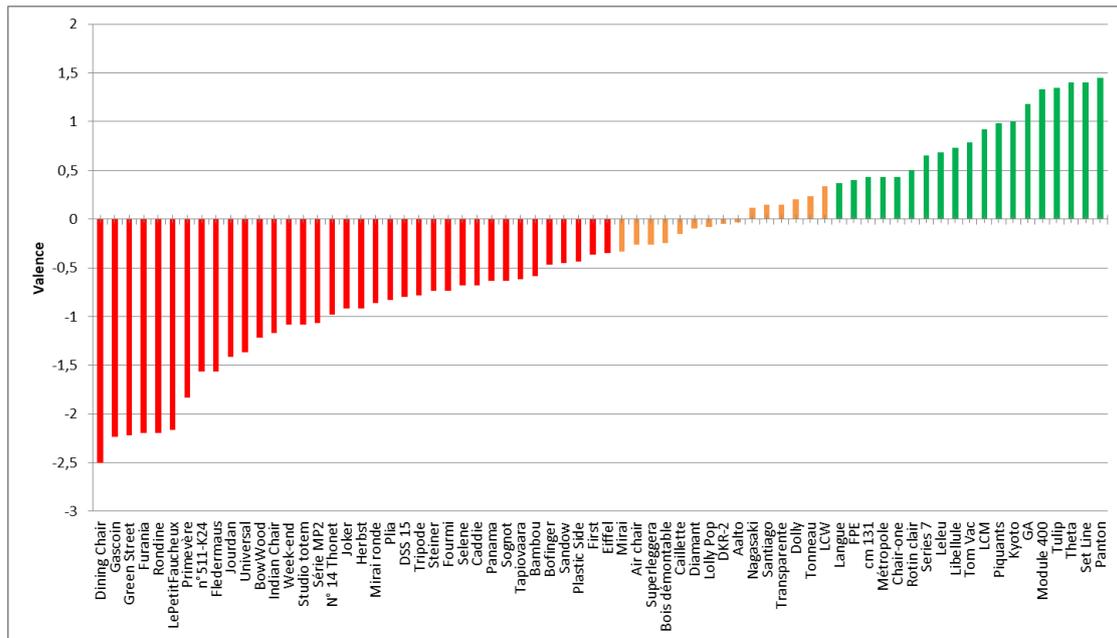


Figure 4.13 – Classement des 70 chaises par valence

Nom des chaises	Valence		Arousal		Nom des chaises	Valence		Arousal	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type		Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Aalto	0,01	± 2,23	1,94	± 0,84	Jourdan	-1,28	± 1,97	2,23	± 1,11
Frêne	-2,17	± 1,81	2,26	± 1,13	Indian Chair	-1,25	± 2,75	3,32	± 1,25
Gascoïn	-1,25	± 1,79	1,93	± 1,10	Theta	1,23	± 1,87	2,43	± 1,27
Week-end	0,62	± 2,64	3,10	± 1,07	Mirai ronde	-0,84	± 1,99	2,22	± 1,14
Chair-one	0,45	± 2,09	2,17	± 0,98	Pli. rondine	-2,12	± 2,13	3,01	± 1,48
Rotin clair	0,75	± 2,05	2,59	± 1,03	Leleu	0,57	± 1,97	2,07	± 0,99
Tom Vac	0,45	± 2,28	2,48	± 1,12	Dolly	0,22	± 1,82	2,68	± 1,05
FPE Chair	0,14	± 2,40	3,06	± 1,33	Selene	-0,76	± 2,04	2,18	± 1,23
Transparente	-2,59	± 1,77	3,17	± 1,45	Panama	-0,65	± 2,20	2,32	± 1,13
Dining Chair	-0,65	± 2,30	2,17	± 1,27	Santiago	0,03	± 2,52	2,78	± 1,25
Bofinger	1,12	± 2,17	2,58	± 1,12	Nagasaki	-0,03	± 2,34	2,61	± 1,22
GA	-1,54	± 1,97	2,13	± 1,10	Chaise Kyoto	0,94	± 2,13	2,88	± 1,14
Universal	-0,20	± 2,17	2,10	± 1,06	Air chair	-0,32	± 2,12	1,99	± 0,99
Caillette	-0,65	± 2,32	2,35	± 1,04	Série MP2	-1,06	± 1,90	2,04	± 1,02
Steiner	-0,04	± 2,05	2,06	± 0,96	Caddie	-0,51	± 3,30	4,01	± 1,19
Diamant	-0,42	± 2,35	2,34	± 1,02	Panton	1,42	± 2,46	3,45	± 1,16
Tour Eiffel	-1,86	± 2,32	3,23	± 1,25	cm 131	0,46	± 1,89	2,12	± 1,17
Primevère	0,88	± 2,12	2,41	± 1,00	Bambou	-0,62	± 2,74	3,04	± 1,24
Joker	-0,35	± 2,66	3,32	± 1,17	Green Street	-2,07	± 2,74	3,86	± 1,25
LCM	-1,03	± 1,96	1,90	± 1,32	Lolly Pop	-0,20	± 2,83	3,52	± 1,31
First	0,26	± 2,36	2,50	± 1,18	Pliã	-0,71	± 2,03	1,97	± 1,18
DSS 15	-0,12	± 2,54	2,93	± 1,12	Superleggera	-0,30	± 1,97	1,61	± 0,97
LCW	-0,63	± 2,12	2,18	± 1,05	Boisdémont.	-0,16	± 2,09	2,03	± 1,03
Plastic Side	-2,30	± 1,64	2,49	± 1,32	Piquants	1,13	± 2,90	3,90	± 1,25
Furania	0,14	± 1,94	2,19	± 1,07	Métropole	0,48	± 2,26	2,41	± 1,15
Tonneau	-0,42	± 2,23	2,36	± 1,18	Tulip	1,35	± 1,98	2,77	± 1,16
Sandow	-1,07	± 1,68	1,84	± 1,15	Set Line	1,25	± 2,00	2,54	± 1,11
Herbst	0,68	± 1,69	2,15	± 1,03	Sognot	-0,58	± 2,30	2,59	± 1,12
Libellule	-1,43	± 2,19	2,74	± 1,27	BowWood	-1,17	± 1,94	2,35	± 1,08
n°511-K24	-1,58	± 2,19	2,74	± 1,29	Petitfauchoux	-2,16	± 2,03	3,06	± 1,57
Fledermaus	-0,71	± 2,28	2,62	± 1,20	Studio totem	-1,14	± 2,25	2,70	± 1,18
Fourmi	-0,57	± 2,24	2,33	± 1,07	Module 400	1,28	± 2,27	3,48	± 1,17
Mirai	0,58	± 1,88	2,26	± 1,13	Tapiovaara	-0,65	± 1,98	2,17	± 1,03
Series 7	0,32	± 1,73	2,35	± 1,16	n° 14 Thonet	-1,04	± 2,35	2,30	± 1,24
Langue					tripode	-0,71	± 2,14	2,43	± 1,14

Table 4.14 – valence et arousal des 70 chaises



Figure 4.16 – Espace produit constitué de 18 chaises classées suivant 3 conditions.

© Crédit photo : Yves Bresson - Musée d'art moderne et contemporain de Saint-Étienne Métropole

3.2.1 Procédure expérimentale

Pour réaliser les tests déclaratifs de cette seconde expérimentation, nous avons recruté 25 étudiants et employés d'une école d'ingénieurs âgés de 19 à 50 ans (moyenne 22 ans, \pm 8,94). Ce panel comptait environ 50% de femmes et 50 % d'hommes. Tous étaient volontaires et non rémunérés.

Comme pour le premier test, les 18 images de chaises ont été projetées sur un écran à l'aide d'un ordinateur équipé d'un vidéo projecteur. Les tests verbalisés étaient réalisés par petits groupes de 5 à 10 personnes. L'animateur accueillait et installait les participants avant de présenter les consignes d'évaluation. Il s'agissait notamment d'expliquer les échelles de cotation, d'expliquer le sens des 6 descripteurs utilisés, de rappeler que l'objet de cette étude était i) de collecter la réaction émotionnelle et ii) de collecter les critères d'apparence des 18 chaises lors d'un examen visuel.

Comme précédemment, les images de chaises étaient présentées successivement dans un diaporama comprenant une image « test » permettant aux participants de s'habituer aux échelles de cotation. Cette image « test » était utilisée pour gommer l'impact de la première tâche d'évaluation qui nécessite une certaine adaptation au protocole. L'image sélectionnée en « test » était celle de la chaise Dolly – Antonio Citterio qui avait été jugée neutre lors du précédent test. Ce choix a été effectué pour ne pas créer de réaction émotionnelle trop importante qui aurait pu influencer l'expérience. Il faut noter que contrairement au premier test les images de cette seconde expérimentation n'ont pas été randomisées.

Le temps d'exposition des images a été rallongé pour permettre aux jurys d'évaluer correctement les 6 descripteurs d'apparence et d'évaluer la valeur émotionnelle des images. Chaque image de chaise était présentée pendant 45 secondes, suivie d'un écran blanc affiché pendant 3 secondes qui était placé entre chaque image. La durée du diaporama était de 15 minutes.

Dans un premier temps, les participants procédaient à l'évaluation de 6 descripteurs d'apparence. Ces descripteurs caractérisent l'esthétique, la sécurité et le confort, c'est à dire les aspects fonctionnels et hédoniques des chaises. Chaque descripteur était évalué de - 4 à + 4 ; du plus commun au plus original (*descripteur 1*), du plus inconfortable au plus confortable (*descripteur 2*), ... :

- Descripteur 1: «Commune / Originale» ;
- Descripteur 2: «Inconfortable / Confortable» ;
- Descripteur 3: «Laide / Belle» ;
- Descripteur 4: «Instable / Stable» ;
- Descripteur 5: «Déséquilibrés / Harmonieux» ;
- Descripteur 6: «La chaise vous inspire : de la suspicion / de la confiance».

Dans un deuxième temps, les participants évaluaient la valeur émotionnelle des chaises sur la base du Model Circumplex de Russel (1980) qui collecte la valence et l'arousal (- 4 à + 4 pour la valence, 0 à 5 pour l'arousal).

3.2.2 Résultats

Tout comme le précédent test des 70 chaises, le traitement des données a été réalisé à partir du calcul des valeurs moyennes de valence et d'arousal. Dans la Figure 4.17, nous comparons les notes moyennes de valence obtenues lors du premier test sur 65 participants et les notes moyennes de valence obtenues lors du second test sur 25 participants.

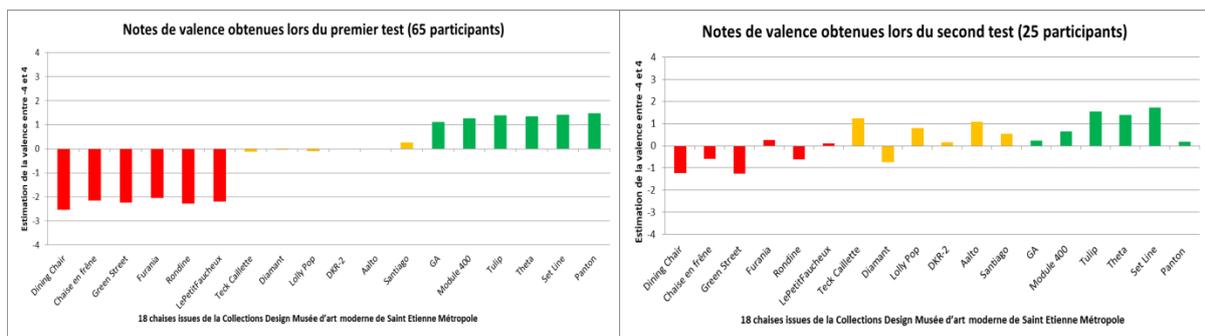


Figure 4.17 – Notes de valence obtenues pour les 18 chaises lors des deux tests

On voit sur cette Figure que la valence obtenue sur les mêmes chaises lors des deux tests montre des disparités. Toutefois à deux exceptions près, on retrouve les mêmes tendances émotionnelles. Les valeurs négatives sont restées, tout comme les valeurs positives. Ces changements de valeur peuvent probablement être attribués à la taille du panel qui était 2,6 fois plus petit dans la seconde expérimentation. Par ailleurs, le profil du panel changeait. Dans notre premier test nous avons uniquement recruté des étudiants alors que dans le second le panel était plus varié car nous avons également des membres du personnel souvent plus âgés. Les chaises « Le Petit Fauchoux » et « Santiago » ont obtenu des notes très différentes. La chaise « Le Petit Fauchoux » présentait une note plus valorisante probablement car son architecture est très originale et provoque un effet de positivité dû à son design absolument unique. La chaise « Santiago » a également été plus appréciée par le panel qui se souvient avec nostalgie des chaises que possédaient souvent leurs parents ou leurs grands-parents. Ces différences de notation montrent que la sélection du panel et le choix de la procédure peut influencer les résultats.

Les Tables 4.18 et 4.19 donnent les valeurs moyennes obtenues pour la valence, l'arousal et les six descripteurs.

Nom des chaises	Valence		Arousal		Originalité		Confort	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Aalto	1,08	± 1,74	2,31	± 1,28	1,23	± 1,96	0,42	± 2,35
Panton	0,19	± 2,59	2,62	± 1,23	2,81	± 1,62	-0,15	± 2,41
Green Street	-1,27	± 2,83	2,88	± 1,36	3,62	± 0,85	-1,65	± 2,46
Module 400	0,65	± 2,34	2,58	± 1,27	2,62	± 0,85	-0,08	± 2,48
PetitFaucheux	0,12	± 2,9	2,88	± 1,14	3,42	± 0,64	-1,42	± 2,4
Set Line	1,73	± 1,63	2,15	± 1,18	-0,69	± 1,71	2,73	± 1,11
Tulip	1,54	± 1,44	2,12	± 1,2	1,08	± 1,57	1,69	± 1,82
Lolly Pop	0,81	± 2,68	3	± 1,2	3,62	± 0,89	-0,88	± 2,5
Santiago	0,54	± 1,85	1,73	± 0,91	-0,62	± 2,22	0,69	± 2,37
Caillette	1,23	± 1,79	2,23	± 1,14	0,5	± 2,31	-0,5	± 2,21
Theta	1,38	± 1,44	2,12	± 1,17	-1,27	± 2,42	2,65	± 1,19
Pliante rondine	-0,62	± 2,57	2,38	± 1,29	2,23	± 1,75	-2,12	± 1,92
Furania	0,27	± 2,3	2,08	± 1,46	-1,85	± 2,2	-0,62	± 1,79
DKR-2	0,15	± 2,39	2,62	± 1,2	2,88	± 0,95	1,77	± 1,92
Diamant	-0,73	± 2,29	2,46	± 1,36	0,62	± 2,4	-1,77	± 2,1
GA	0,23	± 2,08	2,12	± 1,14	-0,42	± 1,85	0,15	± 1,73
Gascoin	-0,58	± 2,3	2,42	± 1,27	1,12	± 2,21	0,88	± 2,42
Dining Chair	-1,23	± 2,26	2,69	± 1,56	2,69	± 1,4	-1,04	± 2,35

Table 4.18 - Table des valeurs moyennes de valence, arousal, originalité, confort pour les 18 chaises

Nom des chaises	Confiance		Beauté		Harmonie		Stabilité	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Aalto	0,88	± 2,17	1,15	± 2,20	1,28	± 2,20	0,96	± 2,54
Panton	0,08	± 2,38	0,46	± 2,65	0,58	± 2,15	-0,08	± 2,31
Green Street	-1,73	± 2,08	-1,65	± 2,49	-1,15	± 2,39	-1,19	± 2,44
Module 400	0,81	± 2,03	0,92	± 2,17	1	± 1,81	1,42	± 2,02
PetitFaucheux	0,23	± 2,02	-0,04	± 2,77	0,04	± 2,67	0,38	± 2,77
Set Line	2,54	± 1,55	1,54	± 1,9	2,15	± 1,78	2,85	± 1,34
Tulip	1,65	± 1,8	1,96	± 1,56	1,65	± 1,76	1,54	± 2,33
Lolly Pop	0,46	± 2,26	0,65	± 2,96	0,19	± 2,2	-0,08	± 2,33
Santiago	1,04	± 1,82	0,15	± 1,82	1,85	± 1,54	1,46	± 1,92
Caillette	1,58	± 2,64	1	± 1,95	2,54	± 1,02	3,35	± 0,89
Theta	2,77	± 1,21	1,69	± 1,8	2,65	± 1,05	3,58	± 0,64
Pliante rondine	-1,62	± 2,04	-0,69	± 2,6	-0,42	± 1,94	-0,88	± 2,68
Furania	1,62	± 2,36	-0,46	± 1,94	1,73	± 1,48	2,92	± 1,26
DKR-2	0,69	± 2,36	0,58	± 2,56	1	± 2,17	0,85	± 2,07
Diamant	0,23	± 2,38	-0,77	± 2,08	0,77	± 2	1,27	± 2,20
GA	1,42	± 1,92	0,42	± 2,41	2	± 1,62	2	± 1,67
Gascoin	0,96	± 2,25	-0,69	± 2,2	1,35	± 1,99	2,85	± 1,22
Dining Chair	-0,69	± 2,54	-1,5	± 2,4	0,04	± 2,53	0,5	± 2,56

Table 4.19 - Table des valeurs moyennes de confiance, beauté, harmonie, stabilité pour les 18 chaises

Pour approfondir nos connaissances sur ce qui provoque une réaction émotionnelle négative ou positive, nous avons traduit les critères d'appréciation visuelle en sélectionnant six critères d'apparence qui décrivent : l'esthétique, la sécurité et le confort des 18 chaises. En rajoutant l'évaluation de ces descripteurs, nous souhaitons déterminer si l'estimation de l'esthétique, de la sécurité et du niveau de confort pouvait être corrélée avec la valence émotionnelle exprimée.

