



HAL
open science

Une approche cartographique des propriétés d'aspect des matériaux

Olivier Eterradosi

► **To cite this version:**

Olivier Eterradosi. Une approche cartographique des propriétés d'aspect des matériaux. Matériaux. Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2011. tel-01073852

HAL Id: tel-01073852

<https://theses.hal.science/tel-01073852>

Submitted on 10 Oct 2014

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.



Mémoire présenté en vue de l'obtention de

l'Habilitation à Diriger les Recherches de l'Université Jean Monnet

ED 488 « Sciences, Ingénierie, Santé »
Spécialité : *Sciences et Génie des Matériaux*

par

Olivier ETERRADOSSI

Docteur de l'Université Joseph Fourier (Grenoble I)

Maître-Assistant des Ecoles des Mines, Ecole des Mines d'Alès

Une approche cartographique des propriétés d'aspect des matériaux

HDR soutenue le 16 décembre 2011 à Alès, devant le jury composé de :

Arnaud AUBERT	DESCO - Université de Tours	Rapporteurs
Roland FORTUNIER	ENISE	
Jacques LAFAIT	Institut des Nanosciences - Paris	
David DELAFOSSE	SMS – Laboratoire Claude Goux, EMSE	Examineurs
François JACQUENET	Laboratoire Hubert Curien - UJM	
José-Marie LOPEZ-CUESTA	CMGD – EMA	
Bernard MONASSE	CEMEF – Mines ParisTech	
Jean-Charles PINOLI	Centre Ingénierie et Santé, EMSE	Invité
Ali BENHASSAINE		

C'est une pie, ça ?
On dirait plutôt une vache blindée avec des ailes.

Sergiu Celibidache, chef d'orchestre, lors d'une répétition de l'ouverture de la "Pie Voleuse"

Remerciements

Déjà près de 30 ans que tout cela a commencé ! Les temps changent, l'enseignement, la recherche et la vie des laboratoires aussi . . .

Merci à Jean-Pierre Rolley de m'avoir trouvé un soir de remise d'épée d'académicien et de m'avoir fait aimer le travail à la mine alors que la pétrologie de montagne me paraissait la chose la plus attirante du monde ;

Merci à Ali Benhassaine, sorti de sa retraite tout exprès pour le dénouement de cette HDR, pour la confiance qu'il m'a accordée dès son arrivée à l'EMA et ne m'a jamais retirée contre vents et marées ;

Merci à Jacques Lafait, Françoise Viénot (Françoise, saurez-vous jamais combien je regrette n'avoir pas terminé avant votre départ ?), José-Marie Lopez-Cuesta et Anne Bergeret pour leur patience quand l'élaboration des versions successives de ce mémoire ressemblait aux travaux de couture de Pénélope ;

Merci à ceux qui ont accepté avec gentillesse et disponibilité (parfois *in articulo mortis*) de juger ce travail ;

Merci au chat Pito et à Lac Bleu fils de Minds Music et Eau Claire de Lune, qui tout animaux qu'ils soient, font au quotidien preuve de plus de perspicacité, d'empathie et de mansuétude que bien des humains ;

Merci enfin à mes toutes proches, mes trois amours, qui ont reçu de plein fouet tout ce que la "science de nuit" génère de mauvaise humeur, d'absences, d'hésitations . . . et qui m'ont aussi soutenu dans les années 2000 à 2004 où, sans elles, mon voilier aurait eu bien du mal à ne pas sombrer dans la tourmente.

Résumé

Dans le domaine de l'ingénierie d'aspect des matériaux, il est souvent difficile d'établir des relations entre données instrumentales sur lesquelles se basent le développement, la fabrication et le contrôle, et mesures sensorielles qui caractérisent le ressenti, la satisfaction ou l'acceptation. La notion même de qualité se situe à l'interface des deux logiques. Ce travail explore la possibilité de représenter la similitude d'aspect entre matériaux (références et échantillons, matériaux réels et simulés) de diverses manières : similitude graphique, similitude de description (sémantique), groupement par catégories dans le cadre d'une consigne, relations entre caractéristiques instrumentales. Cette exploration s'appuie sur quatre hypothèses : (1) il existe des outils issus de l'ingénierie des connaissances et de la fouille de données qui peuvent être transférés au domaine de l'ingénierie des matériaux, (2) en matière d'aspect perçu, ce ne sont pas les données qui caractérisent un matériau mais les relations entre données, (3) ce ne sont pas les données instrumentales qui sont corrélables aux données sensorielles, mais les distances séparant les échantillons dans un espace instrumental déformé pour refléter l'espace fonctionnel et (4) cet espace multidimensionnel (que nous appelons "Carte physique") peut être approximé avec une précision suffisante par un espace à 2 dimensions que nous appellerons "Carte d'Aspect" après calibration au moyen de standards sensoriels. Ces hypothèses sont examinées à la lumière de l'expérience acquise en matière visuelle et plus récemment tactile.

Abstract

In the field of Appearance Engineering of materials, it is difficult to correlate instrumental data (on which to base the development, manufacture and control of products) and sensory evaluations (feelings, satisfaction or acceptance). The very notion of quality stays just in the middle. My research topic deals with the possibility of visualizing the similarity between materials (standards versus batches, real or simulated materials) in various ways : graphical similarity, semantic similarity, clustering strategies in a functional space according to instructions, instrumental characteristics. These investigations are based on four assumptions which are : (1) tools from knowledge engineering and data mining are available that can be transferred to the field of materials engineering, (2) dealing with Appearance Engineering, it is not the data that characterize a material, but the relationship between data, (3) this is not the instrumental data which correlate with sensory data, but the distances between samples in a space built from instrumental data and undergoing topological transforms mirroring the functional space and (4) this multidimensional space ("Physical Map") can be approximated with sufficient accuracy by a 2-dimensional space, to be called "Appearance Map" after it has been calibrated using sensory standards

These assumptions are discussed in light of experience gained in both the visual and tactile fields.

Table des matières

Table des matières	v
Liste des tableaux	vii
Table des figures	vii
I Aspect, Matériaux et Ingénierie	5
1 Pourquoi une Ingénierie d'Aspect ?	7
1.1 D'où est-ce que je parle ?	8
1.2 Les grandes fonctions d'une ingénierie de l'aspect	9
1.3 L'aspect et la normalisation	11
2 De quoi <i>aspect</i> est-il le nom ?	17
2.1 Aspect ou Apparence ?	18
2.2 Matière, Matériau	19
2.3 Sensations, perceptions, cognition, émotions	21
2.4 Prototypes, archétypes, stereotypes	23
2.5 Aspect et approche philosophique	24
2.6 Aspect et approche cognitive	26
2.7 Aspect et approche sensorielle	32
2.8 Aspect et approche psychophysique	33
2.9 Aspect et approche physique	34
2.10 Conclusion	35
3 Les matériaux, générateurs de stimuli	37
3.1 Apparence visuelle et structures moléculaires	38
3.2 Apparence visuelle et nanostructures	41
3.3 Apparence visuelle et microstructure	43
3.4 Apparence visuelle et macrostructure	49
3.5 Physique et psychophysique : L'exemple de la transparence	53
3.6 Conclusion	59
4 L'exemple colorimétrique	61
4.1 La notion de Couleur au sens de la CIE	62
4.2 La notion d'Apparence Visuelle au sens de la CIE	63
4.3 Les tendances actuelles de l'instrumentation	64
4.4 Les représentations associées	65
4.5 Catégories, prototypes et couleur : la WCS	67

4.6	Conclusion	71
5	Les fonctions en synthèse d'image	73
5.1	Fondements	74
5.2	la famille des fonctions à " $\lambda + 4$ dimensions"	75
5.3	la famille des fonctions à " $\lambda + 6$ dimensions"	78
5.4	Gestion du volume des données	78
5.5	Conclusion	79
II	Cartographeur l'Aspect	81
6	Représentations visuelles et chiffrées	85
6.1	Hypothèses de travail	86
6.2	Instrumentation et données représentées	87
6.3	Le Dôme	88
6.4	Le Blason	89
6.5	La Boussole	92
6.6	Exemple d'utilisation des blasons simples	96
6.7	Conclusion	97
7	Cartographie	99
7.1	Qu'est-ce qu'une carte?	100
7.2	Exemples d'utilisation de la métaphore cartographique	108
7.3	Distances	115
7.4	Des distances aux cartes	126
7.5	Conclusion	130
8	Calibration, superposition et exemples	133
8.1	Calibration	134
8.2	Aspect prospectif : superposition de cartes	134
8.3	Exemples de cartes physiques et de cartes d'aspect	137
9	Cartographeur l'aspect tactile?	149
9.1	Éléments favorables	150
9.2	Démarche UPPA-EMA	161
9.3	Trois exemples	163
9.4	Conclusion	167
10	Conclusion	171
	Bibliographie	175
	Annexes	196
A	Extraits du dossier d'habilitation : CV, liste de travaux et de publications	197
B	Expressions de dissimilarité	225

Liste des tableaux

1.1	Les 16 secteurs les plus impactés par la normalisation en matière de couleur (2011)	14
1.2	Les 16 secteurs les plus impactés par la normalisation en matière tactile (2011)	14
1.3	Les 12 secteurs les plus impactés par la normalisation en référence à l'aspect (2011)	15
1.4	Les 13 secteurs les plus impactés par la normalisation en matière visuelle (2011)	15
3.1	Molybdène : degrés d'oxydation, configurations électroniques (entre parenthèses, configurations types) et couleurs	41
3.2	Opales inverses : périodicités prévues et mesurées expérimentalement (voir texte)	48
7.1	Probabilités de discrimination de paires de signaux Morse d'après Rothkopf [259] cité par Dzhafarov et al. [88]	120
8.1	Extrait de la table des coefficients d'échange thermique mesurés ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$). Table complète en Annexe C	138
8.2	Evaluation émotionnelle par 5 jurés masculins [COL16]	145
9.1	Caractéristiques fonctionnelles des afférents à adaptation rapide	151
9.2	Caractéristiques fonctionnelles des afférents à adaptation lente. La présence de terminaisons de Ruffini à l'extrémité du doigt n'est pas certaine [228]	152

Table des figures

1.1	Les 3 secteurs de la thématique "ingénierie d'aspect" du CMGD [ENS13]	11
-----	---	----

1.2	Volume de normes publiées ou en cours d'édition (2011) par l'ASTM, l'ISO et l'AFNOR dont les titres comportent les termes {ASPECT, COULEUR, VISUEL, TACTILE} ou {APPEARANCE, COLOR, VISUAL, TACTILE}. Voir commentaire dans le texte.	16
2.1	Un modèle d'interaction avec l'environnement	20
2.2	La chaux, un matériau de grande diffusion (voir texte)	22
2.3	SAM (<i>self-assessment manikins</i>) : les trois dimensions traditionnelles de l'évaluation d'une émotion	24
2.4	La transformation log-polaire inspirée des travaux de Schwartz sur le cortex visuel des primates [27]	28
2.5	Attributs d'un espace conceptuel au sens de Gärdenfors [<i>JTP7</i>] d'après [118]	31
2.6	Un espace conceptuel au sens de Gallina, celui des théories modernes de la conscience [210]	31
2.7	Le passage de la perception à l'analyse sensorielle	33
2.8	De gauche à droite, les lois classiques de Weber (le seuil de discrimination de 2 stimuli s'accroît linéairement avec l'intensité des stimuli), de Fechner (le stimulus est redimensionné en une représentation interne logarithmique) et Stevens (le stimulus est redimensionné en une fonction puissance)	34
3.1	Le formalisme de la théorie du champ cristallin [197, 198]. En haut, décomposition des niveaux énergétiques correspondant aux orbitales d d'un ion de métal de transition (à gauche) par un environnement octaédrique (au centre) ou tétraédrique (à droite). En bas : relations entre paramètres Dq et Δ . Pour leur signification voir texte.	40
3.2	Adsorption d'ions molybdates à différentes concentrations sur billes de chitosane : spectres de réflectance normalisée après correction de Saunderson [<i>PL4</i>]	40
3.3	Paramètres réglant le phénomène d'interférence	42
3.4	"Chemin chromatique" : coordonnées chromatique (a^* , b^*) pour une succession organisée d'angles d'incidence et de détection. Pigment Merck, [58]	43
3.5	Modélisation de la structure d'un pigment interférentiel expérimental [<i>PDC4</i>] : chemin chromatique, réflectance et transmittance prédites pour un angle d'incidence, coupe transversale dans une particule isolée	44
3.6	Microstructures naturelles et artificielles, dans le sens de la lecture : carapace du coléoptère blanc <i>Cyphochilus</i> [124], peinture automobile, papier et pâte à pain. Les barres d'échelles représentent respectivement 1, 20, 100 et 50 μm	45
3.7	Orientation locale des normales à une surface [188]	47
3.8	Structures auto-organisées, polystyrène sur mica [<i>PL11</i>]. De gauche à droite : ordre local, structuration en domaines, chemin chromatique mesuré en transmission (voir tableau 3.2)	48
3.9	Une partie de l'interface utilisateur de PCGrate : spécification de la géométrie d'illumination [262]	48
3.10	Deux illustrations de la diffusion de la lumière par les "tissus mous" humains : Georges de la Tour (1642) et [30]	49

3.11	Modélisation et validation d'un modèle multicouches de l'ensemble derme-épiderme. Adapté de [194] (voir texte)	50
3.12	Carte d'identité chromatique : intégration d'une image dans une autre en fonction de la signature chromatique de leurs textures (voir texte)	52
3.13	Exploitation sélective dans un gisement de pigments naturels vu comme une formule pigmentaire à 14 constituants (voir texte) . . .	54
3.14	Diffusion dans une céramique alumineuse ([173])	55
3.15	Indices de transparence déduits de l'observation d'un arrière-plan [183]	56
3.16	Indices de translucidité, déduits de l'observation d'un objet sans arrière-plan [105]	56
3.17	Modèle de transparence unifié selon Kitaoka [168]. a, b, c, d : luminances; $\alpha, \alpha_1, \alpha_2$: transmittances; t, t_1, t_2 : intensités réfléchies par la surface situé au premier plan	57
3.18	Trois perceptions différentes du rapport de position de deux surfaces, en fonction de leurs rapports de luminances. Cette configuration est très aisément réalisée expérimentalement au moyen de cartes de contraste normalisées (voir texte)	57
3.19	Trois éprouvettes vues en polarographie (haut) et en lumière naturelle (en bas). Mire rétro-éclairée, distance mire-objet : 40mm) [COL17]	58
3.20	Mesures goniométriques en transmission. A gauche, nomenclature (FWHM : largeur à mi-hauteur). A droite, caractérisation de quelques matériaux de référence (illumination perpendiculaire). Les angles en abscisse sont comptés en mode aspéculaire : 0 indique la direction "principale" de sortie	58
3.21	Principe de la mesure d'une fonction de transfert de modulation .	59
3.22	Trois échantillons de polycarbonate additivés ou non : en haut : transparence perceptuelle α dissociée du <i>glare</i> selon équation 3.7. En bas, à gauche : dispersion angulaire des intensités transmises, à droite : relation entre les deux caractéristiques (axe présenté horizontalement : perceptuelle, verticalement : instrumentale)	59
4.1	Un exemple d'espace colorimétrique : $L^*a^*b^*$ CIE 1976. Les attributs de teinte (H^*), saturation (C^*) et clarté (L^*) se traduisent également dans un système trirectangle à 2 axes de couleurs antagonistes a^* (rouge-vert), b^* (jaune-bleu) et un axe de clarté L^* (blanc-noir). Ce système est conçu pour être euclidien, d'où la possibilité de donner la même signification aux différences calculées entre deux points quelles que soient leurs positions relatives (dans un repère local centré sur l'un d'entre eux – on verra pourquoi au chapitre 7 –).	63
4.2	Géométrie et nomenclature des angles pour une mesure goniospectrométrique [318]	65
4.3	Deux types de graphiques de base en goniospectrométrie	66
4.4	Chemins chromatiques de 2 échantillons vus par 5 instruments [58]	67
4.5	Chemins chromatiques de 2 gammes de mélanges ternaires [57] . .	68
4.6	Caractérisation chromatique minimale (une des représentations adoptées en R&D dans l'industrie)	68

4.7	Chemin chromatique de 4 produits cosmétiques, selon ce travail . . .	69
4.8	La grille Munsell utilisée pour la récolte des données de la <i>World Color Survey</i>	70
4.9	Les catégories déterminées par la WCS dans 9 langues parlées en Indonésie, Papouasie et Amérique du Sud [163]. Entre parenthèse, la similarité calculée par les auteurs entre le tracé des limites de catégories et celles du Berinmo.	70
4.10	Meilleurs exemplaires pour le mot "café" en Huave, Tlapanec et Zapotec (Mexique). En cartouche, grains mûrs récoltés.	71
5.1	Echelles de structuration et fonctions pour le rendu. Les fonctions sur fond grisé ne sont pas décrites dans ce travail	75
5.2	Fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle : nomenclature	76
5.3	BRDF (à gauche) et BSSRDF (à droite)	77
5.4	Rendu d'un buste en marbre, au moyen d'une BRDF (à gauche) et d'une BSSRDF (à droite)[119]	77
5.5	Evolution du "poids" de stockage des données (voir texte)	79
6.1	Vue latérale du goniospectrocolorimètre ColorDIMENSIONS	87
6.2	BRDF et Dôme [COL13]	88
6.3	Deux Dômes	89
6.4	Echelle par défaut pour la représentation des blasons	91
6.5	12 blasons	93
6.6	Blasons accolés : échantillon de droite de la figure 6.3, pour deux orientations ϕ séparées par 60° . Illumination selon la normale à l'échantillon	94
6.7	4 voisinages pour le calcul de l'indice de Stentiford	95
6.8	5 boussoles (voir texte). Incidence de l'éclairage 10°	96
6.9	Evolution de la perlescence d'une formule cosmétique avec les proportions de trois de ses constituants (pour le code couleur voir figure 6.4)	97
7.1	Une "carte de propriétés" d'Ashby [8]	101
7.2	Deux cartes séparées par 5 siècles : l'Europe du Sud-Ouest à la fin du 15 ^e et les séries TV à la fin du 20 ^e	102
7.3	La Grande Armée en Russie, 1812. Carte de Charles-Joseph Minard, 1869 [208]	103
7.4	2 cartes tensorielles des dynamiques climatiques en Afrique subsaharienne entre 1960 et 1990 [182]	103
7.5	Une représentation bivariée utilisant les <i>QTomS</i> [314]	106
7.6	Trajectoires d'êtres vivants (voir texte)	107
7.7	Pour chacun des deux domaines colorés, les vignettes sont-elles situées sur une trajectoire? [COL16]	108
7.8	Différentes techniques de lissage d'un même ensemble de points : régression linéaire (a), composante principale (b), spline (c), courbe principale (d) [128]	109