Les moyennes des 6 descripteurs ont tout d'abord été calculées (Figure 4.20). Ces moyennes, ainsi que la valence, ont été introduites dans un algorithme de réseau de neurones à deux couches. Puis une procédure d'apprentissage automatique a été utilisée pour ajuster les paramètres et calculer une valeur émotionnelle « estimée » basée sur les notes obtenues pour les six descripteurs.



Figure 4.20 – Valeurs moyennes des six descripteurs pour les 18 chaises

Dans cette expérimentation, nous assimilons la valence à une valeur de préférence. La valeur émotionnelle « estimée » correspond à la réaction émotionnelle des 25 participants basée sur les critères d'esthétique, de sécurité et de confort. Sur la base de ces 2 marqueurs émotionnels, avec une régression non linéaire, nous avons étudié la corrélation entre la valeur émotionnelle exprimée par le panel lors des tests déclaratifs et la valeur émotionnelle « estimée » obtenue avec le réseau de neurones à deux couches.

Le modèle mathématique est le suivant :

$$v = w_0 + \sum_{i=1}^n w_i \exp\left(-\frac{\|x - m_i\|^2}{s_i^2}\right) \quad (4.23)$$

où x est un vecteur d'entrée associé aux 6 descripteurs, et v est la valence. Les paramètres w_0 , w_i , m_i , s_i , $i = 1, \dots, 18$, ont ainsi été évalués à partir des valeurs moyennes des descripteurs des 18 chaises. Les détails de la méthode adoptée pour déterminer ces paramètres peuvent être trouvés dans Bertheaux *et al.* (2019) et y faire référence.

Après avoir évalué les paramètres de l'équation (4.23), la valence peut être estimée à partir des descripteurs de chaque chaise. Cette valeur émotionnelle « estimée » peut être comparée à la valence verbalisée obtenue par le panel lors du second test. La régression entre ces deux valences est donnée dans la Figure 4.21 et présente un coefficient de détermination de 0,82. Ce résultat

démontre que i) les descripteurs choisis sont pertinents et ii) que les aspects émotionnels d'une chaise peuvent être correctement prédits avec des descripteurs d'apparence.

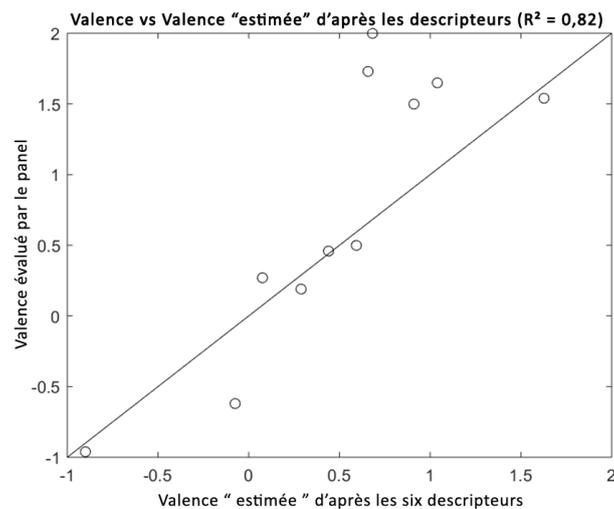


Figure 4.21 – Régression linéaire entre valence « estimée » et valence exprimée

De plus, ces résultats démontrent que l'évaluation émotionnelle par le système visuel d'un objet repose sur peu de critères d'appréciation : esthétique, fonctionnels, sécuritaire ce qui confirme que l'évaluation cognitive est une composante de la genèse des émotions et est le résultat d'un ensemble de sous-processus d'évaluation cognitive (Scherer *et al.*, 2001). Il semble désormais possible d'établir quels composants d'un produit seront capables de créer une réaction émotionnelle chez un consommateur.

3.3 Discussion

Dans cette étude de cas menée sur des chaises, des évaluations émotionnelles ont été réalisées à l'aide du Model Circumplex de Russel (1980) qui collecte deux dimensions, la valence et l'arousal et nous avons complété ces données en effectuant des épreuves descriptives qui ont permis d'évaluer six descripteurs d'apparence. Il s'agissait de savoir si le modèle multidimensionnel de préférence permettrait de déterminer quels sont les descripteurs d'apparence qui provoquent la plus forte émotion.

Une première analyse, relativement classique, a permis de classer les chaises par valence et arousal, mais n'a pas permis de détecter les caractéristiques du produit qui causent ces réactions émotionnelles. Une seconde expérimentation a donc été réalisée en introduisant en plus de la valence et de l'arousal six descripteurs d'apparence analysés par un panel : l'originalité, le confort, la beauté, la stabilité, l'harmonie, la confiance. Les résultats ont permis d'entraîner un réseau de neurones à deux couches pour estimer *in fine* une valence, que l'on a corrélée à la valence mesurée. Le score élevé du coefficient de détermination montre que les descripteurs d'apparence choisis sont pertinents pour évaluer la valeur émotionnelle des chaises.

Il est donc possible de s'appuyer sur ces descripteurs pour améliorer la conception des chaises et de s'assurer de leurs impacts émotionnels. Partant de cette analyse, une démarche de rétro-ingénierie, permettrait d'optimiser la conception des chaises en partant des valeurs « idéales » obtenues par la

chaise jugée la plus plaisante. Il s'agirait par exemple d'appliquer une approche non-supervisée dans laquelle l'ordre et le niveau d'importance des descripteurs d'apparence seront sélectionnés a priori. Cet ordre sera ensuite traduit sur les préférences à l'aide de pondérations. Avec 3 descripteurs d_1 , d_2 , d_3 classés par ordre d'importance décroissante, une combinaison linéaire convexe de ces descripteurs permet ainsi de calculer une valeur de préférence prenant en compte l'ordre d'importance des descripteurs.

Dans un contexte où le consommateur juge un produit sur des valeurs utilitaires, fonctionnelles et hédoniques, l'évaluation de la dimension émotionnelle d'un produit permettra de renforcer son niveau d'acceptabilité. Le modèle multidimensionnel de préférence de ce chapitre apporte une réponse à cette problématique.

Nous pensons qu'il est également possible d'explorer, en plus des caractéristiques purement hédoniques des produits, un aspect plus cognitif, lié à la mémoire : la nostalgie. En effet, certains objets ont une signification différente selon l'histoire qui leur est attribuée, et nous pourrions évaluer l'appréciation corrélée des produits avec l'impression de nostalgie ou avec la question de la mémoire. Nous avons souligné dans ce chapitre l'importance de l'achat en ligne et donc de la modalité visuelle dans le choix des produits par un consommateur, mais nous sommes également conscients que la modalité visuelle à elle seule ne peut suffire à déclencher l'acte d'achat d'une chaise.

Scherer (2001) a proposé un cadre conceptuel qui modélise la différenciation des états émotionnels à la suite d'une séquence évaluative d'un stimulus ou d'un événement donné et a fait des prédictions concernant des modèles d'activation dans différents sous-systèmes du corps humain. Ce modèle postule que les organismes explorent constamment leur environnement, en répondant à des stimuli pertinents. L'apport majeur de ses théories est de spécifier un ensemble standard de critères censés sous-tendre le processus d'évaluation cognitive de l'émotion. L'individu évaluera l'importance de l'événement déclencheur de l'émotion sur un certain nombre de critères. Plusieurs théoriciens s'accordent pour dire que ces critères sont : la nouveauté, le plaisir intrinsèque, la prévisibilité, l'importance pour les objectifs, la cause du stimulus, la possibilité de faire face aux conséquences de l'événement et la compatibilité avec les normes sociales ou personnelles (Ellsworth & Scherer, 2003). Dans notre cas, les six descripteurs correspondent à six « valeurs émotionnelles » qui semblent déterminantes dans l'évaluation émotionnelle des chaises.

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un modèle multidimensionnel de préférence qui prend en compte les données issues de l'étude des préférences et de l'axe « Emotions ». Pour démontrer l'intérêt de cette approche, nous avons présenté deux études de cas.

La première étude de cas devait permettre de :

- Déterminer les préférences des individus par la méthode de l'analyse conjointe ;
- Classer les attributs par niveau de préférence, à l'aide d'un opérateur d'agrégation qui permet d'identifier les attributs déterminants dans l'acceptabilité du consommateur.

Le second objectif de ce modèle était d'améliorer la pertinence du modèle prédictif en rajoutant des mesures émotionnelles de l'objet. Cette étude de cas avait aussi pour objectif d'évaluer l'intérêt d'un nouveau concept de gant de cuisine « pince-plats » en le comparant avec des produits existants qui peuvent être trouvés sur le marché. Notre nouveau concept de gant de cuisine était innovant car il était plus compact qu'un gant de cuisine classique et était réalisé en silicone thermochromique, ce qui lui permettait d'alerter l'utilisateur d'une éventuelle brûlure en changeant de couleur au contact d'un plat chaud.

Sur la base d'une sélection de produits destinés au particulier, l'étude des préférences a permis de mesurer l'impact des attributs à l'aide d'une méthode d'analyse conjointe, qui a permis de classer les gants par comparaison des valeurs de préférence obtenues pour chaque configuration. Un calcul des moindres carrés a permis de rechercher les vecteurs qui s'approchent au plus près des valeurs de préférence dans le but de déterminer l'importance de chaque descripteur. Le résultat de ce calcul a permis de classer les attributs par ordre d'importance décroissante : la matière, la forme, le prix, la couleur. Le résultat de ces calculs a permis ensuite d'exploiter les valeurs de préférence afin de concevoir un produit ayant une bonne acceptabilité par l'utilisateur.

Dans un second temps, l'axe « Emotions » a été évalué grâce à un Model Circumplex de Russel (1980) qui collecte deux dimensions : la valence et l'arousal. Il s'agissait de relever les réactions émotionnelles « brutes » dans des épreuves d'essayage en aveugle. La valeur émotionnelle des 3 gants de cuisine a été étudiée à partir d'un modèle de logique floue qui a permis de calculer le prototype émotionnel et de représenter la valeur émotionnelle de chaque gant. Le résultat de cette analyse a révélé que le concept de « pince-plats » était jugé plus plaisant que les deux autres gants. Enfin, nous avons utilisé un opérateur d'agrégation linéaire pour calculer un indicateur de préférence global basé sur l'évaluation des préférences et sur l'évaluation émotionnelle des 3 gants. Les résultats ont montré que le concept « pince-plats » obtenait le meilleur score d'acceptabilité.

Dans le cadre de cette première étude de cas sur les gants de cuisine, nos résultats ont été obtenus par une approche non-supervisée car nous n'avions pas d'attente sur les résultats et que les descripteurs d'importance ont été obtenus a posteriori. Dans le cadre de notre seconde étude de cas sur les chaises, nos résultats ont été obtenus suivant une approche supervisée car nous connaissions déjà les entrées et les sorties.

La seconde étude de cas devait permettre de :

- Déterminer la valeur émotionnelle des chaises ;
- Développer un modèle prédictif de la valence basé sur l'évaluation de descripteurs d'apparence.

Pour commencer, nous avons procédé à l'évaluation émotionnelle de 70 images de chaises issues de la Collection Design du Musée d'art moderne et contemporain de Saint-Etienne à l'aide d'un panel constitué de 65 individus. Ce travail a permis de classer dans une figure les 70 chaises par valence et arousal, des plus désagréables aux plus agréables. Mais cette approche ne permettait pas d'identifier les attributs saillants du produit susceptibles de provoquer une réaction émotionnelle positive, neutre ou négative. Afin de mieux comprendre sur quoi repose l'évaluation émotionnelle de la chaise nous avons introduit six descripteurs d'apparence qui mesurent l'originalité, le confort, la beauté, la stabilité, l'harmonie et la confiance. Une évaluation émotionnelle et une analyse descriptive ont été réalisées sur 18 chaises classées suivant 3 conditions émotionnelles : déplaisantes, neutres, plaisantes à l'aide d'un panel de 25 individus recrutés pour évaluer les

chaises. Les évaluations de la valence et des 6 descripteurs ont été utilisés pour entraîner un réseau de neurones à deux couches, et construire une note de valence « estimée ». Les résultats attestent que l'évaluation des 6 descripteurs d'apparence proposés pouvait prédire la valeur émotionnelle des chaises. Ce résultat montre le lien étroit entre la réponse émotionnelle donnée par des traitements sous-corticaux qui se traduit par un « j'aime, je n'aime pas », c'est-à-dire la valence et la réponse élaborée produite par des traitements corticaux qui résultent d'une analyse cognitive, fonctionnelle, sécuritaire et hédonique, c'est-à-dire : ce produit convient ou ne convient pas à mes attentes.

L'objectif de ce chapitre était d'utiliser un modèle multidimensionnel de préférence pour déterminer quels types de critère sont responsables des réactions émotionnelles dans le cadre de la conception de produit. Deux approches ont été proposées. L'une permet d'étudier quelles configurations « produit » provoque le meilleur score d'acceptabilité et quels attributs sensoriels provoquent la réaction émotionnelle la plus favorable. L'autre permet d'évaluer la valeur émotionnelle de chaises, via une valence estimée à partir de 6 descripteurs d'apparence. Ces deux études ont montré qu'il était possible d'identifier les descripteurs ou attributs qui engendrent la meilleure appréciation hédonique d'un utilisateur.

CONCLUSION GENERALE

Depuis la fin du XX^{ème} siècle, on observe d'importantes modifications du comportement des consommateurs. Ces changements, dans un contexte de mondialisation, ont été initiés par une politique commerciale de masse qui a eu comme conséquence de saturer le marché de produits utiles, fonctionnels, fiables, innovants, ... qui répondent aux attentes évolutives des consommateurs. Dans le même temps les techniques commerciales se sont améliorées et le nombre de supports publicitaires n'a jamais cessé de grandir notamment avec l'arrivée de nouveaux médias, des réseaux sociaux, ou de nouvelles technologies comme internet et les smartphones. A cela s'ajoutent les effets produits par l'arrivée du e-commerce qui a participé à l'ouverture des marchés en se libérant des magasins physiques, en pratiquant des prix agressifs et en simplifiant l'acte d'achat. Dans ce contexte les consommateurs se sont retrouvés face à une multitude d'offres commerciales et de produits capable de satisfaire leurs besoins. Ce marché en mouvement a contraint les industriels à revoir leurs procédures de conception de manière à mieux intégrer les facteurs humains dans le processus de conception. Car l'acte d'achat est motivé par des besoins souvent utilitaires, alimentaires, fonctionnels que les industriels doivent savoir anticiper. Mais ces dernières années, on observe l'arrivée d'une société émotionnelle. Alors que les comportements rationnels prévalaient autrefois, avec des achats raisonnés, durables et utiles, les consommateurs d'aujourd'hui guidés par des approches marketing sont à la recherche de produits performants, efficaces, faciles d'utilisation mais également de produits « plaisir » qui offrent jouabilité, divertissement et amusement.

Pour répondre à ces nouvelles attentes, en plus de satisfaire les besoins fonctionnels, les industriels doivent toucher l'affect du consommateur pour retenir son attention et se différencier des produits concurrents. Dans ce contexte, l'appréciation d'un produit est basée sur des valeurs utilitaires et des valeurs hédoniques. Plusieurs méthodes permettent la maîtrise des caractéristiques fonctionnelles et utilitaires d'un produit mais peu d'approches sont consacrées à la maîtrise des valeurs hédoniques.

L'appréciation des valeurs hédoniques d'un produit est basée sur l'estimation de 6 composantes : la notoriété, l'image de marque, la valeur idéologique, la qualité perçue, la valeur émotionnelle et le sentiment de nouveauté. Ces critères d'appréciation reposent sur l'évaluation d'attributs sensoriels d'un produit : aspect, empreinte sonore, goût, texture, odeur, forme, matière, couleur, esthétique, perception tactile, marque, logo, graphisme..., qui constituent les fonctions d'estime d'un produit. La définition de ces attributs est la résultante d'un processus de conception sensorielle qui s'attache à imaginer, évaluer, concevoir, développer, définir les attributs sensoriels qui composent le produit afin de retenir l'affect du consommateur. Ce processus de conception sensorielle permettra d'établir la sensorialité « produit », c'est-à-dire le niveau d'expressivité des caractéristiques perceptives et sensorielles du produit. Cette sensorialité « produit » doit permettre au produit de se différencier et d'être désirable car au premier abord, le consommateur sera attiré vers le produit pour ses qualités sensorielles. Mais ces qualités sensorielles seront-elles suffisantes pour l'émouvoir ?