7.9	Une carte de connaissance basée sur la méthode Domaine-Vue-Contrôles et l'environnement MolAge. <i>With a little help from my friends</i> (label noir) est une chanson des Beatles (ligne de temps, en bas) figurant sur l'album <i>Sgt Pepper's...</i> (lien noir vers la pochette du disque) qui a été réinterprétée par Joe Cocker (lien rouge) [59].	111
7.10	L'interface utilisateur du projet <i>HyperPhysics</i> pour le thème "chaleur et thermodynamique" [217].	112
7.11	Cartographie d'un corpus multilingue (voir texte) [16].	113
7.12	Une des expériences de catégorisation d'Edelman [91]. Voir texte.	114
7.13	Cartographie externe des préférences en France pour 16 variétés de tomates. Projection des moyennes des préférences de chaque variété sur le plan construit à partir des profils sensoriels [39].	116
7.14	Cartographie des préférences d'un panel complet (en haut) et cartographie par sous-groupes de consommateurs (en bas) faisant apparaître plusieurs "niches" [66].	116
7.15	Trois types d'images véhiculant une information sur l'aspect visuel	125
7.16	Utilisation d'un algorithme DSOM pour la détermination automatique d'un taux de graisse à partir de spectres d'absorption dans l'infrarouge [93].	131
8.1	Mise en relation de l'échelle psychophysique $[\alpha, \beta]$ avec l'espace physique \mathcal{E} . Représentation adaptée de [88], qui l'utilise à l'intérieur de l'espace psychophysique seulement.	135
8.2	Représentation multicouche de l'évolution d'une densité de population [296].	135
8.3	Similarité thermique des 17 casques. Les images obtenues par interpolation biharmonique sont positionnées au point calculé par MDS métrique à partir des 23 coefficients mesurés.	139
8.4	Calibration de la carte à l'aide de deux notes attribuées aux casques : appréciation générale et confort thermique.	140
8.5	Similarité entre graphiques : blasons.	141
8.6	Similarité entre graphiques : boussoles.	142
8.7	Echantillons vieillis de polymères d'habitacle automobile : représentation simplifiée des aires d'extension de 420 triplets colorimétriques par échantillon. Les polygones correspondent aux polygones convexes incluant l'ensemble des mesures faites sur un même échantillon. Malgré l'unicité du processus de vieillissement, on peut noter les surfaces, les formes et les allongements très différents des différents polygones.	143
8.8	Carte physique des centres de gravité des aires d'extension au sens de la Figure 8.7. La couleur des flèches indique la catégorie de couleur des échantillons, leur sens indique un âge croissant. Les lignes dépourvues de pointe joignent des échantillons dont on ignore la relation d'âge.	144
8.9	Trois calibrations de l'espace physique du vieillissement. De gauche à droite : par la note de satisfaction pour un ensemble de couleurs, par la note d'acceptabilité pour une couleur, et par l'intensité d'un descripteur sensoriel dans deux situations de test (étiquettes rouges ou noires) avec pour le descripteur une référence à l'échelle d'apprentissage (en vert).	144

8.10	Les 7 mèches teintes retenues pour l'étude	145
8.11	Relation stimulus-réponse émotionnelle moyenne pour les 7 mèches. En abscisse : distance à un des échantillons extrêmes ; en ordonnée : à gauche écart de valence, au centre écart d'activation, à droite écart de dominance	146
8.12	Les étapes d'une transformation procustéenne superposant \widehat{abc} à \widehat{ABC} : (a) configuration de départ, (b) centrage et mise à échelle commune, (c) réflexion, (d) rotation et homothétie [232]	147
8.13	Collection d'échantillons à aspect métallique. Références des balises indiquées en rouge (Programme "Etalons" du groupe Sensomines [PL13])	147
8.14	Espace sémantique (en haut) et fonctionnel (en bas) de l'aspect métallique approché par une collection de 50 échantillons dont 6 balises. La ligne verte relie les échantillons désignés comme proto- types de l'aspect métallique.	148
9.1	Organisation des récepteurs tactiles (à gauche) et visuels (à droite)	151
9.2	Codage par le taux de décharge (en haut) et la phase (en bas) [36]	152
9.3	Réponse moyenne de 15 afférents SA-II à l'application d'une force ayant une composante tangentielle de direction variable (conven- tion : proximal = vers la main ; distal = vers l'extrémité ; ulnar = en direction de l'auriculaire ; radial = en direction du pouce) [25] .	153
9.4	Modélisation de l'évolution des températures de la peau (tempé- rature initiale $34^{\circ}C$, en noir) et d'un métal (cuivre, $R_q = 1$, R_{dq} $= 0.125$, température initiale $24^{\circ}C$, en rouge). Force de contact 2N. Modèle de Ho et Jones [134]	154
9.5	Prédiction des déformations et des réponses sensorielles par un mo- dèle aux éléments finis [64] : à gauche, maillage du doigt humain au repos (en haut) et indenté (en bas) ; à droite : déformation mesurée (points) et prédite (lignes) pour trois niveaux d'indentation (en abs- cisse : distance du point d'indentation, en ordonnée : déplacement vertical) ; en bas à droite : prédiction de la réponse des afférents SA-I à l'indentation par une barre de 3mm de large centrée à l'abs- cisse 0 (trait plein : réponse mesurée, pointillés : réponses prédites par deux modèles différents)	155
9.6	Résolution et intégration des capteurs tactiles microlithographiés pour la période 1982-1997. En abscisse logarithme décimal de la ré- solution (mm), en ordonnée logarithme décimal du nombre d'unités sensitives par capteur, les couleurs légendées indiquent les techno- logies, les étiquettes donnent la sensibilité à la pression (en kPa^{-1}). Figure réalisée d'après les données de [153].	156
9.7	Résolution et intégration des capteurs tactiles triaxiaux, même source [153], même période et même légende que Figure 9.6, excepté pour les étiquettes de sensibilité : en rouge contrainte de cisaillement, en bleu contrainte normale.	157
9.8	Diverses configurations de capteurs tactiles récents (2005 à 2010) [37, 277, 317, 68]. Descriptions dans le texte.	157
9.9	Transduction de la température, d'après [41]. En haut : localisation des récepteurs sur la face intérieure du bras (bleu : sensibles au froid, rouge : sensibles au chaud)	158

9.10	Les fonctions standards proposées par le projet HAPTEX pour la transduction de la vibration [6]	158
9.11	Les dix descripteurs du référentiel Sensotact [®] pour les matériaux d'habitacle automobile [248].	159
9.12	Performances du "doigt thermique" [83], selon [60]. A gauche, évolution de la température à l'interface doigt-matériaux ; A droite, relation mesure instrumentale (ordonnées) - évaluation sensorielle (abscisses)	160
9.13	Profil de tension enregistré par TactCARD sous sollicitation. En bas : profil de pression, en haut : évolution de la tension. A comparer à la Figure 9.3	162
9.14	Relation entre paramètre D (en ordonnée, défini par 9.2) et valeur de dureté SensoTact [®] (en abscisse), pour deux formulations d'hydrogels nanochargés	162
9.15	Relation entre le paramètre S (en ordonnée, défini par 9.3) et valeur de nervosité SensoTact [®] (en abscisse)	163
9.16	Organisation sémantique d'un espace de matériaux ligneux poncés industriellement [TD6]. Commentaire dans le texte.	164
9.17	Interférence visiotactile (à droite) dans l'estimation d'une rugosité (à gauche évaluation en aveugle). [TD6], voir commentaire dans le texte	165
9.18	Caractéristiques granulométriques des 8 fractions utilisées pour recomposer des mélanges contrôlés	165
9.19	Cécité tactile : à gauche à la taille en fonction du ratio s/b ; à droite : au ratio en fonction de la taille	166
9.20	Détermination moyenne (19 jurés) des descripteurs "glissant" et "bloquant" de 17 plaques en ABS recouvertes d'un "vernis soft" (selon méthodologie Sensotact [®]). Tirés : droite Bloquant + Glissant = 100, pointillés : régression [IR39]	168
9.21	Carte physique (espace instrumental) de 9 vernis soft polyuréthanes. Similarité (MDS) dans un espace rugosité-vibration [IR39]	168
9.22	Calibration de la carte physique par la méthode de la trajectoire principale. En abscisse : distance à l'un des points extrêmes, en ordonnée : écart de note sensorielle moyenne par rapport à celle attribuée à ce même point extrême.	169
B.1	Similarités et dissimilarités entre profils définis par des variables binaires	227
B.2	Similarités et dissimilarités entre profils définis par des variables quantitatives	229

Introduction

Rédigé en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches, ce travail a été initié au milieu des années 2000, pour répondre à un besoin d'outils de représentation et de caractérisation de propriétés sensorielles complexes à destination des sciences des matériaux. Il combine des éléments mis en place entre 1992 et 2000 sur les propriétés optiques des matériaux avec une approche graphique venue ensuite, et une tentative d'appliquer le concept à des données tactiles depuis 2004. Les premiers outils conçus ont été présentés en 2006, alors que la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE, qui est entre autres l'organisme prescripteur des méthodes de colorimétrie) venait d'édicter ses premières recommandations dans le domaine (*CIE 175 :2006, Framework for Measurement of Visual Appearance*) et de créer un comité technique dédié (*TC1-72 : MAnet, a Measurement of Appearance Network*) dont j'ai fait partie depuis sa création.

Devant une certaine incompréhension et une certaine incrédulité il m'a paru intéressant d'utiliser ce mémoire pour exposer et justifier la genèse de l'idée de cartographier l'aspect des matériaux, et non pour en détailler techniquement les différents composants. Ceux-ci évoluent d'ailleurs toujours au gré des expérimentations : il s'agit d'un *work in progress* et beaucoup des points abordés devront être confirmés et précisés, comme le rappellera la conclusion.

Construit ainsi, le mémoire sera peut-être frustrant pour le lecteur : beaucoup de figures, peu de chiffres, peu de démonstrations. Le caractère transversal du sujet n'en fait un mémoire ni de statistiques, ni de mathématiques, ni de sciences cognitives, ni même de sciences des matériaux au sens habituel. Ce serait donc ce que certains appellent un travail de "méta-ingénierie" : l'ingénierie de méthodes destinées à l'ingénierie... Mais ceci n'implique pas pour autant que les choix qui ont été faits soient arbitraires ou dénués de fondements : ils sont appuyés sur des justifications théoriques ou des concepts que de nombreuses publications détaillent à l'envie par ailleurs. La bibliographie du mémoire comporte plus de 300 références qui permettront au lecteur de retrouver les justifications de ces choix.

On trouvera en **Annexe A** un Curriculum Vitae ainsi qu'une liste de publications et travaux, extraits du dossier d'habilitation déposé en 2008 et actualisés.

La **première partie** du corps du mémoire est destinée à décrire les éléments qui peuvent être partagés entre le domaine des matériaux et les autres domaines académiques dans l'idée d'utiliser des techniques d'ingénierie des connaissances en ingénierie des matériaux, afin de produire des cartes d'aspect.

Le **chapitre 1** tente de poser le problème. Pourquoi faudrait-il s'adonner à une *Ingénierie d'Aspect*? Quels en seraient les contours? "From petits pois to the Eiffel Tower" titrait malicieusement John Hutchings en ouverture du 1^{er} Symposium de la CIE sur l'Apparence Visuelle (2006), et c'est bien à peu près dans cet espace que se situent les questions traitées par les sciences de l'aspect.

Le **chapitre 2** est consacré aux différentes définitions de l'aspect, selon qu'on appartient au monde de la philosophie, des sciences cognitives ou de la physique. C'est du voisinage entre ces différentes définitions qu'est née la proposition de "cartographier l'aspect". Le contenu de ce chapitre est forcément approximatif et très incomplet, voire maladroit car je ne suis spécialiste d'aucun de ces domaines. J'ai choisi d'y entrouvrir des portes sur des "univers parallèles" plutôt que de faire un travail encyclopédique hors de mes compétences.

Le **chapitre 3** montre comment un matériau est un générateur de stimuli, un transmetteur d'énergie (l'analogie entre antennes et particules est employée en optique des nanoparticules...) et/ou un émetteur de matière (molécules) qui pourra éventuellement être détecté par un ou plusieurs capteurs sensoriels.

Le **chapitre 4** revient sur quelques paradigmes colorimétriques qui alimentent en idées notre approche cartographique : sous le langage propre à cette discipline, tous les ingrédients de la cartographie sont bien là. L'approche du vocabulaire des couleurs dans le domaine des sciences humaines est également riche d'enseignements. Mais depuis ses débuts la colorimétrie et ses instruments ont évolué, et il n'est pas évident que la tâche des "industriels de l'aspect" en ait été simplifiée.

Le **chapitre 5** survole le problème de la représentation des propriétés d'aspect visuel en infographie. Confrontée à la représentation visuelle synthétique d'effets complexes, cette discipline a généré ses propres concepts et outils avec au centre "l'équation du rendu". Ces outils sont puissants et bénéficient d'une attractivité visuelle immédiate, mais sont-ils adaptés au monde de la production des matériaux? La question se pose au moment où des matériels délivrant ce type de données deviennent disponibles sur le marché de l'instrumentation.

La **deuxième partie** est consacrée à la présentation de quelques outils développés au cours des cinq dernières années pour caractériser et comparer un petit nombre d'objets : la cartographie ne présente pas d'intérêt dans ce cas. Il est plus simple de disposer de méthodes numériques ou graphiques.

Le **chapitre 6** propose une étape intermédiaire : la création de graphiques destinés à synthétiser les données multidimensionnelles et leur structure. Comme le montrent en effet de nombreux travaux en diagrammatique et en sciences cognitives, il est possible de raisonner sur des représentations selon les mêmes processus cognitifs que sur des données.

Le **chapitre 7** aborde (enfin...) le problème de la cartographie : qu'est-ce qu'une carte? Qu'est-ce que la métaphore cartographique? Comment dres-

ser des cartes de propriétés de matériaux et dans quels espaces? Les cartes d'aspect développées dans ce travail comportent trois "couches" : sémantique, fonctionnelle et physique qui sont discutées brièvement.

Le **chapitre 8** est consacré à l'étape de calibration sensorielle et de superposition des couches, pour permettre que leurs organisations se répondent ou soient superposables. Ici encore le développement justifierait sans doute tout un mémoire en lui-même... Une prochaine thèse, peut-être? J'ai choisi de donner des exemples obtenus sur différents types de propriétés, tout en fournissant les éléments de bibliographie permettant de vérifier les fondements de la démarche.

Enfin, le **chapitre 9** montre une tentative d'extension au canal sensoriel tactile dans le cadre d'un groupe de recherche commun Ecole des Mines d'Alès - Université de Pau - CNRS, et du groupe *SensoMINES* de l'Institut Carnot M.I.N.E.S. Le chapitre se conclut par une série d'exemples. Les premiers d'entre eux montrent que certains paradigmes mis en œuvre pour le canal visuel valent pour le canal tactile, et le dernier présente un résultat de cartographie calibrée d'un sous-espace de "toucher soft", véritable lieu commun dans le domaine tactile...

La **conclusion** liste les travaux qui restent à accomplir et pose donc les jalons des quelques années à venir.

Enfin, quelques précisions pour faciliter la lecture de ce document :

- les références bibliographiques signalées par un nombre (par exemple "[118]") renvoient à la **bibliographie générale** dont ont été exclues les références à nos propres travaux.
- les références à ceux-ci sont appelées par un code composite (par exemple "[COL13]") qui renvoie à l'**annexe A** (CV, titres et travaux), avec les codes suivants :
 - [PL...] : Articles dans revues internationales avec comité de lecture
 - [COL...] : Colloques internationaux avec comité de lecture
 - [POSTL...] : Posters (colloques avec comité de lecture)
 - [P...] : Articles dans revues sans comité de lecture
 - [C...] : Colloques sans comité de lecture
 - [JTP...] : Journées techniques ou professionnelles
 - [ENS...] : Enseignements sans documents édités
 - [TD...] : Thèses dirigées ou co-dirigées
 - [D...] : Travaux de DEA dirigés
 - [PDC...] : Travaux post-doctoraux dirigés
 - [IR...] : Travaux de recherche d'élèves-ingénieurs, DESS et masters
 - [R...] : Rapports de fin de contrat

Les calculs d'indices ainsi que les figures et graphiques ne mentionnant pas de référence bibliographique sont issus de codes développés à l'occasion de cette recherche dans l'environnement (libre) de calcul statistique **R**.

Première partie

Aspect, Matériaux et Ingénierie

Pourquoi une Ingénierie d'Aspect ?

[...] the overall shape, the color, the front end, the bumpers - and on the inside : the look of the instrument panel, the finish of a seat, the overall feel of the interior. This positive first impression - the moment you "perceive the quality" of a vehicle with all your senses - is one of the main factors triggering the decision to purchase a vehicle.