L'impact de l'émotion dans le processus décisionnel a souvent été démontré. La satisfaction qui est définie comme étant un « *état affectif positif, éprouvé par le consommateur lorsqu'il a obtenu ce qu'il souhaitait* » naît de l'évaluation des écarts entre les performances et les attentes associées à un ressenti émotionnel. Cette satisfaction ou insatisfaction se répercutera dans l'attitude du

consommateur. Pour étudier les relations émotionnelles entre le produit et le consommateur, nous avons essayé dans la partie I de ce document de mieux comprendre le processus de perception d'un objet, puis dans la partie II de mieux situer l'émotion liée à la perception dans le processus de conception.

Partie I : le processus de perception

Le Chapitre 1 nous a permis de mieux comprendre le processus d'intégration mentale menant à l'émotion. Nos perceptions sont initiées par nos sens qui traduisent les informations sensorielles provenant de notre environnement en sensations. Ces sensations cheminent par le système nerveux périphérique avant de parvenir au système nerveux central qui les interprète. Ces influx nerveux véhiculent également des informations émotionnelles qui seront traitées suivant deux voies ; une voie courte qui permettra d'étiqueter l'émotion et de renseigner sur l'intensité de la réaction émotionnelle et une voie longue qui apportera un jugement raisonné souvent inhibé. Par ailleurs, les réactions émotionnelles sont variables d'un individu à un autre car elles dépendent du niveau de pertinence que l'individu fait de l'événement comparativement à ses buts, sa motivation, sa capacité à faire face, à la nouveauté de la stimulation, ... Cette variabilité d'appréciation complexifie grandement les mesures émotionnelles, contraignant le concepteur à rechercher les tendances émotionnelles à partir de données le plus souvent moyennées.

Par ailleurs l'émotion est difficile à définir et plusieurs auteurs ont proposé leurs théories sur les déclenchements émotionnels. Mais de nos jours, une grande partie d'entre eux s'entendent pour dire que la réaction émotionnelle est un phénomène rapide, déclenché par un événement, qui engendre une réponse émotionnelle à trois niveaux. La composante subjective qui correspond à l'évaluation que l'individu fait de son propre état émotionnel, la composante expressive et comportementale qui correspond aux expressions faciales et posturales, et la composante physiologique qui correspond aux réponses physiologiques. Par ailleurs plusieurs auteurs reconnaissent que l'expression émotionnelle est traduite par une réponse cognitive qui correspond aux changements d'états émotionnels : de triste à joyeux, du calme à la colère, ... et une réponse corporelle traduite en niveau d'intensité. Ces deux indicateurs émotionnels sont connus pour être la valence et l'arousal. L'utilisation de ces indicateurs permet de mesurer la composante subjective de l'émotion, le plus souvent lors de tests déclaratifs. Mais l'utilisation de panels pour mesurer l'émotion est parfois contestée car ces mesures peuvent comporter des biais de réponses.

La mesure des composantes expressives et comportementales est reconnue pour être plus fiable. On suppose que ces réactions involontaires échappent à notre contrôle car médiées par des « patterns d'activations spécifiques ». Des équipements de lecture des expressions faciales, de prosodie de la voix où de posturologie permettent par exemple de mesurer les composantes expressives de l'émotion. Il en est de même pour la mesure de la composante physiologique, qui est connue pour traduire les réactions du système nerveux autonome. Les réactions émotionnelles sont ainsi mesurables par plusieurs types d'équipements tels que : électrocardiogramme, appareil de mesure de la fréquence respiratoire, appareil de mesure de la réaction électrodermale, électroencéphalogramme, imagerie médicale, pupillométrie... Sur la base de cette recherche bibliographique, nous avons réalisé deux expérimentations permettant la mesure des réactions

émotionnelles à partir de l'évaluation de la composante subjective de l'émotion et de la mesure de la variation du diamètre de la pupille.

Notre première expérimentation concerne la caractérisation émotionnelle tactile car notre recherche bibliographique a montré que le consommateur avait besoin de toucher « avant d'acheter ». Le toucher est un sens de confirmation qui atteste des propriétés réelles de l'objet, et la caractérisation émotionnelle du toucher des matériaux est une thématique qui n'a été traitée que par des approches descriptives.

Nos résultats relatifs à la pupillométrie suggèrent que le système nerveux autonome réagit différemment aux matériaux présentés selon qu'ils soient émotionnels ou neutres. Les résultats sont présentés sous la forme d'un coefficient de dilatation de la pupille qui gomme l'effet sujet. Des analyses statistiques ont révélé que le facteur émotionnel était significatif dans les trois conditions, désagréable, neutre, agréable, et une analyse en composantes principales a classé les matériaux de la même manière que les résultats obtenus lors des tests déclaratifs. Ceci confirme que la mesure de la pupille peut être une bonne méthode pour caractériser les ressentis émotionnels lors de l'exploration de surface. Par ailleurs, les analyses statistiques ont révélé que le facteur genre était significatif avec des réactions pupillaires souvent plus fortes chez les femmes que chez les hommes. Cette meilleure définition tactile s'expliquerait par le fait qu'on observe chez les femmes une plus forte densité sur l'aire de contact des récepteurs de Merkel, des corpuscules de Meissner en raison de la plus petite taille de leurs doigts. Ces résultats confirment également que le bout du doigt permet de caractériser les ressentis émotionnels tactiles, bien qu'il soit difficile d'expliquer aujourd'hui quels récepteurs sont impliqués dans la caractérisation émotionnelle dans la peau glabre.

Notre seconde expérimentation concerne la mesure de la réaction à des images aux contenus émotionnels. En effet, notre étude bibliographique a montré qu'une grande partie de l'interprétation émotionnelle provient de traitements visuels. La caractérisation des stimulations émotionnelles visuelles a d'ailleurs été très souvent étudiée. Pour comprendre les processus émotionnels visuels, nous avons repris le design de la première expérimentation et nous avons effectué une sélection d'images dans la norme IAPS (International Affective Picture System). Comme pour la première expérimentation, notre protocole prévoyait l'évaluation émotionnelle des images à l'aide d'un panel et la mesure des variations du diamètre de la pupille durant la projection des images.

Les résultats de l'évaluation verbalisée ont permis de classer les images de désagréable à agréable, conformément à la norme IAPS, ce qui valide le panel utilisé. Les premiers résultats de pupillométrie ont montré que les changements de luminance des images avaient un effet prédominant, qui masquait un éventuel effet de l'émotion. Nous avons donc adapté notre procédure de calcul de la variation du diamètre de la pupille, en tenant compte du degré de luminance de chacune des images. Les résultats ont alors montré que les enregistrements de la pupille permettent de classer la grande majorité des images de « neutre » à « émotionnelle ». Une analyse en composantes principales a montré le même classement. Des analyses statistiques ont révélé que le facteur émotion était significatif, mais que la paire désagréable vs agréable ne se distinguait pas. Cette expérimentation a montré que la pupille pouvait être un indicateur pertinent de l'émotion induite par une image. Ce résultat est intéressant car il montre que les critères d'apparence d'un produit peuvent changer l'impression émotionnelle d'un produit.

Ces deux expérimentations suggèrent que la pupille réagit différemment selon que l'on touche un matériau ou que l'on perçoit une image. En matière de métrologie émotionnelle, il faudra donc appliquer une approche modalité par modalité, car il est difficile de tirer des généralités du fait de la complexité du système nerveux humain. Nous avons également remarqué que la réaction émotionnelle intervient bien avant l'identification de la matière touchée ou de l'analyse du contenu de l'image.

Cette évaluation interne de la qualité émotionnelle (valence) et de l'intensité corporelle (arousal) de l'événement est effectuée par des traitements sous-corticaux inconscients et végétatifs. En effet, la réaction pupillaire peut intervenir très rapidement, puisqu'il a été montré chez des nourrissons âgés de 8 à 11 mois une réponse à la vue de visages heureux et ce en condition subliminale (Jessen *et al.*, 2016). Ces résultats révèlent que très tôt dans le développement, la discrimination des émotions est possible, non consciente et associée aux réponses du système nerveux autonome. La pupille réagit très vite à une stimulation émotionnelle et on s'aperçoit également que la dilatation de la pupille peut s'installer dans le temps, sur quelques secondes.

Pour améliorer notre analyse du processus de perception, nous suggérons les développements et améliorations suivants :

- Réaliser d'autres expérimentations, en veillant à avoir un panel significatif et nombreux, en complétant le matériel de test par d'autres surfaces, d'autres images, d'autres stimuli et en améliorant la technique de mesure. La pupillométrie présente vite des limites et une alternative serait d'utiliser un eye-tracker qui permet des mesures plus complètes, comme la poursuite oculaire ;
- Améliorer le traitement des résultats de pupillométrie en synchronisant mieux les actions et les mesures, en améliorant encore le traitement des artefacts dans le signal mesuré, et en utilisant d'autres caractéristiques de ce signal (hauteur du pic, aire sous la courbe, temps de réaction...) ;
- Mettre en place une analyse plus complète, car d'une part la mesure des réactions émotionnelles internes n'est peut-être pas assez représentative des ressentis émotionnels qui intègrent également un niveau d'appréciation plus élaboré, et d'autre part la réponse pupillaire ne traduit peut-être pas uniquement l'activité émotionnelle. On sait en effet que le diamètre de la pupille reflète en plus le niveau d'intérêt pour le stimulus (Knapp, Hall & Horgan, 2013), ou la charge cognitive mobilisée par un raisonnement, un calcul, ... (Peavler, 1974 ; Lowenstein & Loewenfeld, 1962 ; Andreassi, 2000 ; Laeng *et al.*, 2012 ; Lavín *et al.*, 2014 ; Bradley & Lang, 2015 ; Brocher *et al.*, 2017 ; Kinner *et al.*, 2017).

Partie II : le processus de conception

Dans un contexte de conception, nous avons établi que la valeur émotionnelle d'une matière, d'un produit, d'un visuel... pouvait être mesurée à différents niveaux, ce qui montre l'intérêt d'intégrer les sciences affectives en conception de produit. Nous avons donc dressé une liste non exhaustive des méthodes appliquées en conception pour étudier les perceptions et les émotions. Très vite, nous sommes aperçus que ces méthodes s'appliquaient suivant deux approches :

- Une approche non-supervisée, qui permet d'évaluer les propriétés organoleptiques, physico-chimiques et émotionnelles d'un produit sans avoir d'a priori, de manière à ne pas induire de biais de réponse ;
- Une approche supervisée, qui permet de « guider » l'étude des propriétés organoleptiques, physico-chimiques et émotionnelles vers des objectifs préalablement définis.

Ces deux approches apportent des réponses différentes. La première permet de connaître le véritable impact que produisent les attributs perceptifs, sensoriels et émotionnels sur le consommateur alors que l'autre approche permet de positionner l'étude vers une problématique préalablement définie comme par exemple améliorer la douceur d'un tissu.

Nous avons pu établir que ces méthodes de conception pouvaient être adaptées aux objectifs. Par exemple, des méthodes seront plus appropriées pour mesurer l'axe « Sensations », c'est-à-dire caractériser la sensorialité produit qui permettra de maîtriser la « valeur sensorielles du produit », tandis que d'autres méthodes seront plus appropriées pour mesurer l'axe « Emotions », c'est à dire les composantes hédoniques d'un produit. L'approche sensorielle est déjà bien maîtrisée puisque des normes lui sont consacrées, mais l'approche émotionnelle est bien moins explicitée. Bien que plusieurs auteurs aient identifié l'intérêt de procéder à l'évaluation de « la valeur émotionnelle » d'un produit, aucune méthode de mesure ne lui est consacrée en conception produit.

L'étude de causalité en sensométrie est généralement effectuée à l'aide de méthodes de cartographie des préférences qui proposent de relier les notes obtenues lors de l'évaluation des propriétés sensorielles et physico-chimiques du produit aux préférences des consommateurs. Cette approche permet ainsi de déterminer quels attributs perceptifs, sensoriels suscitent la préférence. Mais ces méthodes n'intègrent pas véritablement de mesures émotionnelles qui permettraient de relier la réaction émotionnelle aux attributs constitutifs du produit. Nous avons donc développé un modèle multidimensionnel de préférence qui se focalise sur la valeur hédonique du produit. Pour mieux comprendre de quelle manière il est possible d'établir des relations entre les attributs constitutifs d'un produit et le type de réaction émotionnelle provoquée, nous avons mené deux études de cas basées sur ce modèle multidimensionnel de préférence.

La première étude de cas menée sur des gants de cuisine a montré que cette approche permet de déterminer quels sont les attributs perceptifs, sensoriels qui engendrent la meilleure réponse émotionnelle. Pour établir cette relation, nous avons commencé par décomposer l'espace produit en attributs, puis en niveaux. Cet espace produit a été utilisé pour construire des configurations « produits » qui ont ensuite été évaluées par des mesures émotionnelles déclaratives et une étude des préférences. Les résultats de l'évaluation émotionnelle ont permis de classer les gants par valeur émotionnelle. Puis pour diminuer les imprécisions dues aux mesures verbalisées, nous avons développé un prototype émotionnel qui prend en compte trois dimensions : le degré d'adhésion, la valence et l'arousal. Ce prototype émotionnel permet de représenter les ressentis émotionnels du panel envers le produit. L'étude des préférences a été réalisée à partir de la méthode d'analyse conjointe sur les 9 configurations les plus représentatives du produit. Sur la base de ces résultats, un opérateur d'agrégation a permis d'attribuer un score d'acceptabilité aux configurations étudiées. A la vue de ces résultats, la valeur du score d'acceptabilité obtenue pour chaque configuration « produit » permet de connaître quel produit serait susceptible de réussir son introduction sur le marché et par conséquent de connaître quelles sont les caractéristiques, fonctions, matières, niveaux de sensorialité, ... que ce produit doit proposer pour se différencier des produits concurrents.

Mais cette première approche ne permet pas de complètement maîtriser quels sont les attributs perceptifs, sensoriels et émotionnels qui engendrent une réaction émotionnelle. Pour tenter de mieux comprendre ce qui cause les réactions émotionnelles dans le cadre d'achat en ligne, nous avons construit une seconde étude de cas basée sur l'évaluation émotionnelle de chaises. Dans cette seconde étude de cas, nous avons relié des mesures émotionnelles déclaratives à des épreuves descriptives. Il s'agissait de comprendre quels descripteurs d'apparence provoquaient la meilleure réaction émotionnelle. Puis une approche supervisée a permis de mettre un place un modèle prédictif qui corrèle la valence exprimée par le panel à la valence « estimée » obtenue par le réseau de neurones à deux couches. Une régression linéaire a montré des résultats significatifs attestant que l'évaluation des 6 descripteurs proposés pouvait prédire la valeur émotionnelle des chaises. Ce résultat montre le lien étroit entre :

- La réponse émotionnelle, donnée par des traitements sous-corticaux, qui se traduit par un « j'aime, je n'aime pas », c'est-à-dire la valence ;
- La réponse élaborée produite par des traitements corticaux qui résultent d'une analyse cognitive, fonctionnelle, sécuritaire et hédonique, qui se traduit par un « ce produit convient à mes attentes » ou « ce produit ne convient pas à mes attentes ».

Pour améliorer un processus de conception sensorielle incluant une mesure de l'émotion, d'autres développements pourraient compléter les résultats obtenus dans ce travail. Aujourd'hui, les mesures verbalisées sont très « faciles » à utiliser dans un modèle de préférence tel que celui que nous proposons. Cependant, d'une part le modèle proposé peut encore être amélioré, par exemple en utilisant des corrélations non linéaires, et d'autre part l'introduction de mesures telles que la pupillométrie pourrait être un futur axe de travail. Néanmoins, il faudra au préalable mieux cerner le type d'émotion mesurée. Si l'évolution du diamètre de la pupille semble bien corrélée à l'arousal, elle ne permet pas de distinguer le caractère agréable du caractère désagréable de l'émotion ressentie. Quelques pistes sont suggérées dans ce document, mais un travail approfondi sur ce sujet semble nécessaire.

REFERENCES

- Abdouni, A., Djaghloul, M., Thieulin, C., Vargiolu, R., Pailler-Mattei, C., & Zahouani, H. (2017). Biophysical properties of the human finger for touch comprehension: influences of ageing and gender. *Royal Society open science*, 4(8), 170321.
- Abdouni, A., Vargiolu, R., & Zahouani, H. (2018). Impact of finger biophysical properties on touch gestures and tactile perception: Aging and gender effects. *Scientific reports*, 8(1), 1-13.
- Aboyou, D. C., & Dabbs, J. M. (1998). The Hess pupil dilation findings: Sex or novelty?. *Social Behavior and Personality: an international journal*, 26(4), 415-419.
- Ackerley, R., Carlsson, I., Wester, H., Olausson, H., & Backlund Wasling, H. (2014). Touch perceptions across skin sites: differences between sensitivity, direction discrimination and pleasantness. *Frontiers in behavioral neuroscience*, 8, 54.
- AFNOR. (1990). Analyse de la valeur, analyse fonctionnelle : Vocabulaire, NF X50-150
- AFNOR. (1995). Analyse sensorielle - Recherche et sélection de descripteurs pour l'élaboration d'un profil sensoriel, par approche multidimensionnelle, NF ISO 11035 – V09 – 021
- AFNOR. (2000). Analyse sensorielle - Directives générales pour la réalisation d'épreuves hédoniques en laboratoire d'évaluation sensorielle ou en salle en conditions contrôlées impliquant des consommateurs, XP V 09-900
- AFNOR. (2008). Symboles graphiques - Méthodes d'essai - Partie 2 : méthode d'essai de la qualité perçue, NF ISO 9186-2.
- AFNOR. (2010). Analyse sensorielle - Guide général pour l'évaluation sensorielle - Description, différenciation et mesure hédonique, XP V 09-501
- AFNOR. (2011). Management par la valeur - Analyse fonctionnelle, caractéristiques fondamentales - Analyse fonctionnelle : analyse fonctionnelle du besoin (ou externe) et analyse fonctionnelle technique/produit (ou interne) - Exigences sur les livrables et démarches de mise en œuvre, NF X50-100.
- AFNOR. (2012a). Études de marché, études sociales et d'opinion - Vocabulaire et exigences de service, NF ISO 20252.
- AFNOR. (2012b). Analyse sensorielle - Méthodologie - Directives générales pour la réalisation d'épreuves hédoniques effectuées avec des consommateurs dans un espace contrôlé, XP V 09-500
- AFNOR. (2013). Analyse sensorielle - Directives générales pour un suivi, par approche sensorielle, de la qualité d'un produit au cours de sa fabrication, XP V 09-502
- AFNOR. (2015). Systèmes de management de la qualité – Exigences, NF EN ISO 9001.
- AFNOR. (2016). Analyse sensorielle - Méthodologie - Directives générales pour l'établissement d'un profil sensoriel, NF EN ISO 13299.
- AFNOR. (2017). Analyse sensorielle - Méthodologie - Lignes directrices générales, NF ISO 6658
- Akao, Y. (1972). New product development and quality assurance—quality deployment system. *Standardization and Quality Control*, 25(4), 7-14.
- Akao, Y. 1990. Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements into product design, G.H Mazur (trans) Cambridge, M.A: Productivity Press, , ISBN 0-915299-41-0.
- Aliouat, E., Blumenthal, D., Petiot, J. F., Danzart, M., & Sieffermann, J. M. (2010). Contribution to the selection of products for evaluation tests: How to select products for the study of a particular semantic dimension by evaluation tests?. Proc. IDMMME – Visual concept, Bordeaux, France, 37-40.
- Amoore, J. E. (1979). Directions for preparing aqueous solutions of primary odorants to diagnose eight types of specific anosmia. *Chemical Senses*, 4(2), 153-161.
- Andreassi, J. L. (2000). Pupillary response and behavior. *Psychophysiology: human behavior & physiological response*, 4, 218-233.
- André-Obadia, N., Sauleau, P., Cheliout-Heraut, F., Convers, P., Debs, R., Eisermann, M., ... & Kubis, N. (2014). Recommandations françaises sur l'électroencéphalogramme. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 44(6), 515-612.
- Aoussat, A. (1990). *La Pertinence en Innovation: Nécessité d'une Approche Plurielle*. Laboratoire Conception de Produits et Innovation [Doctoral dissertation, Thesis (PhD). Paris, ENSAM].
- Aoussat, A., Christofol, H., & Le Coq, M. (2000). The new product design—a transverse approach. *Journal of Engineering Design*, 11(4), 399-417.
- Ares, G., Varela, P., Rado, G., & Giménez, A. (2011). Identifying ideal products using three different consumer profiling methodologies. Comparison with external preference mapping. *Food Quality and Preference*, 22(6), 581-591.
- Arnold M.B. (1960). Emotion and personality, Columbia University Press.

- Asensio, A., & Bouchenoire, J. L. (2003). Steering the brand in the auto industry. *Design Management Journal* (Former Series), 14(1), 10-18.
- Babiker, A., Faye, I., Prehn, K., & Malik, A. (2015). Machine learning to differentiate between positive and negative emotions using pupil diameter. *Frontiers in psychology*, 6, 1921.
- Babin, B. J., Darden, W. R., & Griffin, M. (1994). Work and/or fun: measuring hedonic and utilitarian shopping value. *Journal of consumer research*, 20(4), 644-656.
- Bagozzi, R. P., Gopinath, M., & Nyer, P. U. (1999). The role of emotions in marketing. *Journal of the academy of marketing science*, 27(2), 184-206.
- Baker, J., & Cameron, M. (1996). The effects of the service environment on affect and consumer perception of waiting time: An integrative review and research propositions. *Journal of the Academy of marketing Science*, 24(4), 338.
- Bänziger, T., Grandjean, D., Bernard, P. J., Klasmeyer, G., & Scherer, K. R. (2001). Prosodie de l'émotion: étude de l'encodage et du décodage. *Cahiers de linguistique française*, 23, 11-37.
- Bard, P. (1928). A diencephalic mechanism for the expression of rage with special reference to the sympathetic nervous system. *American Journal of Physiology-Legacy Content*, 84(3), 490-515.
- Barkat, S., Thomas-Danguin, T., Bensafi, M., Rouby, C., & Sicard, G. (2003). Odor and color of cosmetic products: correlations between subjective judgement and autonomous nervous system response. *International journal of cosmetic science*, 25(6), 273-283.
- Baron, J., & Spranca, M. (1997). Protected values. *Organizational behavior and human decision processes*, 70(1), 1-16.
- Barrett, L. F., & Bar, M. (2009). See it with feeling: affective predictions during object perception. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1521), 1325-1334.
- Bass, F. M., Pessemier, E. A., & Lehmann, D. R. (1972). An experimental study of relationships between attitudes, brand preference, and choice. *Behavioral Science*, 17(6), 532-541.
- Bassereau, J. F. (1995). *Cahier des charges qualitatif design, élaboration par le mécanisme des sens* [Doctoral dissertation, Paris, ENSAM]. <http://www.sudoc.fr/043988911>
- Bassereau J.F., Charvet-Pello R., & Bonnamy B.L. (2009). Design sensoriel. Techniques de l'ingénieur Cosmétiques : procédés de formulation, ag2310
- Baveye, Y., Bettinelli, J. N., Dellandréa, E., Chen, L., & Chamaret, C. (2013). A large video database for computational models of induced emotion. In *2013 Humaine Association Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction* (pp. 13-18). IEEE.
- Baveye, Y., Dellandrea, E., Chamaret, C., & Chen, L. (2015). Liris-accede: A video database for affective content analysis. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 6(1), 43-55.
- Bayer, M., Sommer, W., & Schacht, A. (2011). Emotional words impact the mind but not the body: evidence from pupillary responses. *Psychophysiology*, 48(11), 1554-1562.
- Bear, M. F., Connors, B. W., & Paradiso, M. A. (2007). *Neuroscience* (Vol. 2). Lippincott Williams & Wilkins.
- Beatty, J. (1982). Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources. *Psychological bulletin*, 91(2), 276.
- Beatty, J., & Lucero-Wagoner, B. (2000). The pupillary system. *Handbook of psychophysiology*, 2(142-162).
- Bechara, A., Damasio, H., & Damasio, A. R. (2000). Emotion, decision making and the orbitofrontal cortex. *Cerebral cortex*, 10(3), 295-307.
- Bensafi, M., Rouby, C., Farget, V., Bertrand, B., Vigouroux, M., & Holley, A. (2002). Autonomic nervous system responses to odours: the role of pleasantness and arousal. *Chemical Senses*, 27(8), 703-709.
- Benton, A. (1990). Facial recognition 1990. *Cortex*, 26(4), 491-499.
- Bertheaux, C., Toscano, R., Fortunier, R., & Borg, C. (2018). Integration of perception and emotions in a new sensory design process. *International Journal of Design Engineering*, 8(1), 73-97.
- Bertheaux, C., Toscano, R., Fortunier, R., & Borg, C. (2019). Toward an optimal quantitative design method integrating user-centered qualitative attributes. *Food science & nutrition*, 7(7), 2261-2270.
- Bertheaux, C., Toscano, R., Fortunier, R., Roux, J. C., Charier, D., & Borg, C. (2020a). Emotion Measurements Through the Touch of Materials Surfaces. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13, 455.
- Bertheaux, C., Toscano, R., Fortunier, R., Poisson, N., Roux, J.-C. & Borg, C. (2020b). Emotional characterisation of chairs by descriptors, neural network and verbalised analysis, *Int. J. Design Engineering*, In press.
- Bigelow, J., & Poremba, A. (2014). Achilles' ear? Inferior human short-term and recognition memory in the auditory modality. *PloS one*, 9(2), e89914.
- Blair, R. J., & Cipolotti, L. (2000). Impaired social response reversal: A case of 'acquired sociopathy'. *Brain*, 123(6), 1122-1141.
- Body, L., & Tallec, C. (2015). *L'expérience client: Le design pour innover, L'humain pour créer du lien, Le collaboratif pour accompagner le changement*. Editions Eyrolles. ISBN : 978-2-212-56231-6.

- Bonapace, L. (2002). Linking product properties to pleasure: the sensorial quality assessment method–SEQUAM. *Pleasure with products: beyond usability*, 189-217.
- Bonaz, B. (2010). Communication entre cerveau et intestin. *La Revue de médecine interne*, 31(8), 581-585.
- Borg, C., Leroy, N., Favre, E., Laurent, B., & Thomas-Antérion, C. (2011). How emotional pictures influence visuospatial binding in short-term memory in ageing and Alzheimer's disease?. *Brain and cognition*, 76(1), 20-25.
- Bos, D. O. (2006). EEG-based emotion recognition. *The Influence of Visual and Auditory Stimuli*, 56(3), 1-17.
- Bouchard, C. (1997). Modélisation du processus de style automobile: Méthode de veille stylistique adaptée au design du composant d'aspect [Doctoral dissertation, Paris, ENSAM].
- Bouchard, C., Lim, D., & Aoussat, A. (2003). Development of a Kansei Engineering System for industrial design. *In Proceedings of the Asian Design International Conference* (Vol. 1, pp. 1-12).
- Bourque, L. B., Clark, V. A., & Clark, V. (1992). Processing data: The survey example (No. 85). *Sage. University Paper series on Quantitative Applications in the Social Sciences*, series 07-085, Newbury Park, CA.
- Bradley, M. M., Greenwald, M. K., Petry, M. C., & Lang, P. J. (1992). Remembering pictures: pleasure and arousal in memory. *Journal of experimental psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18(2), 379.
- Bradley, M. M., & Lang, P. J. (1994). Measuring emotion: the self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of behavior therapy and experimental psychiatry*, 25(1), 49-59.
- Bradley, M. M., & Lang, P. J. (1999). Affective norms for English words (ANEW): Instruction manual and affective ratings (Vol. 30, No. 1, pp. 25-36). *Technical report C-1, the center for research in psychophysiology*, University of Florida.
- Bradley, M. M., & Lang, P. J. (2015). Memory, emotion, and pupil diameter: Repetition of natural scenes. *Psychophysiology*, 52(9), 1186-1193.
- Bradley, M. M., Miccoli, L., Escrig, M. A., & Lang, P. J. (2008). The pupil as a measure of emotional arousal and autonomic activation. *Psychophysiology*, 45(4), 602-607.
- Branzi A. (2009). Qu'est-ce que le design ? Adapté par Catherine Bodin-Godi, Cécile Breffort. *Gründ*, Collection Histoire de. Paris (pp : 166-169), ISBN : 978-2-7000-2699-3.
- Broca, P. (1978). Anatomie comparée des circonvolutions cérébrales. Le grand lobe limbique et la scissure limbique dans la série des mammifères. *Rev Anthropol*, 1, 385-498.
- Brocas, S. (1997). L'ingénierie centrée sur l'homme. *Cahier d'industries*, 11-20.
- Brocher, A., & Graf, T. (2017). Response: Commentary: Pupil old/new effects reflect stimulus encoding and decoding in short-term memory. *Frontiers in psychology*, 8, 539.
- Buizard, J. M. (2015). Perception consciente ou perception inconsciente: quel rapport entre perception et conscience?. *L'Évolution Psychiatrique*, 80(4), 740-749.
- Bungener, C., Bonnet, P., & Fiori-Duharcourt, N. (2016). Validation de 120 images de l'IAPS auprès d'une population française âgée de 20 à 88 ans. *Gériatrie et Psychologie Neuropsychiatrie du Vieillessement*, 14(2), 201-212.
- Buttet, J., Wingfield, A., & W Sandoval, A. (1980). Effets de la prosodie sur la résolution syntaxique de la parole comprimée. *L'année psychologique*, 80(1), 33-50.
- Cacioppo, J. T., Berntson, G. G., Klein, D. J., & Poehlmann, K. M. (1997). Psychophysiology of emotion across the life span. *Annual review of gerontology and geriatrics*, 17, 27-74.
- Cacioppo, J. T., Berntson, G. G., Larsen, J. T., Poehlmann, K. M., & Ito, T. A. (2000). *The psychophysiology of emotion. Handbook of emotions*, 2, 173-191.
- Cacioppo, J. T., Gardner, W. L., & Berntson, G. G. (1999). The affect system has parallel and integrative processing components: Form follows function. *Journal of personality and Social Psychology*, 76(5), 839.
- Cacioppo, J. T., Martzke, J. S., Petty, R. E., & Tassinary, L. G. (1988). Specific forms of facial EMG response index emotions during an interview: From Darwin to the continuous flow hypothesis of affect-laden information processing. *Journal of personality and social psychology*, 54(4), 592.
- Cacioppo, J. T., Petty, R. E., Losch, M. E., & Kim, H. S. (1986). Electromyographic activity over facial muscle regions can differentiate the valence and intensity of affective reactions. *Journal of personality and social psychology*, 50(2), 260.
- Cajal, Y., & Ramón, S. (2002). Structure et connexions des neurones. *Discurso*, 35(4), 433-452.
- Callier, P., & Schlich, P. (1997). La cartographie des préférences incomplètes: Validation par simulation. *Sciences des aliments*, 17(2), 155-172.
- Cally, R. (2011). Aperçu des apports de la psychologie en marketing. *Revue Marocaine de Recherche en Management et Marketing*, (4-5).
- Candland, D. K. (1977). The persistent problems of emotion. *Emotion*, 1-84.
- Canli, T., Desmond, J. E., Zhao, Z., & Gabrieli, J. D. (2002). Sex differences in the neural basis of emotional memories. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(16), 10789-10794.
- Cannon, W. B. (1927). The James-Lange theory of emotions: A critical examination and an alternative theory. *The American journal of psychology*, 39(1/4), 106-124.