[http ://www.faurecia.com/pages/products/perceived_quality.asp](http://www.faurecia.com/pages/products/perceived_quality.asp), 2007

Le statut industriel de l'aspect, possédé ou conféré, est particulier. Dans certaines branches, il s'agit de la principale propriété d'usage, celle pour laquelle le produit est conçu et sera vendu. C'est le cas par exemple des industries de la cosmétique, ou de celles du domaine des peintures et vernis. Pour ces secteurs, la conception la plus rapide possible et le développement au moindre coût sont des enjeux majeurs. Dans d'autres, il s'agit d'une variable de différenciation, un champ de lutte commerciale qu'on active lorsque les attentes technologiques fondamentales sont satisfaites par la majorité ou la totalité des fournisseurs ou que le taux d'équipement est très élevé. Ceci traduit donc un haut niveau d'évolution du marché (automobile, électroménager par exemple). Enfin, certains secteurs subissent l'apparence comme une grandeur caractéristique de la qualité, un symptôme plutôt qu'une propriété, qui génère cahiers des charges, directives ou normes.

Il existe donc une véritable "filrière industrielle de l'aspect", qui commence avec les "prévisions auto-réalisatrices" des cabinets de tendance (Nelly Rodi™, par exemple) et s'achève avec l'acte d'achat lors duquel la "qualité perçue" joue un rôle décrit aujourd'hui comme essentiel. Entre temps, de nombreux acteurs, de nombreux processus et de nombreux outils ont été à l'œuvre.

1.1 D'où est-ce que je parle ?

La question "d'où parlez-vous ?" est à la mode pour demander à la personne interrogée de justifier à la fois sa légitimité à évoquer la question dont elle traite et son rattachement idéologique. Qu'en est-il de moi et de cette approche d'ingénierie d'aspect ?

L'axe "Propriétés Psychosensorielles des Matériaux" dont j'ai été à l'origine à l'Ecole des Mines d'Alès est une composante de son Centre des Matériaux de Grande Diffusion. Cette école d'ingénieurs généralistes du groupe des Ecoles des Mines s'est dotée des prémices de ce centre au début des années 80 pour traiter des propriétés physico-chimiques et physico-mécaniques ainsi que des procédés de production de matériaux possédant une structure de coût spécifique. Issus au départ de l'industrie extractive et de ses industries de transformation, les matériaux étudiés possédaient un faible prix de vente compensé par un fort volume vendu : granulats, minerais, minéraux industriels, concentrés, poudres, agrégats. Nos élèves ingénieurs sont donc habitués à des matériaux offrant des propriétés d'usage non sensorielles : résistance mécanique, barrières physico-chimiques. . . C'est par le biais des propriétés optiques de certains de ces produits qu'une problématique colorimétrique s'est faite jour : blancheur de kaolins calcinés micronisés ou d'oxydes d'antimoine retardateurs de feu, production de pigments naturels (ocres, oxydes pour céramiques). . . Puis un glissement s'est opéré vers l'aval des filières : béton au lieu de granulats, cosmétique et peinture au lieu de pigments. . . La toute fin des années 90 a vu l'émergence des problématiques de toucher.

Comment aborder ces questions et conduire une recherche qui respecte la spécificité de notre école d'ingénieurs et de notre centre des matériaux ? La première question à résoudre est celle de l'étendue du domaine à couvrir, et comme souvent il est plus facile de procéder par soustraction. . . En matière de sensations, il a été décidé au départ de ne pas traiter de celles dont les stimuli sont chimiques, ce qui élimine les aspects olfactifs et gustatifs largement traités par

ailleurs (AgroParisTech Massy, EBI, CESC. . .). Cette tendance s'infléchit toutefois depuis 2 ans avec l'apparition de problématiques sur le confort intérieur dans lesquelles l'aspect olfactif joue un rôle non négligeable. Le design ne faisant pas partie des thématiques de l'EMA cet aspect n'est pas traité non plus, pas même sous l'angle du "design sensoriel" lui aussi abordé par des équipes spécialisées (ENSAM, TU Delft. . .). Nous n'avons pas d'activité concernant les tendances, les préférences, les fonctionnalités, la forme et la sémiotique des objets, car on considère généralement qu'un matériau n'est pas un objet puisqu'il n'a pas encore de fonction (on devrait ajouter "marchande", car pour nous une éprouvette de traction est bien un objet qui possède des caractéristiques sensorielles : il suffit d'étirer un polymère transparent pour s'en rendre compte). Nous n'avons pas non plus d'activité scientifique ou technique en matière d'analyse sensorielle au sens strict, car celle-ci présuppose l'existence d'objets pouvant être soumis à analyse (ce n'est pas toujours le cas lorsqu'on mène une recherche sur des matériaux) et le maintien d'un panel opérationnel. De plus elle est plus adaptée à des problèmes de comparaison, de classement ou de préférence que d'ingénierie de la matière. Comme on le verra, nous utilisons les résultats de l'analyse sensorielle dans des phases de calibration.

Nous avons décidé d'aborder les matériaux comme des *générateurs de stimuli*, et de caractériser leur signature sensorielle au moyen d'outils (instruments et méthodes) permettant aux ingénieurs d'utiliser les métaphores auxquelles ils sont habitués. Ce positionnement permet de rester fidèle à la logique du CMGD tant en recherche qu'en enseignement : nous cherchons à modéliser les signaux émis par un assemblage de particules de matière soumis à des procédés qui en structurent le volume et la surface, et à optimiser les résultats par rapport à un cahier des charges. En cela nous tentons de rapprocher les propriétés sensorielles des autres propriétés d'usage et à cette occasion on constate bien le besoin d'outils d'ingénierie dédiés.

La possible trivialité de l'énoncé n'est que de façade : optimiser implique de pouvoir démontrer et quantifier une amélioration, modéliser veut dire comparer des résultats numériques à des résultats expérimentaux qui eux-mêmes supposent l'existence d'un instrument de mesure et d'un protocole fiable. . .

1.2 Les grandes fonctions d'une ingénierie de l'aspect

La consultation des sites Internet d'écoles d'ingénieurs et de sociétés d'ingénierie des matériaux permet de se rendre compte que deux définitions de l'ingénierie des matériaux cohabitent. Pour l'une l'accent est mis sur la compréhension des relations entre la composition, la structure, le mode de production et les propriétés d'un matériau, le "reste" n'en étant que la conséquence. La seconde conserve à la relation structure-propriété sa position centrale, mais y ajoute (à égalité) la conception, la modélisation, la caractérisation du matériau ainsi que la maîtrise des procédés nécessaires à son élaboration et plus récemment l'analyse de son cycle de vie. La définition adoptée dans ce travail est évidemment la seconde : "Spécifier", "Concevoir", "Fabriquer", "Contrôler" et "Prédire" pourraient être les grandes têtes de chapitre d'un cours d'ingénierie. . . Appliquée aux propriétés d'aspect, cette liste est pleine de sous-entendus :

- qui dit *conception* dit *cahier des charges fonctionnel* (c'est à dire suppose une capacité à définir un besoin en termes de fonctions de service et de contraintes, assorties de critères, de niveaux d'acceptation et de tolérance) ou optimisation (c'est à dire suppose une capacité à quantifier un progrès en direction d'une cible existante)
- qui dit *modélisation* dit à la fois modélisation du comportement physique du matériau responsable de son aspect *et* modélisation de la perception de ce signal
- qui dit *caractérisation* ne tranche pas entre caractérisation du stimulus et caractérisation du ressenti, et suppose l'existence d'instruments et de grandeurs caractéristiques permettant l'une et l'autre
- qui dit *maîtrise des procédés* admet la possibilité de déterminer des bornes d'acceptabilité et de réaliser des cartes de contrôle pour un certain nombre de caractéristiques

Les quatre points sont évidemment interconnectés. Examinons à titre d'exemple comment la colorimétrie traite le cas simple d'une couleur unie, sans émettre de jugement ni détailler aucun des points :

- la colorimétrie classique spécifie une couleur au moyen de 3 grandeurs dites psychophysiques : la teinte, la saturation et la clarté.
- la mesure instrumentale est *radiométrique* : on mesure des intensités qui, si elles sont rapportées à une ou des intensités de référence (celle d'une source énergétique) permettent de déterminer des paramètres qui sont des ratios (réflectance, transmittance, absorbance, . . .).
- les instruments capables de réaliser ces mesures sont des radiomètres, des spectroradiomètres, des spectrocolorimètres et des colorimètres. On peut également calibrer (non sans problèmes) des capteurs matriciels (CCD, CMOS. . .) pour leur faire délivrer des valeurs comparables
- ces ratios sont transformés en grandeurs psychophysiques indépendantes des conditions de l'observation réelle en spécifiant une source de référence (un illuminant) et un modèle de vision. Ces valeurs sont destinées à "communiquer la couleur" entre clients et fournisseurs.
- l'espace obtenu est transformé mathématiquement pour tendre à la meilleure isotropie possible afin de supporter une métrique euclidienne. La discriminabilité des stimuli et l'acceptabilité des différences sont définies dans cet espace par des valeurs de distance euclidienne qui sont soit fixées conventionnellement, soit issues de tris empiriques (dans une logique "bon/mauvais")
- certains des instruments de mesure réalisent des géométries d'éclairage et de détection qui sont associées à des solutions particulières des équations de Maxwell permettant de transformer les ratios en propriétés additives. Des lois de mélange autorisent la "formulation de teinte" que le grand public connaît *via* les "machines à teinter"

Sur ces bases, la colorimétrie est très communément utilisée dans l'industrie comme un outil d'ingénierie de la couleur : on peut mettre en production une formulation de peinture de teinte attendue, comparer le résultat à un standard fourni physiquement ou décrit par un triplet de valeurs et faire des corrections pour mettre une production sous contrôle.