- Canon, F., Neiers, F., & Guichard, E. (2018). Saliva and flavor perception: perspectives. *Journal of agricultural and food chemistry*, 66(30), 7873-7879.
- Cardello, A. V., & Jaeger, S. R. (2016). Measurement of consumer product emotions using questionnaires. In *Emotion measurement* (pp. 165-200). Woodhead Publishing.
- Cariou, V., Verdun, S., & Qannari, E. M. (2014). Quadratic PLS regression applied to external preference mapping. *Food Quality and Preference*, 32, 28-34.
- Carroll, J. D., & Wish, M. (1974). Multidimensional perceptual models and measurement methods. *Handbook of perception*, 2, 391-447.
- Carver, C. S., & Scheier, M. (1990). Principles of self-regulation: Action and emotion. *The Guilford Press*.
- Chang, W. C., & Wu, T. Y. (2007). Exploring types and characteristics of product forms. *International Journal of Design*, 1(1), 3-14.
- Chapman, E. (2003). Un nouveau sens: le toucher émotionnel. *M/S: médecine sciences*, 19(12), Paris, 1180-1180.
- Charier, D. (2019). Evaluation de la douleur, du stress ou des émotions par la mesure en temps réel de la balance sympathique-parasympathique. [Doctoral dissertation, Université de Lyon]. <https://www.theses.fr/2019LYSES003>
- Charier, D. (2020). Communication privée.
- Charles, S. T., Mather, M., & Carstensen, L. L. (2003). Aging and emotional memory: the forgettable nature of negative images for older adults. *Journal of Experimental Psychology: General*, 132(2), 310.
- Christensen, N. J., & Galbo, H. (1983). Sympathetic nervous activity during exercise. *Annual Review of Physiology*, 45(1), 139-153
- Coad, D. (1986). Signs of the times?. *Design*, 44-5.
- Conover, W. J., & Iman, R. L. (1981). Rank transformations as a bridge between parametric and nonparametric statistics. *The American Statistician*, 35(3), 124-129.
- Corkin, S., Milner, B., & Rasmussen, T. (1970). Somatosensory thresholds: Contrasting effects of postcentral-gyrus and posterior parietal-lobe excisions. *Archives of Neurology*, 23(1), 41-58.
- Corti, A. (1851). Recherches sur l'organe de l'ouïe des mammifères. <https://books.google.fr/books>
- Crochemore, S., Nesa, D., & Coudrec, S. (2004). Analyse sensorielle des matériaux d'habitable automobile: toucher/vision. Ed. *Techniques Ingénieur*. réf am3290.
- Crochemore, S., Vergneault, C., & Nesa, D. (2003). A new reference frame for tactile perceptions: Sensotact. 5th Rose Mary Pangborn, Boston MA, USA, 20-24.
- Damasio, A. R. (1994). Descartes' error: Emotion, rationality and the human brain.
- Danzart M. (2013). Statistiques descriptives, Cartographie des préférences In. Coord. S.S.H.A. Evaluation sensorielle, Manuel méthodologique, 219-246, 290-297, *Technique et Documentation Lavoisier*, Paris.
- Darwin, C. (1872). The expression of emotions in animals and man. *London: Murray*, 11.
- Davidson, J. (1994). Stochastic limit theory: An introduction for econometricians. *Oxford University Press, Oxford*.
- De Gelder, B., & Hadjikhani, N. (2006). Non-conscious recognition of emotional body language. *Neuroreport*, 17(6), 583-586.
- De Groot, J. H., Smeets, M. A., Kaldewaij, A., Duijndam, M. J., & Semin, G. R. (2012). Chemosignals communicate human emotions. *Psychological science*, 23(11), 1417-1424.
- De Vadder, F., & Mithieux, G. (2015). Contrôle de la glycémie par l'axe nerveux intestin-cerveau. *médecine/sciences*, 31(2), 168-173.
- Debreu, G. (1960). Topological methods in cardinal utility theory, *Mathematical methods in the social sciences* (KJ Arrow, S. Karlin, and P. Suppes, eds.). *Stanford University Press*, Chapter 2.
- Dehaene, S., & Changeux, J. P. (2004). Neural mechanisms for access to consciousness. *The cognitive neurosciences*, 3, 1145-58.
- Dellandrea, E., Liu, N., & Chen, L. (2010). Classification of affective semantics in images based on discrete and dimensional models of emotions. [Conférence]. In *2010 International Workshop on Content Based Multimedia Indexing (CBMI)* (pp. 1-6). IEEE.
- Depled F. (2009). SSHA. Coordonnateur., Evaluation sensorielle, manuel méthodologique. 3ème Edition., Tec et Doc Lavoisier, ISBN : 978-2-7430-0997-7, 201-226.
- Depled F., & Sauvageot, F. (2002). Evaluation sensorielle des produits alimentaires. *Techniques de l'ingénieur*. Agroalimentaire, 3(F4000), F4000-1.
- Desmet, P. (2003). Measuring emotion: Development and application of an instrument to measure emotional responses to products. In *Funology* (pp. 111-123). *Springer*, Dordrecht.
- Desmet, P., Overbeeke, K., & Tax, S. (2001). Designing products with added emotional value: Development and application of an approach for research through design. *The design journal*, 4(1), 32-47.
- Desmet, P. M., Vastenburg, M. H., & Romero, N. (2016). Mood measurement with Pick-A-Mood: review of current methods and design of a pictorial self-report scale. *Journal of Design Research*, 14(3), 241-279.

- Detyniecki, M., Bouchon-meunier, D. B., Yager, D. R., & Prade, R. H. (2000). Mathematical aggregation operators and their application to video querying.
- DeYoe, E. A., Felleman, D. J., Van Essen, D. C., & McClendon, E. (1994). Multiple processing streams in occipitotemporal visual cortex. *Nature*, 371(6493), 151-154.
- Diderot, D. (1778). *Encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers... par une Société de gens de lettres... mis en ordre et publié par M. Diderot; et quant à la partie mathématique par M. d'Alembert. chez Pellet imprimeur-libraire.*
- Dillon, Y. K., Haynes, J., & Henneberg, M. (2001). The relationship of the number of Meissner's corpuscles to dermatoglyphic characters and finger size. *The Journal of Anatomy*, 199(5), 577-584.
- Dolinski, D. (2010). Touch, compliance, and homophobia. *Journal of Nonverbal Behavior*, 34(3), 179-192.
- Donovan R.J., & Rossiter J.R. (1982). Store atmosphere: An Environmental Psychology Approach, *Journal of Retailing*, 58(1), 34-57.
- Dussaix, A. M., Saporta, G., & Carle, P. (1998). *L'Analyse conjointe, la statistique et le produit idéal : Méthode et Applications*, Editions Lavoisier.
- Edlow, B. L., Takahashi, E., Wu, O., Benner, T., Dai, G., Bu, L., ... & Folkerth, R. D. (2012). Neuroanatomic connectivity of the human ascending arousal system critical to consciousness and its disorders. *Journal of Neuropathology & Experimental Neurology*, 71(6), 531-546.
- Eimer, M., Holmes, A., & McGlone, F. P. (2003). The role of spatial attention in the processing of facial expression: an ERP study of rapid brain responses to six basic emotions. *Cognitive, affective, & behavioral neuroscience*, 3(2), 97-110.
- Ekman, G., Hosman, J., & Lindstrom, B. (1965). Roughness, smoothness, and preference: A study of quantitative relations in individual subjects. *Journal of Experimental Psychology*, 70(1), 18.
- Ekman, P., & Friesen, W. V. (1976). Measuring facial movement. *Environmental psychology and nonverbal behavior*, 1(1), 56-75.
- Ekman, P., & Friesen, W. V. (1978). *Facial action coding system: Investigator's guide*. Consulting Psychologists Press.
- Ellsworth, P. C., & Scherer, K. R. (2003). *Appraisal processes in emotion*. Oxford University Press.
- Engel, J. F., Kollat, D. T., & Roger, D. (1973). *Blackwell, consumer behavior*. New York.
- Essick, G. K., James, A., & McGlone, F. P. (1999). Psychophysical assessment of the affective components of non-painful touch. *Neuroreport*, 10(10), 2083-2087.
- Essick, G. K., McGlone, F., Dancer, C., Fabricant, D., Ragin, Y., Phillips, N., ... & Guest, S. (2010). Quantitative assessment of pleasant touch. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 34(2), 192-203.
- Estrada, C. A., Isen, A. M., & Young, M. J. (1997). Positive affect facilitates integration of information and decreases anchoring in reasoning among physicians. *Organizational behavior and human decision processes*, 72(1), 117-135.
- Fang, X., & Holsapple, C. W. (2007). An empirical study of web site navigation structures' impacts on web site usability. *Decision Support Systems*, 43(2), 476-491.
- Faucheu, J., Caroli, A., Del Curto, B., & Delafosse, D. (2015). Experimental setup for visual and tactile evaluation of materials and products through Napping® procedure. In *DS 80-9 Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15) Vol 9: User-Centred Design, Design of Socio-Technical systems*, Milan, Italy, 27-30.07. 15 (pp. 129-138).
- Ferrandi, J. M., De Barnier, V., & Valette-Florence, P. (2002). Une première application de l'échelle de Richins pour mesurer les réactions émotionnelles à la publicité. In *Actes de la conférence de l'Association Française de Marketing* (Vol. 18, pp. 311-330).
- Finke, R. A., & Schmidt, M. J. (1978). The quantitative measure of pattern representation in images using orientation-specific color aftereffects. *Perception & Psychophysics*, 23(6), 515-520.
- Floru, R. (1996). *Eclairage et vision. [Rapport de recherche] Notes scientifiques et techniques de l'INRS NS 149*, Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). 135 p., ill., bibliogr. « hal-01420151 ».
- Forget, R., & Lamarre, Y. (1987). Rapid elbow flexion in the absence of proprioceptive and cutaneous feedback. *Human neurobiology*, 6(1), 27-37.
- Francis, S., Rolls, E. T., Bowtell, R., McGlone, F., O'Doherty, J., Browning, A., Clare, S., & Smith, E. (1999). The representation of pleasant touch in the brain and its relationship with taste and olfactory areas. *Neuroreport*, 10(3), 453-459.
- Fredrickson, B. L. (2001). The role of positive emotions in positive psychology: The broaden-and-build theory of positive emotions. *American psychologist*, 56(3), 218.
- Fuller, P., Sherman, D., Pedersen, N. P., Saper, C. B., & Lu, J. (2011). Reassessment of the structural basis of the ascending arousal system. *Journal of Comparative Neurology*, 519(5), 933-956.
- Furness J.B. (2006). *The enteric nervous system*, Wiley Online Library, 103-131. ISBN: 978-1-405-13376-0.

- García-Rodríguez, B., Fusari, A., Rodríguez, B., Hernández, J. M. Z., & Ellgring, H. (2009). Differential patterns of implicit emotional processing in Alzheimer's disease and healthy aging. *Journal of Alzheimer's Disease*, 18(3), 541-551.
- Gaze, L. V., Oliveira, B. R., Ferrao, L. L., Granato, D., Cavalcanti, R. N., Júnior, C. C., ... & Freitas, M. Q. (2015). Preference mapping of dulce de leche commercialized in Brazilian markets. *Journal of Dairy Science*, 98(3), 1443-1454.
- Gibson, J. J. (1977). The theory of affordances. *Hilldale, USA*, 1(2).
- Gil, S. (2009). Comment étudier les émotions en laboratoire. *Revue électronique de psychologie sociale*, 4, 15-24.
- Gobé, M., & Zyman, S. (2001). Emotional branding: the new paradigm for connecting brands to people (Vol. Allwoth Press). New York: New York.
- Goldreich, D., & Kanics, I. M. (2003). Tactile acuity is enhanced in blindness. *Journal of Neuroscience*, 23(8), 3439-3445.
- Goldreich, D., & Kanics, I. M. (2006). Performance of blind and sighted humans on a tactile grating detection task. *Perception & Psychophysics*, 68(8), 1363-1371.
- Goldwater, B. C. (1972). Psychological significance of pupillary movements. *Psychological bulletin*, 77(5), 340.
- Goupy, J. (2000). Modélisation par les plans d'expériences. *Techniques de l'ingénieur. Mesures et contrôle*, (R275), R275-1.
- Granholm, E. E., & Steinhauer, S. R. (2004). Pupillometric measures of cognitive and emotional processes. *International Journal of Psychophysiology*, 52(1), 1-6.
- Gray, H. (1878). Anatomy of the human body (Vol. 8). *Lea & Febiger*.
- Green, P. E., & Srinivasan, V. (1978). Conjoint analysis in consumer research: issues and outlook. *Journal of consumer research*, 5(2), 103-123.
- Green, P. E., & Srinivasan, V. (1990). Conjoint analysis in marketing: new developments with implications for research and practice. *Journal of marketing*, 54(4), 3-19.
- Green, P. E., Wind, Y., & Carroll, J. D. (1973). Multiattribute decisions in marketing: A measurement approach (Vol. 973). *Hinsdale, IL: Dryden Press*.
- Greenhoff, K., & MacFie, H. J. H. (1994). Preference mapping in practice. In *Measurement of food preferences* (pp. 137-166). *Springer, Boston, MA*.
- Greenspan, J. D., & McGillis, S. L. (1991). Stimulus features relevant to the perception of sharpness and mechanically evoked cutaneous pain. *Somatosensory & motor research*, 8(2), 137-147.
- Grill-Spector, K., & Kanwisher, N. (2005). Visual recognition: As soon as you know it is there, you know what it is. *Psychological Science*, 16(2), 152-160.
- Groscurth, P. (2002). Anatomy of sweat glands. In *Hyperhidrosis and botulinum toxin in dermatology* (Vol. 30, pp. 1-9). *Karger Publishers*.
- Gross, J. J. (2002). Emotion regulation: Affective, cognitive, and social consequences. *Psychophysiology*, 39(3), 281-291.
- Gross, J. J. (2010). The future's so bright, I gotta wear shades. *Emotion Review*, 2(3), 212-216.
- Gross, J. J., & Levenson, R. W. (1995). Emotion elicitation using films. *Cognition & emotion*, 9(1), 87-108.
- Guazzi, M., Malliani, A., & Zanchetti, A. (1964). Reflex regulation of consciousness and emotional behaviour. In *Symposium on the Physiopathology of the States of Consciousness* (pp. 198-214). *Springer, Vienna*.
- Guest, S., Dessirier, J. M., Mehrabian, A., McGlone, F., Essick, G., Gescheider, G., ... & Blot, K. (2011). The development and validation of sensory and emotional scales of touch perception. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 73(2), 531-550.
- Guo, F., Ding, Y., Liu, W., Liu, C., & Zhang, X. (2016). Can eye-tracking data be measured to assess product design?: Visual attention mechanism should be considered. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 53, 229-235.
- Gutiérrez-Redomero, E., Alonso, M. C., & Dipierri, J. E. (2011). Sex differences in fingerprint ridge density in the Mataco-Mataguayo population. *Homo*, 62(6), 487-499.
- Guyader, N., Chauvin, A., Peyrin, C., Hérault, J., & Marendaz, C. (2004). Image phase or amplitude? Rapid scene categorization is an amplitude-based process. *Comptes Rendus Biologies*, 327(4), 313-318.
- Hagemann, D., Waldstein, S. R., & Thayer, J. F. (2003). Central and autonomic nervous system integration in emotion. *Brain and cognition*, 52(1), 79-87.
- Hakerem, G. A. D., & Sutton, S. (1966). Pupillary response at visual threshold. *Nature*, 212, 485-486.
- Hall, E. T. (1966). The Hidden Dimension, *Editions Doubleday Anchor*, New York.
- Hamon, T., Fraisse, A., Paroubek, P., Zweigenbaum, P., & Grouin, C. (2015). Analyse des émotions, sentiments et opinions exprimés dans les tweets: présentation et résultats de l'édition 2015 du défi fouille de texte (DEFT). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01617180/document>
- Hampton, J., & Hampton, J. (2019). The ECG Made Easy E-Book. *Elsevier Health Sciences*.
- Harlow, H. F. (1958). The nature of love. *American psychologist*, 13(12), 673.

- Harlow, H. F., & Zimmermann, R. R. (1958). The development of affectional responses in infant monkeys. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 102(5), 501-509.
- Harmon-Jones, E., Sigelman, J., Bohlig, A., & Harmon-Jones, C. (2003). Anger, coping, and frontal cortical activity: The effect of coping potential on anger-induced left frontal activity. *Cognition and Emotion*, 17(1), 1-24.
- Hasboun, D., Ehrhard, Y., & Bonneville, F. (2006). Neuroanatomie : Morphologie, Université Pierre et Marie Curie–Paris VI, cours de la Faculté de Médecine Pitié Salpêtrière.
- Heller, M. A., & Gentaz, E. (2013). Psychology of touch and blindness. *Psychology press*.
- Henley, N. (1973). The politics of touch. In P. Brown (Ed.), *Radical psychology*, Harper & Row, New-York.
- Herz, R. S., Eliassen, J., Beland, S., & Souza, T. (2004). Neuroimaging evidence for the emotional potency of odor-evoked memory. *Neuropsychologia*, 42(3), 371-378.
- Hess, E. H., & Polt, J. M. (1960). Pupil size as related to interest value of visual stimuli. *Science*, 132(3423), 349-350.
- Hetzel, P. (2002). Planète conso: marketing expérientiel et nouveaux univers de consommation. Ed. *d'Organisation*.
- Hillion, A., & Boucher, J. M. (1991). Filtrages des images radar (SAR). *Statistique et analyse des données*, 16(2), 35-57.
- Hinrichs, H., & Machleidt, W. (1992). Basic emotions reflected in EEG-coherences. *International Journal of Psychophysiology*, 13(3), 225-232.
- Höfle, M., Kenntner-Mabiala, R., Pauli, P., & Alpers, G. W. (2008). You can see pain in the eye: pupillometry as an index of pain intensity under different luminance conditions. *International journal of psychophysiology*, 70(3), 171-175.
- Holbrook, M. B., & Batra, R. (1987). Assessing the role of emotions as mediators of consumer responses to advertising. *Journal of consumer research*, 14(3), 404-420.
- Holbrook, M. B., & Hirschman, E. C. (1982). The experiential aspects of consumption: Consumer fantasies, feelings, and fun. *Journal of consumer research*, 9(2), 132-140.
- Hollander, M., Wolfe, D. A., & Chicken, E. (1999). Nonparametric statistical methods. *John Wiley & Sons*. New York.
- Hollins, M., Fox, A., & Bishop, C. (2000). Imposed vibration influences perceived tactile smoothness. *Perception*, 29(12), 1455-1465.
- Horton, J. C., & Hoyt, W. F. (1991). The representation of the visual field in human striate cortex: a revision of the classic Holmes map. *Archives of ophthalmology*, 109(6), 816-824.
- Hough, G., & Sánchez, R. (1998). Descriptive analysis and external preference mapping of powdered chocolate milk. *Food quality and preference*, 9(4), 197-204.
- Houghton, A. R., Gray, D., & Jan, F. (2011). Maîtriser l'ECG: de la théorie à la clinique. *Elsevier Masson*.
- Howard, J.Y.S., & Sheth, I.N. (1968). The Theory of Buyer Behavior, in Perspective in consumption behavior, Eds Kassarian H.H., Robertson T.S., *Foresmann & Co*, 467-487.
- Huang, A. L., Chen, X., Hoon, M. A., Chandrashekar, J., Guo, W., Tränkner, D., ... & Zuker, C. S. (2006). The cells and logic for mammalian sour taste detection. *Nature*, 442(7105), 934-938.
- Hugdahl, K., & Davidson, R. J. (Eds.). (2004). The asymmetrical brain. *MIT press*.
- Huizingh, E. K. (2000). The content and design of web sites: an empirical study. *Information & management*, 37(3), 123-134.
- Husić-Mehmedović, M., Omeragić, I., Batagelj, Z., & Kolar, T. (2017). Seeing is not necessarily liking: Advancing research on package design with eye-tracking. *Journal of Business Research*, 80, 145-154.
- Husson, F., Lê, S., & Pagès, J. (2007). Variability of the representation of the variables resulting from PCA in the case of a conventional sensory profile. *Food quality and preference*, 18(7), 933-937.
- Huttmacher, F., & Kuhbandner, C. (2018). Long-term memory for haptically explored objects: fidelity, durability, incidental encoding, and cross-modal transfer. *Psychological science*, 29(12), 2031-2038.
- Irwin, J. R., & Baron, J. (2001). Response mode effects and moral values. *Organizational behavior and human decision processes*, 84(2), 177-197.
- Isbister, K., Höök, K., Laakolahti, J., & Sharp, M. (2007). The sensual evaluation instrument: Developing a trans-cultural self-report measure of affect. *International journal of human-computer studies*, 65(4), 315-328.
- Isen, A. M., & Daubman, K. A. (1984). The influence of affect on categorization. *Journal of personality and social psychology*, 47(6), 1206.
- Isen, A. M., Daubman, K. A., & Nowicki, G. P. (1987). Positive affect facilitates creative problem solving. *Journal of personality and social psychology*, 52(6), 1122.
- Isen, A. M., Rosenzweig, A. S., & Young, M. J. (1991). The influence of positive affect on clinical problem solving. *Medical Decision Making*, 11(3), 221-227.

- Ivarsson, M., Anderson, M., Åkerstedt, T., & Lindblad, F. (2013). The effect of violent and nonviolent video games on heart rate variability, sleep, and emotions in adolescents with different violent gaming habits. *Psychosomatic medicine, 75*(4), 390-396.
- James, W. (1890). *The Principles of Psychology: American Science Series-Advanced Course. Vol II. Editions Henry Holt and company, New-York.*
- Jänig, W., & Kümmel, H. (1981). Organization of the sympathetic innervation supplying the hairless skin of the cat's paw. *Journal of the autonomic nervous system, 3*(2-4), 215-230.
- Jansse, M. P. (1977). Pupillometry: The psychology of the pupillary response. *Hemisphere Pub.*
- Javorka, M., Zila, I., Balharek, T., & Javorka, K. (2002). Heart rate recovery after exercise: relations to heart rate variability and complexity. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research, 35*(8), 991-1000.
- Jessen, S., Altvater-Mackensen, N., & Grossmann, T. (2016). Pupillary responses reveal infants' discrimination of facial emotions independent of conscious perception. *Cognition, 150*, 163-169.
- Johnson, M. D. (1989). The differential processing of product category and noncomparable choice alternatives. *Journal of Consumer Research, 16*(3), 300-309.
- Johnstone, T., & Scherer, K. R. (2000). Vocal communication of emotion. *Handbook of emotions, 2*, 220-235.
- Jones, L. A. (1989). The assessment of hand function: a critical review of techniques. *The Journal of hand surgery, 14*(2), 221-228.
- Jordan, P. W. (2002). Designing pleasurable products: An introduction to the new human factors. *CRC press.*
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1976). Eye fixations and cognitive processes. *Cognitive psychology, 8*(4), 441-480.
- Kaaki, D., Baghdadi, O. K., Najm, N. E., & Olabi, A. (2012). Preference mapping of commercial Labneh (strained yogurt) products in the Lebanese market. *Journal of dairy science, 95*(2), 521-532.
- Kahn, B. E., & Isen, A. M. (1993). The influence of positive affect on variety seeking among safe, enjoyable products. *Journal of Consumer Research, 20*(2), 257-270.
- Kahneman, D., & Beatty, J. (1966). Pupil diameter and load on memory. *Science, 154*(3756), 1583-1585.
- Kalbach, J. (2016). *Mapping Experiences: A Complete Guide to Creating Value through Journeys. Blueprints, and Diagrams: O'Reilly Media.*
- Kano N. (1984). Attractive quality and must-be quality, *The Journal of Japanese Society for Quality Control 14*, 39-48.
- Katz, D. (1925). Der aufbau der tastwelt. https://www.vordenker.de/dkatz/dkatz_tastwelt_vd.pdf
- Kawabe, T. T., Maccallum, D. K., & Lillie, J. H. (1985). Variation in basement membrane topography in human thick skin. *The Anatomical Record, 211*(2), 142-148.
- Kim, B. (2015). Designing gamification in the right way. *Library Technology Reports, 51*(2), 29-35.
- Kim, H. S. (2006). Using hedonic and utilitarian shopping motivations to profile inner city consumers. *Journal of Shopping Center Research, 13*(1), 57-79.
- Kim, K. H., Bang, S. W., & Kim, S. R. (2004). Emotion recognition system using short-term monitoring of physiological signals. *Medical and biological engineering and computing, 42*(3), 419-427.
- Kinner, V. L., Kuchinke, L., Dierolf, A. M., Merz, C. J., Otto, T., & Wolf, O. T. (2017). What our eyes tell us about feelings: Tracking pupillary responses during emotion regulation processes. *Psychophysiology, 54*(4), 508-518.
- Kling, C. (1933). The role of the parasympathetics in emotions. *Psychological Review, 40*(4), 368.
- Klüver, H., & Bucy, P. C. (1938). An analysis of certain effects of bilateral temporal lobectomy in the rhesus monkey, with special reference to "psychic blindness". *The Journal of Psychology, 5*(1), 33-54.
- Knapp, M. L., Hall, J. A., & Horgan, T. G. (2013). *Nonverbal communication in human interaction.* Cengage Learning. Boston.
- Koelega, H. S. (1979). Olfaction and sensory asymmetry. *Chemical Senses, 4*(1), 89-95.
- Kohan, X. (1968). Physiological measure of commercial effectiveness. *Journal of Advertising Research, 8*(4), 46-48.
- Kohn, M., & Clynes, M. (1969). Color dynamics of the pupil. *Annals of the New York Academy of Sciences, 156*(2), 931-950.
- Konarski, J. Z., McIntyre, R. S., Grupp, L. A., & Kennedy, S. H. (2005). Is the cerebellum relevant in the circuitry of neuropsychiatric disorders?. *Journal of Psychiatry and Neuroscience, 30*(3), 178.
- Konorski, J. (1967). Integrative activity of the brain; an interdisciplinary approach.
- Kotler, P. (1973). Atmospheric as a marketing tool. *Journal of retailing, 49*(4), 48-64.
- Kreibig, S. D. (2010). Autonomic nervous system activity in emotion: A review. *Biological psychology, 84*(3), 394-421.
- Krugman, H. E. (1964). Some applications of pupil measurement. *Journal of Marketing Research, 1*(4), 15-19.
- Kruskal, J. B. (1964). Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis. *Psychometrika, 29*(1), 1-27.
- Kuchinke, L., Fritzsche, S., Hofmann, M. J., & Jacobs, A. M. (2013). Neural correlates of episodic memory: associative memory and confidence drive hippocampus activations. *Behavioural brain research, 254*, 92-101.

- Kuchinke, L., Schneider, D., Kotz, S. A., & Jacobs, A. M. (2011). Spontaneous but not explicit processing of positive sentences impaired in Asperger's syndrome: Pupillometric evidence. *Neuropsychologia*, 49(3), 331-338.
- Kuchinke, L., Võ, M. L. H., Hofmann, M., & Jacobs, A. M. (2007). Pupillary responses during lexical decisions vary with word frequency but not emotional valence. *International Journal of Psychophysiology*, 65(2), 132-140.
- Ladwein, R. (2000). Ergonomie et accessibilité des sites web: quelques problèmes et enjeux pour le e-commerce. *Décisions Marketing*, 57-71.
- Laeng, B., Sirois, S., & Gredebäck, G. (2012). Pupillometry: A window to the preconscious?. *Perspectives on psychological science*, 7(1), 18-27.
- Lajante, M., & Droulers, O. (2013). Importation de la théorie de l'évaluation cognitive et dynamique des processus émotionnels: illustration par la mesure de l'activité du système nerveux autonome. *Management Avenir*, (4), 171-187.
- Lallemand, C., & Gronier, G. (2015). Méthodes de design UX: 30 méthodes fondamentales pour concevoir et évaluer les systèmes interactifs. Editions Eyrolles.
- Lallemand, C., Koenig, V., Gronier, G., & Martin, R. (2015). Création et validation d'une version française du questionnaire AttrakDiff pour l'évaluation de l'expérience utilisateur des systèmes interactifs. *European Review of Applied Psychology*, 65(5), 239-252.
- Lanatà, A., Armato, A., Valenza, G., & Scilingo, E. P. (2011). Eye tracking and pupil size variation as response to affective stimuli: a preliminary study. [Conférence]. In *2011 5th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth) and Workshops* (pp. 78-84). IEEE.
- Landmann, C. (2007). *Le cortex préfrontal et la dopamine striatale dans l'apprentissage guidé par la récompense: conception et étude d'une tâche cognitive d'exploration par essais et erreurs en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle et en tomographie par émission de positons avec le 11C-raclopride* [Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Paris]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00160868/>
- Lang, P. J., Bradley, M. M., & Cuthbert, B. N. (1997). International affective picture system (IAPS): Technical manual and affective ratings. *NIMH Center for the Study of Emotion and Attention*, 1, 39-58.
- Lang, P. J., Bradley, M. M., & Cuthbert, B. N. (1999). International affective picture system (IAPS): Instruction manual and affective ratings. *The center for research in psychophysiology, University of Florida*.
- Lang, P. J., Greenwald, M. K., Bradley, M. M., & Hamm, A. O. (1993). Looking at pictures: Affective, facial, visceral, and behavioral reactions. *Psychophysiology*, 30(3), 261-273.
- Lang, P. J., Kozak, M. J., Miller, G. A., Levin, D. N., & McLean Jr, A. (1980). Emotional imagery: Conceptual structure and pattern of somato-visceral response. *Psychophysiology*, 17(2), 179-192.
- Lange, C. G. (1885). The mechanism of the emotions. *The classical psychologists*, 672-684.
- Lavín, C., San Martín, R., & Rosales Jubal, E. (2014). Pupil dilation signals uncertainty and surprise in a learning gambling task. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 7, 218.
- Le Cozet P. (2015). *Le gouvernement des émotions ... et l'art de déjouer les manipulations*, Edition Albin Michel, ISBN-13: 978-2226256997
- Lederman, S. J. (1991). Skin and touch. *Encyclopedia of human biology*, Vol. 7 (pp. 51-63).
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1987). Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive psychology*, 19(3), 342-368.
- LeDoux, J. (1998). The emotional brain: The mysterious underpinnings of emotional life. *Simon and Schuster*. <https://books.google.fr/books>
- Lee, S., Ha, S., & Widdows, R. (2011). Consumer responses to high-technology products: Product attributes, cognition, and emotions. *Journal of business research*, 64(11), 1195-1200.
- Legrand, N., Guérolé, F., Eustache, F., & Rauchs, G. (2015). Rêves et mémoire: revue de la littérature en neuropsychologie et neurosciences cognitives. *Revue de neuropsychologie*, 7(4), 279-290.
- Lehmann, E. L., & D'Abbrera, H. J. (1975). *Nonparametrics: statistical methods based on ranks*. Holden-day.
- Lemerrier, A. (2014). *Développement de la pupillométrie pour la mesure objective des émotions dans le contexte de la consommation alimentaire* (Doctoral dissertation, Paris 8).
- Leskovec J., Rajaraman A., & Ullman J.D. (2014). Mining of massive datasets. *Cambridge university press*. ISBN 978-1-108-47634-8.
- Levenson, R. W. (1992). *Autonomic nervous system differences among emotions*. Editions SAGE Publications, Sage CA, Los Angeles
- Levenson, R. W. (1999). The intrapersonal functions of emotion. *Cognition & Emotion*, 13(5), 481-504.
- Levy, P. (2008). Ingénierie Kansei, ou comment lier affectivité et conception. *Techniques de l'ingénieur. L'Entreprise industrielle*, (AG2140).
- Liao, S. H., Chu, P. H., & Hsiao, P. Y. (2012). Data mining techniques and applications—A decade review from 2000 to 2011. *Expert systems with applications*, 39(12), 11303-11311.
- Libby Jr, W. L., Lacey, B. C., & Lacey, J. I. (1973). Pupillary and cardiac activity during visual attention. *Psychophysiology*, 10(3), 270-294.

- Liddell, B. J., Brown, K. J., Kemp, A. H., Barton, M. J., Das, P., Peduto, A., ... & Williams, L. M. (2005). A direct brainstem–amygdala–cortical ‘alarm’ system for subliminal signals of fear. *Neuroimage*, 24(1), 235-243.
- Likert, R. (1932). A technique for the measurement of attitudes. *Archives of psychology*, 22, 5-55.
- Liljander, V., & Strandvik, T. (1997). Emotions in service satisfaction. *International Journal of service industry management*, 8(2), 148-169.
- Lim, D. (2003). *Modélisation du processus de conception centrée utilisateur, basée sur l'intégration des méthodes et outils de l'ergonomie cognitive: application à la conception d'IHM pour la télévision interactive* [Doctoral dissertation, Arts et Métiers, ParisTech]. <http://www.sudoc.fr/074737635>
- Lindquist, K. A., & Barrett, L. F. (2008). Emotional complexity. *Handbook of emotions*, 4, 513-530.
- Lindstrom M. (2010). Brand Sense, 2nd Edition, Kogan Page. ISBN 978-0749460570.
- Loewenfeld, I. E. (1958). Mechanisms of reflex dilatation of the pupil. *Documenta Ophthalmologica*, 12(1), 185-448.
- Lowe, J. M. (2017). *Sensations et perceptions visuelles et tactiles de matériaux texturés* [Doctoral dissertation, Université de Lyon]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01848729>
- Lowenstein O., & Loewenfeld I.E. (1969). The pupil, in the eye, 2nd Edition, Vol III, Academic Press, London, New-York.
- Luce, R. D., & Tukey, J. W. (1964). Simultaneous conjoint measurement: A new type of fundamental measurement. *Journal of mathematical psychology*, 1(1), 1-27.
- Lucero, A., & Arrasvuori, J. (2010). PLEX Cards: a source of inspiration when designing for playfulness. [Conférence]. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Fun and Games* (pp. 28-37).
- Mabed, I. S., Saad, A., Guilbert, E., & Gatinel, D. (2014). Measurement of pupil center shift in refractive surgery candidates with caucasian eyes using infrared pupillometry. *Journal of refractive surgery*, 30(10), 694-700.
- MacInnis, D. J., & Jaworski, B. J. (1989). Information processing from advertisements: Toward an integrative framework. *Journal of marketing*, 53(4), 1-23.
- MacLean, P. D. (1949). Psychosomatic disease and the "visceral brain"; recent developments bearing on the Papez theory of emotion. *Psychosomatic medicine*, 11, 338–353.
- MacLean, P. D. (1973). A triune concept of the brain and behavior, including psychology of memory, sleep and dreaming. In *Proceedings of the Ontario Mental Health Foundation meeting at Queen's University*. University of Toronto Press, Toronto.
- Mallet, L., Schüpbach, M., N'Diaye, K., Remy, P., Bardinet, E., Czernecki, V., ... & Yelnik, J. (2007). Stimulation of subterritories of the subthalamic nucleus reveals its role in the integration of the emotional and motor aspects of behavior. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(25), 10661-10666.
- Mano, H., & Oliver, R. L. (1993). Assessing the dimensionality and structure of the consumption experience: evaluation, feeling, and satisfaction. *Journal of Consumer research*, 20(3), 451-466.
- Mantelet, F. (2006). *Prise en compte de la perception émotionnelle du consommateur dans le processus de conception de produits* (Doctoral dissertation, Paris, ENSAM).
- Marchewka, A., Żurawski, Ł., Jednoróg, K., & Grabowska, A. (2014). The Nencki Affective Picture System (NAPS): Introduction to a novel, standardized, wide-range, high-quality, realistic picture database. *Behavior research methods*, 46(2), 596-610.
- Marshall, S. P. (2007). Identifying cognitive state from eye metrics. *Aviation, space, and environmental medicine*, 78(5), B165-B175.
- Martin, P. (2013). Émotion et structure prosodique: qui domine qui? *Cartographie des émotions*, Presses Sorbonne Nouvelle, Paris, 176-184.
- Maslow A.H. (1943). A theory of human motivation. *Psychological review*, 50(4), 370.
- Maugendre C. (2016). L'influence de l'émotion sur le système postural de l'Homme, Institut de formation en Pédiatrie-Podologie, Rennes.
- McCabe, D. B., & Nowlis, S. M. (2003). The effect of examining actual products or product descriptions on consumer preference. *Journal of Consumer Psychology*, 13(4), 431-439.
- McGlone, F., Vallbo, A. B., Olausson, H., Loken, L., & Wessberg, J. (2007). Discriminative touch and emotional touch. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 61(3), 173.
- Mehrabian, A., & Russell, J. A. (1974). *An approach to environmental psychology*. the MIT Press.
- Meilgaard, M. M. G. V., Civille, G. V., & Carr, B. T. (1999). Selection and training of panel members. *Sensory evaluation techniques*, 3, 174-176.
- Melzack, R. (1975). The McGill Pain Questionnaire: major properties and scoring methods. *pain*, 1(3), 277-299.
- Merleau-Ponty, M., & Carman, T. (2013). *Phenomenology of Perception*. Abingdon, Oxon.
- Miles, L. D. (2015). *Techniques of value analysis and engineering*. Miles Value Foundation. Editions McGraw-Hill, New-York.
- Milner, T. A. (1991). Cholinergic neurons in the rat septal complex: ultrastructural characterization and synaptic relations with catecholaminergic terminals. *Journal of Comparative Neurology*, 314(1), 37-54.