Dès que l'on quitte le domaine de la colorimétrie pour aborder des perceptions plus complexes, on ne dispose plus d'un tel environnement : l'aspect *nacré*, l'aspect *métallique* ou l'aspect *cuir* ne possèdent ni définition normalisée ni espace de représentation conventionnel. En l'absence de telles définitions, que nous manque-t-il pour pouvoir effectuer les mêmes tâches ?

L'hypothèse de départ de cette recherche est qu'il nous manque à la fois un moyen de positionner une cible dans un espace de référence et un moyen de calculer une distance par rapport à la cible. La pratique courante le montre bien : une des méthodes les plus simples en l'absence de système de référence chiffré est de fournir une palette de 3 échantillons (l'optimum et deux bornes d'acceptabilité). Bien que ceci repose sur les hypothèses fortes que l'aspect contrôlé peut être décrit le long d'une seule dimension, qu'il n'y a qu'un chemin pour aller d'une borne à l'autre et qu'il passe par l'optimum, les utilisateurs de cette technique vérifient implicitement que la distance séparant une réalisation de l'optimum est sensoriellement moindre que la distance optimum-bornes.

Pour se doter d'un moyen de lier la notion de distance sensorielle à celle de métrologie instrumentale, nous avons développé un programme de recherche comportant 3 thèmes interconnectés (Figure 1.1) : caractérisation des stimuli (modèles et instruments), transduction stimuli-perceptions, outils de représentation. Pris isolément, les trois thèmes sont bien entendus abordés par d'autres équipes, mais l'originalité est de prendre en compte leur interdépendance.

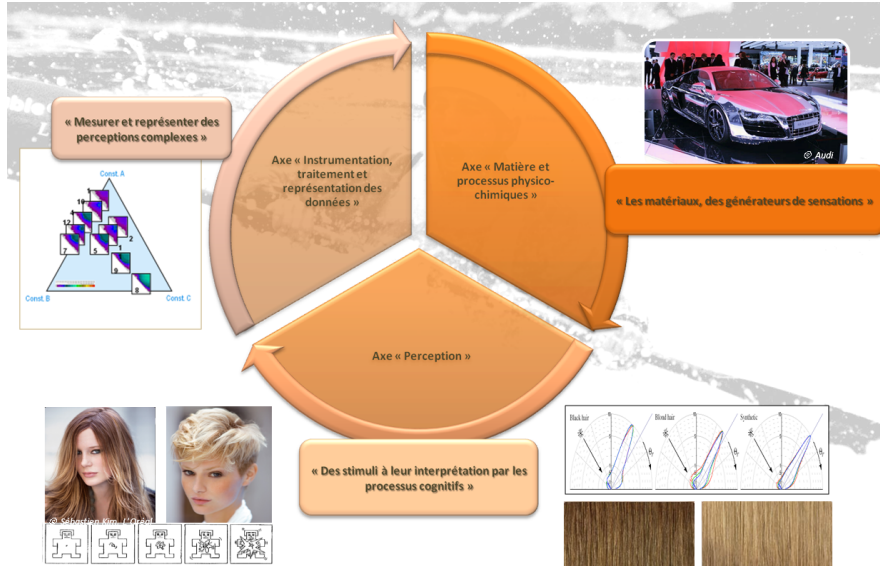


FIGURE 1.1 – Les 3 secteurs de la thématique "ingénierie d'aspect" du CMGD [ENS13]

1.3 L'aspect et la normalisation

Quel est le poids industriel des propriétés d'aspect visuel ou tactile ? Pour répondre à la question, on peut interroger le corpus des normes françaises, européennes et internationales qui y font explicitement référence. En 2011, les bases de données de l'ASTM [9], de l'ISO [142] et de l'AFNOR [5] restreintes aux seules normes éditées ou en cours de préparation, donnent des

résultats édifiants (Figure 1.2) quoiqu'un peu déformés par les problèmes de nomenclature (la base ASTM donne des réponses différentes aux mots-clefs COLOR et COLOUR, la base AFNOR reprend une partie des normes de l'ISO et donne des réponses différentes lorsqu'on l'interroge en français ou en anglais...). Les chiffres reportés dans les graphiques peuvent également prêter à confusion : pour faciliter la lecture directe, les valeurs indiquées dans les différentes surfaces correspondent à l'effectif total obtenu par réunion des mots clefs (par l'opérateur AND) et non à une intersection ensembliste. Pour l'ASTM par exemple, le résultat de la requête COLOR est 4263 et non (4263+835+608+1230). Malgré tout, de grandes tendances sont perceptibles :

1. le volume total de textes normatifs ayant recours aux notions d'aspect visuel et de couleur est considérable
2. le corpus de textes de l'ASTM est très sensiblement plus important que celui des deux autres associations. Ceci se retrouve également dans le volume de textes ayant pour objets les matériaux (ASTM : 29614, ISO : 1647, AFNOR : 9182) et les aspects sensoriels en général (ASTM : 277, ISO : 143, AFNOR : 77).
3. les 3 figures confirment ce que la pratique quotidienne nous a appris : le domaine du toucher est très peu "balisé" industriellement et la notion d'*aspect tactile* peu traduite dans les textes. La totalité des textes européens en la matière a trait à la sécurité des machines et à l'ergonomie (signaux tactiles et haptiques dans les interfaces homme-machine et les véhicules routiers)
4. l'AFNOR se distingue curieusement des deux autres agences par sa manière d'associer les termes : les co-occurrences de {APPEARANCE, VISUAL} et {VISUAL, COLOR} représentent environ 15% des occurrences des termes individuels pour l'ASTM et l'ISO, alors qu'elles n'atteignent respectivement que 3 et 6% pour l'AFNOR, sans que nous ayons pu y trouver une explication

En se limitant à l'AFNOR mais en considérant l'ensemble des sources normatives (et en acceptant à ce niveau d'investigation toutes les redondances : traductions multiples, imputations multiples), la répartition des textes par secteurs d'application est également intéressante (tableaux 1.1, 1.2, 1.3 et 1.4) :

1. 30 à 50% des secteurs d'activités de la nomenclature AFNOR sont concernés par plus de 100 textes que ce soit en matière d'aspect général, de couleur ou plus généralement de propriétés visuelles
2. le secteur de la métrologie et du mesurage fait l'impasse sur la notion d'aspect prise de manière holistique (il n'arrive qu'en 26^e position sur 39 secteurs)
3. inversement le secteur du bâtiment est surtout règlementé par des critères d'aspect général (avec certes un fort impact du matériau bois pour lequel l'aspect est plus définissable que "la couleur", et de la notion de "défaut d'aspect" qui est un critère plutôt statistique que qualitatif)
4. les critères visuels pris de façon générale impactent essentiellement les secteurs liés à l'image et à la communication, qu'ils soient fournisseurs (techniques audio et vidéo, technologies de l'image) ou utilisateurs (TIC, technologies de la santé. . .) alors que les matériaux comme les polymères

sont essentiellement soumis à des critères de couleur. La présence de l'aéronautique en deuxième position s'explique en grande partie par le poids important des marquages de composants destinés à être inspectés visuellement

TABLE 1.1 – Les 16 secteurs les plus impactés par la normalisation en matière de couleur (2011)

rang	Secteur	nombre de textes
1	Industries des peintures et des couleurs	1496
2	Industrie textile et technologie du cuir	508
3	Techniques de fabrication	392
4	Aéronautique et espace	285
5	Généralités. terminologie. normalisation. documentation	242
6	Environnement et protection de la santé. sécurité	220
7	Métrologie et mesurage. phénomènes physiques	192
8	Télécommunications. techniques audio et vidéo	187
9	Électrotechnique	185
10	Industries des élastomères et des plastiques	170
11	Technologie de l'image	169
12	Bâtiment et matériaux de construction	151
13	Technologies de la santé	135
14	Équipement ménager et commercial loisirs. sports	127
15	Génie civil	103
16	Technologies de l'information. machines de bureau	100

TABLE 1.2 – Les 16 secteurs les plus impactés par la normalisation en matière tactile (2011)

rang	Secteur	nombre de textes
1	Techniques de fabrication	25
2	Environnement et protection de la santé. sécurité	25
3	Technologies de la santé	24
4	Métrologie et mesurage. phénomènes physiques	22
5	Technologies de l'information. machines de bureau	17
6	Génie civil	7
7	Emballage et distribution des marchandises	7
8	Bâtiment et matériaux de construction	6
9	Métallurgie	4
10	Électrotechnique	3
11	Technologie alimentaire	2
12	Généralités. terminologie. normalisation. documentation	2
13	Véhicules routiers	1
14	Technologie du bois	1
15	Tertiaire, Qualité, Organisation	1
16	Aéronautique et espace	1

TABLE 1.3 – Les 12 secteurs les plus impactés par la normalisation en référence à l'aspect (2011)

rang	Secteur	nombre de textes
1	Bâtiment et matériaux de construction	292
2	Télécommunications. techniques audio et vidéo	251
3	Environnement et protection de la santé. sécurité	225
4	Technologies de l'information. machines de bureau	159
5	Techniques de fabrication	152
6	Fluidique et composants à usage général	150
7	Électrotechnique	131
8	Industries des élastomères et des plastiques	120
9	Technologie du bois	117
10	Électronique	111
11	Industrie textile et technologie du cuir	107
12	Métallurgie	102

TABLE 1.4 – Les 13 secteurs les plus impactés par la normalisation en matière visuelle (2011)

rang	Secteur	nombre de textes
1	Télécommunications. techniques audio et vidéo	1917
2	Aéronautique et espace	951
3	Technologie de l'image	463
4	Environnement et protection de la santé. sécurité	383
5	Technologies de l'information. machines de bureau	382
6	Électronique	381
7	Technologies de la santé	288
8	Électrotechnique	264
9	Généralités. terminologie. normalisation. documentation	184
10	Métrologie et mesurage. phénomènes physiques	141
11	Techniques de fabrication	138
12	Industrie du pétrole et technologies associées	104
13	Bâtiment et matériaux de construction	100

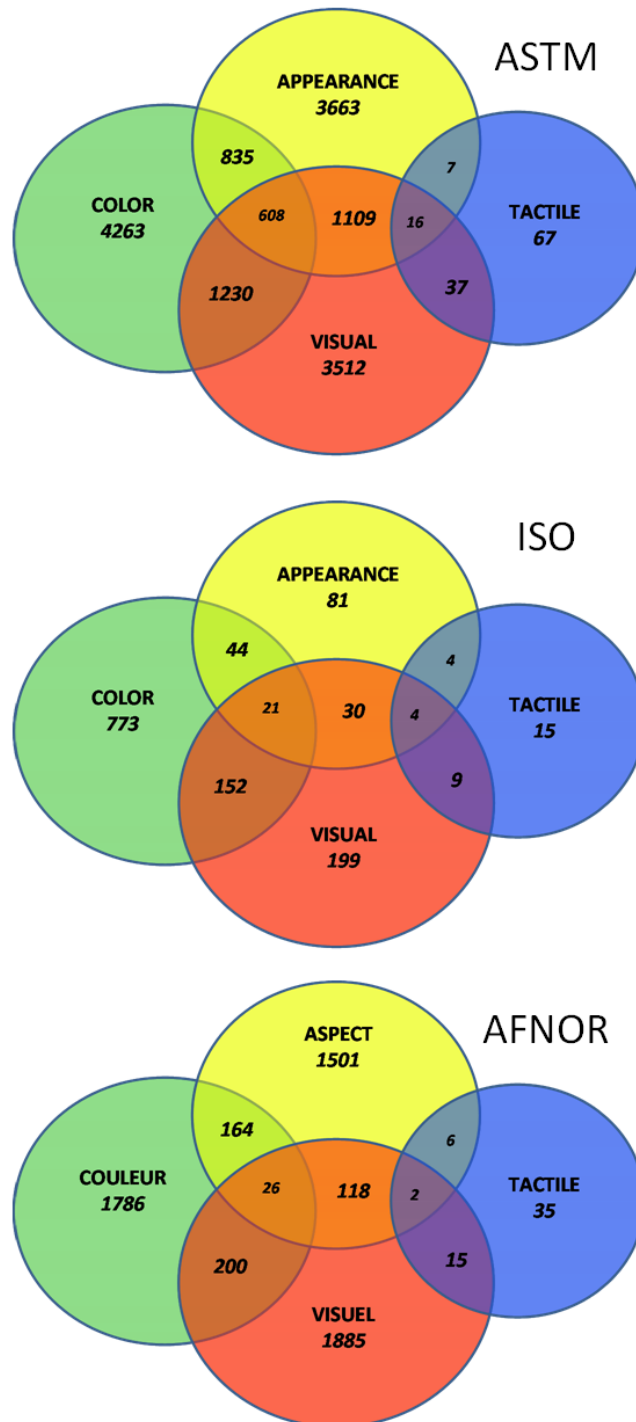


FIGURE 1.2 – Volume de normes publiées ou en cours d'édition (2011) par l'ASTM, l'ISO et l'AFNOR dont les titres comportent les termes {ASPECT, COULEUR, VISUEL, TACTILE} ou {APPEARANCE, COLOR, VISUAL, TACTILE}. Voir commentaire dans le texte.

De quoi *aspect* est-il le nom ?

Je regarde et je crois voir, j'écoute et je crois entendre, je m'étudie et je crois lire dans le fond de mon cœur. Mais ce que je vois et ce que j'entends du monde extérieur, c'est simplement ce que mes sens en extraient pour éclairer ma conduite ; ce que je connais de moi-même, c'est ce qui affleure à la surface, ce qui prend part à l'action. Mes sens et ma conscience ne me livrent donc de la réalité qu'une simplification pratique. Dans la vision qu'ils me donnent des choses et de moi-même, les différences inutiles à l'homme sont effacées, les ressemblances utiles à l'homme sont accentuées, des routes me sont tracées à l'avance où mon action s'engagera. Ces routes sont celles où l'humanité entière a passé avant moi. Les choses ont été classées en vue du parti que j'en pourrai tirer. Et c'est cette classification que j'aperçois, beaucoup plus que la couleur et la forme des choses. . .

Henri Bergson, *Le rire*, 1900

En paraphrasant Alexandre Viallatte, on pourrait affirmer sans rire que "l'Apparence date de la plus haute antiquité". Les philosophes grecs étaient déjà préoccupés par sa définition, mais l'intérêt industriel pour la codification, la mesure et le contrôle de cette notion rassemblant un ensemble de propriétés perceptibles date d'environ un siècle seulement. On a peine à croire qu'un temps aussi court ait pu produire l'analyse sensorielle, l'approche colorimétrique, la modélisation physique, l'approche neurologique, les solutions mathématiques et les solutions technologiques, instrumentales ou numériques nécessaires à conceptualiser puis industrialiser les propriétés visuelles des matériaux et des objets. Ceci traduit sans aucun doute l'intérêt majeur des propriétés d'aspect dans notre manière d'appréhender et de nous approprier le monde qui nous entoure. Du fait de ce foisonnement thématique, chaque domaine académique et chaque secteur industriel possède ses propres concepts et sa manière d'utiliser les termes pour décrire ces propriétés. Il est très probable que ce mémoire emploie à tort un certain nombre de ces termes, il est donc nécessaire de préciser l'usage qui en est fait par la suite.

2.1 Aspect ou Apparence ?

Si l'on s'en tient aux définitions de dictionnaires, l'*apparence* est tout d'abord "l'aspect d'une chose, ce que l'on voit", mais aussi "d'une personne ou d'une chose, considéré comme différent de cette chose (réalité)" [249]. Il est ici immédiatement fait usage du mot *aspect*, utilisé comme synonyme mais dont la même source mentionne qu'il s'agit de la "manière dont quelque chose se présente à la vue *ou à l'esprit*". Les exemples qui accompagnent les définitions montrent bien les nuances dont l'usage charge les deux termes : "c'est un problème simple *en apparence*", "nous n'avions pas envisagé cet *aspect* des choses" ... *Apparence* est connoté comme falacieux, alors qu'*aspect* véhicule plus de réalisme. En anglais courant, le terme *Appearance* vaut aussi bien pour les deux termes français, mais il revêt un caractère plus "extérieur" et superficiel alors qu'*aspect* possède des résonances plus intellectuelles (représentation mentale) ou valorisantes (aspect visuel avantageux). C'est à l'anglais technique, et particulièrement au domaine de la colorimétrie, que nous devons la notion de *Visual Appearance*, qui désigne l'association d'attributs chromatiques (teinte, saturation, clarté) et géométriques (brillant, texture, translucidité, voile, iridescence...)

Pour rappeler cette acception anglo-saxonne, on serait donc tenté de faire usage ici du terme *Ingénierie d'Apparence*. Mais au moins trois raisons nous ferons lui préférer le terme d'*Ingénierie de l'Aspect* :

1. notre volonté de dépasser le domaine visuel en étendant *in fine* notre approche aux données tactiles
2. l'usage des professionnels francophones avec lesquels nous appliquons les résultats de notre travail, qui parlent plus volontiers d'*aspect* cuir ou d'*aspect* métallique.
3. dans le domaine de la colorimétrie, le français *apparence visuelle* et l'anglais *visual appearance* ne sont pas synonymes (sur ce point voir Sève [283]).