- Miner, G., Elder IV, J., Fast, A., Hill, T., Nisbet, R., & Delen, D. (2012). *Practical text mining and statistical analysis for non-structured text data applications*. Academic Press. ISBN 978-0-12-386979-1.
- Mogg, K., & Bradley, B. P. (1999). Some methodological issues in assessing attentional biases for threatening faces in anxiety: A replication study using a modified version of the probe detection task. *Behaviour research and therapy*, 37(6), 595-604.
- Mogg, K., Millar, N., & Bradley, B. P. (2000). Biases in eye movements to threatening facial expressions in generalized anxiety disorder and depressive disorder. *Journal of abnormal psychology*, 109(4), 695.
- Mojet, J., Dürrschmid, K., Danner, L., Jöchl, M., Heiniö, R. L., Holthuysen, N., & Köster, E. (2015). Are implicit emotion measurements evoked by food unrelated to liking?. *Food Research International*, 76, 224-232.
- Moruzzi, G., & Magoun, H. W. (1949). Brain Reticular formation and activation of the EEG Electroencephalogr. *Clin. Neurophysiol*, 1, 1-165.
- Moskowitz, H. R. (1983). Product testing and sensory evaluation of foods: marketing and R&D approaches (No. MOS 641 (BV 905.7)). *Food & Nutrition Press, Inc.*
- Muller, C., Vermeulen, W. J., & Glasbergen, P. (2012). Pushing or sharing as value-driven strategies for societal change in global supply chains: two case studies in the British–South African fresh fruit supply chain. *Business Strategy and the Environment*, 21(2), 127-140.
- Murray, J. (2012). Towards a better specification of the store environment stimulus: an augmented stimulus-organism-response (SOR) model that captures brand expressiveness. *Conf. Proc. British Academy of Management*, September 13th, Cardiff.
- Musée d'art moderne, 2008. <https://www.lescollectionsdesign.fr/base-de-donnees/#/artworks>, St-Etienne.
- Muthukumaraswamy, S. D., Edden, R. A., Jones, D. K., Swettenham, J. B., & Singh, K. D. (2009). Resting GABA concentration predicts peak gamma frequency and fMRI amplitude in response to visual stimulation in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(20), 8356-8361.
- Nagamachi, M. (1990). Kansei Engineering and a Product Development. *The Journal of the Business Engineering of Japan*, 41(4B), 66-71.
- Nagamachi, M. (1995). Kansei engineering: a new ergonomic consumer-oriented technology for product development. *International Journal of industrial ergonomics*, 15(1), 3-11.
- Neff, J. (2000). Product scents hide absence of true innovation. *Advertising Age*, 71(8), 22-22.
- Nielsen, J. A., Zielinski, B. A., Ferguson, M. A., Lainhart, J. E., & Anderson, J. S. (2013). An evaluation of the left-brain vs. right-brain hypothesis with resting state functional connectivity magnetic resonance imaging. *PLoS one*, 8(8), e71275.
- Nieuwenhuis, S., De Geus, E. J., & Aston-Jones, G. (2011). The anatomical and functional relationship between the P3 and autonomic components of the orienting response. *Psychophysiology*, 48(2), 162-175.
- Nieuwenhuys, R., Voogd, J., & Van Huijzen, C. (2007). *The human central nervous system: a synopsis and atlas*. Springer Science & Business Media.
- Nimchinsky, E. A., Vogt, B. A., Morrison, J. H., & Hof, P. R. (1995). Spindle neurons of the human anterior cingulate cortex. *Journal of Comparative Neurology*, 355(1), 27-37.
- Nisbett, R. E., & Wilson, T. D. (1977). Telling more than we can know: verbal reports on mental processes. *Psychological review*, 84(3), 231.
- Noback, C. R., Ruggiero, D. A., Demarest, R. J., & Strominger, N. L. (Eds.). (2005). *The human nervous system: structure and function* (No. 744). Springer Science & Business Media.
- Norman, D. A. (2004). *Emotional design: Why we love (or hate) everyday things*. Basic Civitas Books. New York.
- Norman D. A. (2013). *Design of everyday things: Revised and expanded*, 2nd Edition, ISBN-13 : 978-0262525671.
- Norman D.A., & Shallice T. (1986). *Attention to action*. In *Consciousness and self-regulation* (pp. 1-18), Springer, Boston, MA.
- Nugier, A. (2009). Histoire et grands courants de recherche sur les émotions. *Revue électronique de psychologie sociale*, 4(4), 8-14.
- Nunnally, J. C., Knott, P. D., Duchnowski, A., & Parker, R. (1967). Pupillary response as a general measure of activation. *Perception & psychophysics*, 2(4), 149-155.
- Nuszbaum, M., Voss, A., Klauer, K. C., & Betsch, T. (2010). Assessing individual differences in the use of haptic information using a German translation of the Need for Touch Scale. *Social psychology*, 41(4), 263-271.
- Ochsner, K. N. (2000). Are affective events richly recollected or simply familiar? The experience and process of recognizing feelings past. *Journal of experimental psychology: general*, 129(2), 242.
- Olausson, H., Lamarre, Y., Backlund, H., Morin, C., Wallin, B. G., Starck, G., ... & Bushnell, M. C. (2002). Unmyelinated tactile afferents signal touch and project to insular cortex. *Nature neuroscience*, 5(9), 900-904.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97-113.
- Olds, J., & Milner, P. (1954). Positive reinforcement produced by electrical stimulation of septal area and other regions of rat brain. *Journal of comparative and physiological psychology*, 47(6), 419.

- Oliver, R. L. (1993). Cognitive, affective, and attribute bases of the satisfaction response. *Journal of consumer research*, 20(3), 418-430.
- Oosthuizen, G. D., & Venter, F. J. (1995). Using a lattice for visual analysis of categorical data. In *Perceptual issues in visualization* (pp. 143-155). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Osgood, C. E. (1962). Studies on the generality of affective meaning systems. *American Psychologist*, 17(1), 10.
- Osterwalder, A., Pigneur, Y., & Porgeauc, E. (2011). *Business model nouvelle génération: un guide pour visionnaires, révolutionnaires et challengers* (Vol. 1). Pearson.
- Pagès, J. (2004). Multiple factor analysis: Main features and application to sensory data. *Revista Colombiana de Estadística*, 27(1), 1-26.
- Pagès, J. (2005). 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*, 16(7), 642-649.
- Paivio, A., & Simpson, H. M. (1966). The effect of word abstractness and pleasantness on pupil size during an imagery task. *Psychonomic Science*, 5(2), 55-56.
- Palomba, D., Sarlo, M., Angrilli, A., Mini, A., & Stegagno, L. (2000). Cardiac responses associated with affective processing of unpleasant film stimuli. *International journal of psychophysiology*, 36(1), 45-57.
- Papez, J. W. (1937). A proposed mechanism of emotion. *Archives of Neurology & Psychiatry*, 38(4), 725-743.
- Parasuraman, A., Zeithaml, V. A., & Berry, L. L. (1988). Servqual: A multiple-item scale for measuring consumer perc. *Journal of retailing*, 64(1), 12.
- Partala, T., & Surakka, V. (2003). Pupil size variation as an indication of affective processing. *International journal of human-computer studies*, 59(1-2), 185-198.
- Pavlov I.P. (1941). *Conditioned reflexes and Psychiatry*, Edited by Gantt W.H., Lawrence and Wishart Ltd, London. <http://s-f-walker.org.uk/pubsebooks/pdfs/Conditioned%20Reflexes%20And%20Psychiatry.pdf>
- Peavler, W. S. (1974). Pupil size, information overload, and performance differences. *Psychophysiology*, 11(5), 559-566.
- Peck, J., & Childers, T. L. (2003). Individual differences in haptic information processing: The “need for touch” scale. *Journal of Consumer Research*, 30(3), 430-442.
- Peck, J., & Childers, T. L. (2006). If I touch it I have to have it: Individual and environmental influences on impulse purchasing. *Journal of business research*, 59(6), 765-769.
- Pelet J.E. (2008). Effets de la couleur sur des sites web marchands sur la mémorisation et sur l’intention d’achat de l’internaute. [Thèse de Doctorat, Université de Nantes]. http://kmcms.net/these/backup/pelet/these_pelet.pdf
- Pensé-Lhéritier A.M. (2014). Evaluation sensorielle et formulation. Techniques de l’ingénieur Principes de formulation, (j2243).
- Peryam, D. R., Pilgrim, F.J., & Peterson, M.S. (1954). *Food Acceptance Testing Methodology: A Symposium* (Vol. 1). Advisory Board on Quartermaster Research and Development Committee on Foods, National Academy of Sciences-National Research Council. National Academy of Sciences (US). National Research Council.
- Peters, R. M., Hackeman, E., & Goldreich, D. (2009). Diminutive digits discern delicate details: fingertip size and the sex difference in tactile spatial acuity. *Journal of Neuroscience*, 29(50), 15756-15761.
- Petiot J.F. (2014). Intégrer les perceptions utilisateur en conception de produit, Techniques de l’ingénieur. (ti1119).
- Petiot J.F. (2015). Comment tenir compte des préférences en conception de produit. Techniques de l’ingénieur – Fiche technique. (Ti 1118).
- Petiot, J. F., & Yannou, B. (2004). Measuring consumer perceptions for a better comprehension, specification and assessment of product semantics. *International Journal of industrial ergonomics*, 33(6), 507-525.
- Peyrin, C., Ramanoël, S., Roux-Sibilon, A., Chokron, S., & Hera, R. (2017). Scene perception in age-related macular degeneration: Effect of spatial frequencies and contrast in residual vision. *Vision Research*, 130, 36-47.
- Philippe, J. (1916). Note sur les formes de perception des sensations tactiles de Weber. *Revue Philosophique de la France et de l’Étranger*, 82, 161-165.
- Pichon, S., & Vuilleumier, P. (2011). Neuro-imagerie et neuroscience des émotions-Imagerie et cognition (8). *médecine/sciences*, 27(8-9), 763-770.
- Pille H., & Du Boisrouvray F. (2003). Design sensoriel appliqué aux produits/process Polyrey. Proc. [Conférence]. 10ème Séminaire CONFERE, Belfort, France, 21-30.
- Pillemer, D. B., Goldsmith, L. R., Panter, A. T., & White, S. H. (1988). Very long-term memories of the first year in college. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 14(4), 709.
- Pillet, M. (2001). Les plans d'expériences par la méthode Taguchi. (hal-00470004)
- Pine, B. J., Pine, J., & Gilmore, J. H. (1999). *The experience economy: work is theatre & every business a stage*. Harvard Business Press.

- Pineda, J. A., & Hecht, E. (2009). Mirroring and mu rhythm involvement in social cognition: are there dissociable subcomponents of theory of mind?. *Biological psychology*, 80(3), 306-314.
- Pirot, S. (2003). L'anatomie fonctionnelle du cortex préfrontal: du singe à l'homme. *Encephale*, 20, 27-31.
- Pizzagalli, D. A., Sherwood, R. J., Henriques, J. B., & Davidson, R. J. (2005). Frontal brain asymmetry and reward responsiveness: a source-localization study. *Psychological Science*, 16(10), 805-813.
- Platter J. (2017). Platter's South African Wine Guide, John Platter SA Wineguide (Pty) Ltd, ISBN 978-0-9870046-6-6.
- Plos, O., Dumas, C., Buisine, D., & Aoussat, A. (2006). Innovation, Conception, Handicap : Rôle de centres de ressources nationaux sur le handicap pour une logique d'innovation. *Handicap 2006*.
- Pomey-Rey, D. (1999). *La peau et ses états d'âme*. Hachette.
- Pujol, R., & Lavigne-Rebillard, M. (1985). Early stages of innervation and sensory cell differentiation in the human fetal organ of Corti. *Acta Oto-laryngologica*, 99(sup423), 43-50.
- Purves D. (2019). Neurosciences, Editions De Boeck Supérieur, ISBN : 2807314929. 1-790.
- Purves, D., & Lamantia, A. (1993). Development of blobs in the visual cortex of macaques. *Journal of Comparative Neurology*, 334(2), 169-175.
- Richins, M. L. (1997). Measuring emotions in the consumption experience. *Journal of consumer research*, 24(2), 127-146.
- Rieger, G., & Savin-Williams, R. C. (2012). The eyes have it: Sex and sexual orientation differences in pupil dilation patterns. *PloS one*, 7(8), e40256.
- Roederer, C. (2012). *Marketing et consommation expérientiels*. EMS Editions.
- Rolls, E. T., O'Doherty, J., Kringelbach, M. L., Francis, S., Bowtell, R., & McGlone, F. (2003). Representations of pleasant and painful touch in the human orbitofrontal and cingulate cortices. *Cerebral cortex*, 13(3), 308-317.
- Rook, D. W., & Fisher, R. J. (1995). Normative influences on impulsive buying behavior. *Journal of consumer research*, 22(3), 305-313.
- Rosenberg, M. J., Hovland, C. I., McGuire, W. J., Abelson, R. P., & Brehm, J. W. (1960). Attitude organization and change: An analysis of consistency among attitude components. (Yales studies in attitude and communication.), Vol. III.
- Roto V., Law, E., Vermeeren A., & Hoonhout J. (2011). User experience white paper. Bringing clarity to the concept of user experience. <http://www.allaboutux.org/files/UX-WhitePaper.pdf>
- Ruby, P. M. (2011). Experimental research on dreaming: state of the art and neuropsychanalytic perspectives. *Frontiers in Psychology*, 2, 286.
- Rudrauf, D., Lachaux, J. P., Damasio, A., Baillet, S., Hugueville, L., Martinerie, J., ... & Renault, B. (2009). Enter feelings: somatosensory responses following early stages of visual induction of emotion. *International Journal of Psychophysiology*, 72(1), 13-23.
- Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of personality and social psychology*, 39(6), 1161.
- Sander, D. (2013). Models of emotion: The affective neuroscience approach. *The Cambridge handbook of human affective neuroscience*, 5-56.
- Sant R. (2017). Emotional attachment and profitable customer relationships, *Ipsos report*, Eds Game changers.
- Schachter, S., & Singer, J. (1962). Cognitive, social, and physiological determinants of emotional state. *Psychological review*, 69(5), 379.
- Schaefer, A., Nils, F., Sanchez, X., & Philippot, P. (2010). Assessing the effectiveness of a large database of emotion-eliciting films: A new tool for emotion researchers. *Cognition and emotion*, 24(7), 1153-1172.
- Scherer, K. R. (1992). What does facial expression express?. *In Parts of the argument in this chapter have been presented at the 36th congress of the German Society of Psychology in Berlin, 1988*. John Wiley & Sons.
- Scherer, K. R. (2009). The dynamic architecture of emotion: Evidence for the component process model. *Cognition and emotion*, 23(7), 1307-1351.
- Scherer, K. R. (2013). Emotion in action, interaction, music, and speech. *Language, music, and the brain: A mysterious relationship*, 107-139.
- Scherer, K. R., Banse, R., Wallbott, H. G., & Goldbeck, T. (1991). Vocal cues in emotion encoding and decoding. *Motivation and emotion*, 15(2), 123-148.
- Scherer, K. R., Schorr, A., & Johnstone, T. (Eds.). (2001). Appraisal processes in emotion: Theory, methods, research. *Oxford University Press*.
- Scherer, K. R., & Zei, B. (1989). La voix comme indice affectif. *Revue médicale de la Suisse Romande*, 109, 61-66.
- Schifferstein, H. N., & Cleiren, M. P. (2005). Capturing product experiences: a split-modality approach. *Acta psychologica*, 118(3), 293-318.
- Schirmer, A., & Adolphs, R. (2017). Emotion perception from face, voice, and touch: comparisons and convergence. *Trends in cognitive sciences*, 21(3), 216-228.

- Schlich, P. (1995). Preference mapping: relating consumer preferences to sensory or instrumental measurements. *Colloques de l'INRA* (France). ISSN : 0293-1915.
- Schlomer, G. L., Bauman, S., & Card, N. A. (2010). Best practices for missing data management in counseling psychology. *Journal of Counseling psychology*, 57(1), 1.
- Schütte, S. (2002). *Designing feelings into products: Integrating kansei engineering methodology in product development* [Doctoral dissertation, Institutionen för konstruktions-och produktionsteknik].
- Seeley, W. W., Merkle, F. T., Gaus, S. E., Craig, A. D., Allman, J. M., Hof, P. R., & Economo, C. V. (2012). Distinctive neurons of the anterior cingulate and frontoinsula cortex: a historical perspective. *Cerebral cortex*, 22(2), 245-250.
- Sequeira, H., Hot, P., Silvert, L., & Delplanque, S. (2009). Electrical autonomic correlates of emotion. *International journal of psychophysiology*, 71(1), 50-56.
- Sequeira, H., & Roy, J. C. (1997). Neural control of electrodermal activity. *Central nervous control of autonomic function*, 11, 259-293.
- Seron, X. (2009). L'individualisation des fonctions exécutives: historique et repères. *Revue de neuropsychologie*, 1(1), 16-23.
- Servais, V. (2007). La relation homme-animal. La relation à l'animal peut-elle devenir significative, donc thérapeutique dans le traitement des maladies psychiques. *Enfances Psy*, (2), 46-57.
- Shepard R.N., Romney A.K., & Nerlove S.B. (1974). Multidimensional scaling: Theory and applications in the behavioral sciences, *American Educational Research Journal* 11(4), 437-439.
- Sherman, E., Mathur, A., & Smith, R. B. (1997). Store environment and consumer purchase behavior: mediating role of consumer emotions. *Psychology & Marketing*, 14(4), 361-378.
- Shiota, M. N., Neufeld, S. L., Yeung, W. H., Moser, S. E., & Perea, E. F. (2011). Feeling good: autonomic nervous system responding in five positive emotions. *Emotion*, 11(6), 1368.
- Shostack, G. L. (1977). Breaking free from product marketing. *Journal of marketing*, 41(2), 73-80.
- Silk, A. J., & Urban, G. L. (1978). Pre-test-market evaluation of new packaged goods: A model and measurement methodology. *Journal of marketing Research*, 15(2), 171-191.
- Skinner, B. F. (1963). Operant behavior. *American psychologist*, 18(8), 503.
- Spapé, M. M., Harjunen, V., & Ravaja, N. (2017). Effects of touch on emotional face processing: A study of event-related potentials, facial EMG and cardiac activity. *Biological Psychology*, 124, 1-10.
- Spence, C., Puccinelli, N. M., Grewal, D., & Roggeveen, A. L. (2014). Store atmospherics: A multisensory perspective. *Psychology & Marketing*, 31(7), 472-488.
- Spinney, L. (2013). Finding market share in the overlap of the senses. *New Scientist*, 219(2934), 28-29.
- Spitz, R. A. (1945). Hospitalism: An inquiry into the genesis of psychiatric conditions in early childhood. *The psychoanalytic study of the child*, 1(1), 53-74.
- Steinhauer S.R., Boller F., Zubin J., & Pearlman S. (1983). Pupillary dilation to emotional visual stimuli revisited, *Psychophysiology*, 20, 472.
- Steinhauer, S. R., & Hakerem, G. (1992). The pupillary response in cognitive psychophysiology and schizophrenia. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 658(1), 182-204.
- Stemmler, G. (2003). Methodological considerations in the psychophysiological study of emotion. *Handbook of affective sciences*, 37, 225-255.
- Stemmler, G. (2004). Physiological processes during emotion. The regulation of emotion. In *The regulation of emotion*, Psychology Press, 48-85.
- Stenger, T. (2008). Les processus de décision d'achat de vin par Internet: entre recherche d'information et prescription en ligne. *Décisions marketing*, 59-70.
- Stevenson, R. A., & James, T. W. (2008). Affective auditory stimuli: Characterization of the International Affective Digitized Sounds (IADS) by discrete emotional categories. *Behavior research methods*, 40(1), 315-321.
- Stewart, D. W., & Furse, D. H. (1982). Applying psychophysiological measures to marketing and advertising research problems. *Current issues and research in advertising*, 5(1), 1-38.
- Stone, H., & Sidel, J. L. (2012). Chapter 6. Descriptive analysis. *Sensory evaluation practices*, 233e289.
- Strack, F., Schwarz, N., & Gschneidinger, E. (1985). Happiness and reminiscing: the role of time perspective, affect, and mode of thinking. *Journal of personality and social psychology*, 49(6), 1460.
- Stuss, D. T., & Knight, R. T. (Eds.). (2013). *Principles of frontal lobe function*. Oxford University Press.
- Suvilehto, J. T., Glerean, E., Dunbar, R. I., Hari, R., & Nummenmaa, L. (2015). Topography of social touching depends on emotional bonds between humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(45), 13811-13816.
- Tähti, M., & Arhippainen, L. (2004). A Proposal of collecting Emotions and Experiences. *Interactive Experiences in HCI*, 2, 195-198.

- Tasli, H. E., Gudi, A., & den Uyl, M. (2014). Remote PPG based vital sign measurement using adaptive facial regions. [Conférence]. In *2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)* (pp. 1410-1414). IEEE.
- Tatum IV, W. O. (Ed.). (2014). *Handbook of EEG interpretation*. Demos Medical Publishing.
- Tcherkassof, A., & de Suremain F. (2005). Burkina Faso and France: A cross-cultural study of the judgment of action readiness in facial expressions of emotion. *Psychologia*, *48*(4), 317-334.
- Thieulin, C. (2017). *Caractérisation des mécanismes d'endommagement du stratum corneum induit par le frottement répété de papiers en cellulose* (Doctoral dissertation, Lyon).
- Thorndike E.L. (1911). *Animal intelligence: experimental studies*, Transaction Publishers, *New Brunswick and London*.
- Thorpe, S., Fize, D., & Marlot, C. (1996). Speed of processing in the human visual system. *nature*, *381*(6582), 520-522.
- Thurstone, L. L. (1927). A law of comparative judgment. *Psychological review*, *34*(4), 273.
- Tiger L. (1992). *A la recherche des plaisirs*, traduit de l'américain par Ter-Sarkissian C., Edition Dunod, Paris.
- Tobin, M., Bozic, N., Douglas, G., & Greaney, J. (1996). How non-visual modalities can help the young visually impaired child to succeed in visual and other tasks. *British Journal of Visual Impairment*, *14*(1), 11-17.
- Toscano, R., Bertheaux, C., Fortunier, R., & Borg, C. (2018). Integration of perception and emotions in a new sensory design process. *International Journal of Design Engineering*, *8*(1), 73-97.
- Toscano, R., & Lyonnet, P. (2002). Parameterization of a fuzzy classifier for the diagnosis of an industrial process. *Reliability Engineering & System Safety*, *77*(3), 269-279.
- Tractinsky, N., Katz, A. S., & Ikar, D. (2000). What is beautiful is usable. *Interacting with computers*, *13*(2), 127-145.
- Tran, H. V. (2007). *Caractérisation des propriétés mécaniques de la peau humaine in vivo via l'IRM*. [Doctoral dissertation, Université de Technologie de Compiègne]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00207740>.
- Tversky, A., & Kahneman, D. (1981). Judgments of and by representativeness (No. TR-3). Stanford Univ CA Dept of psychology.
- Tversky, A., & Kahneman, D. (1986). Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. Judgment and decision making: *An interdisciplinary reader*, 38-55.
- Tversky, A., Sattath, S., & Slovic, P. (1988). Contingent weighting in judgment and choice. *Psychological review*, *95*(3), 371.
- Underhill, P. (2009). *Why we buy: The science of shopping--updated and revised for the Internet, the global consumer, and beyond*. Simon and Schuster.
- Valente, D., Theurel, A., & Gentaz, E. (2018). The role of visual experience in the production of emotional facial expressions by blind people: A review. *Psychonomic bulletin & review*, *25*(2), 483-497.
- Vallet, W. (2018). *Étude électroencéphalographique des processus du traitement émotionnel en psychopathie infra-clinique*. [Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, Canada].
- Van Boven, R. W., Hamilton, R. H., Kauffman, T., Keenan, J. P., & Pascual-Leone, A. (2000). Tactile spatial resolution in blind Braille readers. *Neurology*, *54*(12), 2230-2236.
- Van Boxtel, A. (2010). Facial EMG as a tool for inferring affective states. In *Proceedings of measuring behavior* (pp. 104-108). Wageningen: *Noldus Information Technology*.
- Van Essen, D. C., & Maunsell, J. H. (1983). Hierarchical organization and functional streams in the visual cortex. *Trends in neurosciences*, *6*, 370-375.
- Van Hooijdonk, R., Mathot, S., Schat, E., Spencer, H., van der Stigchel, S., & Dijkerman, H. C. (2019). Touch-induced pupil size reflects stimulus intensity, not subjective pleasantness. *Experimental brain research*, *237*(1), 201-210.
- Van Hoorebeke, D. (2008). L'émotion et la prise de décision. *Revue française de gestion*, (2), 33-44.
- Vastenburger, M., Romero Herrera, N., Van Bel, D., & Desmet, P. (2011). PMRI: development of a pictorial mood reporting instrument. [Conférence]. In *CHI'11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, Vancouver, Canada. (pp. 2155-2160).
- Venkatesan, L., Barlow, S. M., & Kieweg, D. (2015). Age- and sex-related changes in vibrotactile sensitivity of hand and face in neurotypical adults. *Somatosensory & motor research*, *32*(1), 44-50.
- Viaene J., & Januszewska R. (1927). 'A law of comparative judgment', *Psychological Review*, *34*(4), pp.273-286.
- Vitruve M. (1480). *De architectura*, Editions *Jean Baptiste Coignard*, Paris.
- Von Frey, M. (1896). Untersuchungen über die Sinnesfunktionen der menschlichen Haut. *Abh Sachs Ges (Akad) Wiss*, *40*, 175-266.
- Vrana, S. R. (1993). The psychophysiology of disgust: Differentiating negative emotional contexts with facial EMG. *Psychophysiology*, *30*(3), 279-286.
- Vugo B. (1945). Les sens et leur utilité, *Cerveau & Conscience* 2 (mai/juin 2015), *Lafont Presse*.
- Wacker, J., Heldmann, M., & Stemmler, G. (2003). Separating emotion and motivational direction in fear and anger: Effects on frontal asymmetry. *Emotion*, *3*(2), 167.

- Walter, A. (2011). *Design émotionnel*. Editions Eyrolles. ISBN-13: 978-2212133981.
- Westbrook, R. A., & Oliver, R. L. (1991). The dimensionality of consumption emotion patterns and consumer satisfaction. *Journal of consumer research*, 18(1), 84-91.
- Westbrook, R. A., & Reilly, M. D. (1983). Value-percept disparity: an alternative to the disconfirmation of expectations theory of consumer satisfaction. *Advances in Consumer Research*, 10, 256-261.
- Wilkie, W. L., & Pessemier, E. A. (1973). Issues in marketing's use of multi-attribute attitude models. *Journal of Marketing research*, 10(4), 428-441.
- Winecoff, A., Clithero, J. A., Carter, R. M., Bergman, S. R., Wang, L., & Huettel, S. A. (2013). Ventromedial prefrontal cortex encodes emotional value. *Journal of Neuroscience*, 33(27), 11032-11039.
- Witvliet, C. C. V. (1998). The impact of music-prompted emotional valence and arousal on self-report, autonomic, facial EMG, and startle responses across experimental contexts. *Dissertation Abstracts International: Section B: The Sciences and Engineering*, 58(12-B), 6832.
- Yoon, E., Kim, J., & Lee, J. (2016). The US Consumers' Acceptability and Emotion Measures when Consuming Novel Korean Traditional Non-Alcoholic Beverages. *Journal of Sensory Studies*, 31(3), 256-271.
- Yoon, J., Pohlmeier, A. E., & Desmet, P. M. A. (2015). *Positive Emotional Granularity Cards*. Delft University of Technology, ISBN 978-94-6186-440-6.
- Zadeh, L. A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information sciences*, 8(3), 199-249.
- Zaidel, D. W. (2015). Neuroesthetics is not just about art. *Frontiers in human neuroscience*, 9, 80.
- Zeki, S. (2002). Inner vision: An exploration of art and the brain. *Journal of Aesthetics and Art Criticism*, 60(4):365-366
- Zeki, S. M. (1970). Interhemispheric connections of prestriate cortex in monkey. *Brain research*, 19(1), 63-75.
- Zeki, S., & Shipp, S. (1988). The functional logic of cortical connections. *Nature*, 335(6188), 311-317.
- Zhao, X., Dellandrea, E., Chen, L., & Kakadiaris, I. A. (2011). Accurate landmarking of three-dimensional facial data in the presence of facial expressions and occlusions using a three-dimensional statistical facial feature model. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 41(5), 1417-1428.
- Zhou, B. (2006). *Analyse des évaluations sensorielles des produits industriels par des techniques de calculs avancées en vue de la caractérisation des comportements de consommateurs* [Doctoral dissertation, Université Lille1]. <http://ori.univ-lille1.fr/notice/view/univ-lille1-ori-180925>
- Zigmond, A. S., & Snaith, R. P. (1983). *The hospital anxiety and depression scale*. *Acta psychiatrica scandinavica*, 67(6), 361-370.
- Zimmerman, A., Bai, L., & Ginty, D. D. (2014). The gentle touch receptors of mammalian skin. *Science*, 346(6212), 950-954.
- Zuo, H., Hope, T., Castle, P., & Jones, M. (2001). An investigation into the sensory properties of materials. *Psychology*.
- Zurawicki, L. (2010). *Neuromarketing: Exploring the brain of the consumer*. Springer Science & Business Media.

École Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne

Ecole Centrale de Lyon

N° d'ordre NNT : 2020LYSEE005

Cyril BERTHEAUX

THE ROLE OF EMOTION IN A SENSORY DESIGN PROCESS

Speciality : Mechanical and Engineering

Keywords : emotion, perception, sensory conception, sensory design, emotional design, pupillometry, preference model, arousal, valence

Abstract :

The aim of this work was to study the role of emotion in a sensory design process. A first experiment made it possible to set up an emotional measurement of touch during the tactile exploration of surfaces. A second experiment made it possible to set up an emotional measurement during the viewing of IAPS images. The results of these two experiments are based on two emotional indicators, i) the emotional value collected during declarative tests and ii) the coefficient of pupil dilation ([Bertheaux et al., 2020a](#)).

The decision-making process in an act of purchase is based on the estimation of utility and hedonic values. Another contribution presented in this document is a new approach to the preference model that considers data from "Sensations" and "Emotions" axes. In addition, an aggregation operator makes it possible to assign an acceptability score to the different configurations of the product studied. This multidimensional model allows to represent the emotional feelings of the panel relating to the products ([Bertheaux et al., 2018, 2019](#)).

Another case study allowed to predict emotional reactions when examining images of chairs in an online shopping context. In this case the multidimensional preference model is used to estimate a valence based on the evaluation of six appearance descriptors. A nonlinear regression via a neuronal model showed that the « estimated » valence obtained by the multidimensional preference model was correlated with the valence expressed by panel ([Bertheaux et al., 2020b](#)).

École Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne

Ecole Centrale de Lyon

N° d'ordre NNT : 2020LYSEE005

Cyril BERTHEAUX

LE ROLE DE L'EMOTION
DANS UN PROCESSUS DE CONCEPTION SENSORIELLE

Spécialité : Mécanique et Ingénierie

Mots clés : émotion, perception, conception sensorielle, design sensoriel, design émotionnel, pupillométrie, modèle préférence, arousal, valence

Résumé :

L'objet de cette thèse était d'étudier le rôle de l'émotion dans un processus de conception sensorielle. Une première expérimentation a permis de mettre en place une mesure émotionnelle du toucher lors de l'exploration tactile de surfaces. Une seconde expérimentation a permis de mettre en place une mesure émotionnelle visuelle lors de la visualisation d'images IAPS. Ces mesures ont permis d'objectiver la mesure émotionnelle des matériaux et des images en se basant sur deux indicateurs émotionnels, i) la valeur émotionnelle collectée lors de tests déclaratifs et ii) le coefficient de dilatation de la pupille (Bertheaux *et al.*, 2020a).

Le processus décisionnaire lors d'un acte d'achat repose sur l'estimation de valeurs utilitaires et hédoniques. Une autre contribution présentée dans ce document réside dans une nouvelle approche du modèle de préférence qui considère les données provenant de l'axe « Sensations » et de l'axe « Emotions ». Par ailleurs, un opérateur d'agrégation permet d'attribuer un score d'acceptabilité aux différentes configurations du produit étudié. Ce modèle multidimensionnel de préférence permet de représenter le ressenti émotionnel du panel relatif aux produits (Bertheaux *et al.*, 2018, 2019).

Une autre approche a permis de prédire les réactions émotionnelles lors de l'examen d'images de chaises dans un contexte d'achat en ligne. Dans ce cas le modèle multidimensionnel de préférence est utilisé pour estimer une valence basée sur l'évaluation de six descripteurs d'apparence. Une régression non linéaire via un modèle neuronal a montré que la valence « estimée » obtenue par le modèle multidimensionnel de préférence était corrélée à la valence exprimée par le panel (Bertheaux *et al.*, 2020b).