Ces définitions posent déjà questions : doit-on limiter la notion d'apparence à la vision ? Doit-on séparer les sens et "l'esprit" ? Est-ce la même chose pour un objet de se présenter à la vue ou à l'esprit ? Qu'est-ce qui "se présente" dans les deux cas ? Bien que perçues comme principalement philosophiques, ces questions réapparaissent sous diverses formes aux différents niveaux où est traitée la notion d'aspect :

1. le niveau philosophique définit les contours du problème (apparence et réalité, à quoi nous sert l'apparence, comment notre vécu modifie l'apparence de ce que nous voyons)
2. le niveau cognitif traite des notions de représentation, et de reconnaissance
3. le niveau psychophysique étudie les performances des systèmes sensoriels en matière de détection et de discrimination
4. le domaine sensoriel mobilise des sujets humains pour caractériser des produits de manière qualitative (hédonisme, descripteurs) ou quantitative (sensibilité, notes)
5. le niveau physique traite de la phénoménologie des effets et de leur mesure instrumentale

Le but du mémoire n'est pas de retracer les théories des niveaux de conscience (sensation, perception, cognition), le lecteur intéressé pouvant se reporter à de nombreux articles de synthèse (par exemple [235, 15, 199, 207]). La Figure 2.1 se contente d'illustrer comment les différents niveaux interagissent pour permettre à un observateur d'appréhender et de traduire l'aspect d'une chose ou d'un matériau. Les étudiants à qui je montre cette figure sont toujours surpris de remarquer que les choses semblent déclencher leur propre exploration. Pourtant comme l'a très bien traduit Italo Calvino c'est avec les choses que tout commence ("c'est de la chose regardée que doit partir la trajectoire qui la relie à la chose qui la regarde" [35]) et notre système perceptif est né des choses parce qu'il y avait quelque chose à sentir ("Le complexe œil-encéphale je le pensais quant à moi comme un tunnel creusé depuis l'extérieur, sous l'action de ce qui était prêt à devenir image, plutôt que depuis l'intérieur ou encore à partir de l'intention de capter une image quelconque" [34])

2.2 Matière, Matériau...

Lorsque nous échangeons avec des collègues d'autres champs académiques, nous constatons qu'il est nécessaire de s'entendre au départ sur ce que chacun entend par *matière* et *matériau*. La question semble triviale mais ne l'est pas, et les définitions qu'on peut lire ici et là sont bien embarrassées. La matière est en général définie comme "ce dont sont faits les objets", une sorte d'équivalent du terme "substance", ce qui ouvre la porte à une mise en abîme infinie selon le type d'objet dont on parle (sur laquelle joue par exemple le titre anglo-saxon de l'ouvrage d'H. Fritzsch *Quarks : the Stuff of Matter*, et sur les implications de laquelle revient Adelson en matière de vision [3]).

Lors de ces discussions, nous tombons en général d'accord pour considérer tout d'abord qu'un matériau n'est plus de la matière, mais pas encore tout à fait un objet : il ne possède pas encore une forme adaptée à une fonction d'usage

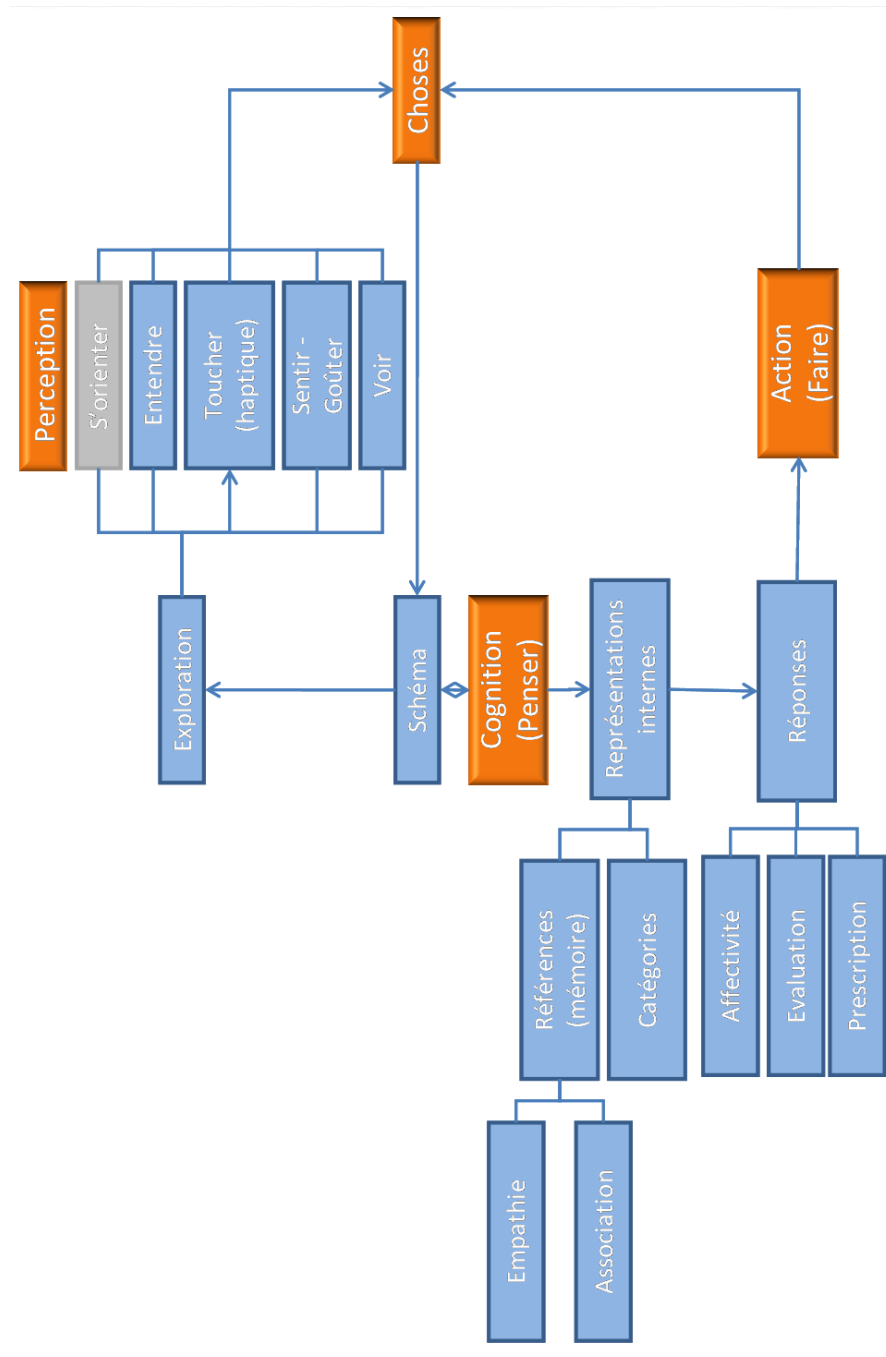


FIGURE 2.1 – Un modèle d'interaction avec l'environnement

courant. Mais cette définition n'en reste pas moins aussi problématique que la précédente : une éprouvette de traction est un objet, et sa forme est adaptée à sa fonction même si celle-ci n'est pas destinée à un usage courant pour tout le monde. Finalement nous nous accordons pour dire qu'un matériau, quel qu'il soit, est "de la matière plus des procédés" : la chaux est un calcaire concassé, torréfié puis broyé et ses propriétés tant mécaniques que visuelles résultent de la conduite de chacun de ces procédés (Figure 2.2). Les schémas descriptifs du cycle de la chaux (Figures 2.2a et 2.2b) commencent tous par l'extraction d'un calcaire, intrant naturel donc *matière première*. Or un calcaire est issu lui-même d'une succession de procédés sédimentologiques, diagénétiques, voire métamorphiques. La seule diagenèse (transformation d'une boue en roche) se décompose en quatre phases qui sont autant de procédés : une halmyrolyse (notée I, Figure 2.2c), phénomène majoritairement bactérien qui détruit les plus petits éléments biogéniques, une syndiagenèse (II) anaérobie qui génère des sulfures exprimés minéralogiquement, une phase de redistribution (III) du matériel par dissolution-reprécipitation sous l'effet des débuts de la compaction et une phase de réarrangements cristallins majeurs (IV) sous l'effet d'une compaction intense. Cela laisse une trace sensible dans le comportement des calcaires lors de leur calcination et leur broyage, donc dans les propriétés de la chaux comme l'a montré Peynaud [D2,TD3]. Ce qui constitue donc la frontière entre matière et matériau, c'est le moment où on ne peut plus expliquer une propriété de la matière sans tenir compte des procédés. Ainsi l'alumine Al_2O_3 (on pourrait presque ajouter "en tant que concept", ou "idéale") est de la matière dont on connaît l'indice de réfraction théorique, mais une alumine industrielle est un matériau dont les variations d'indice de réfraction retracent l'histoire du procédé d'obtention...

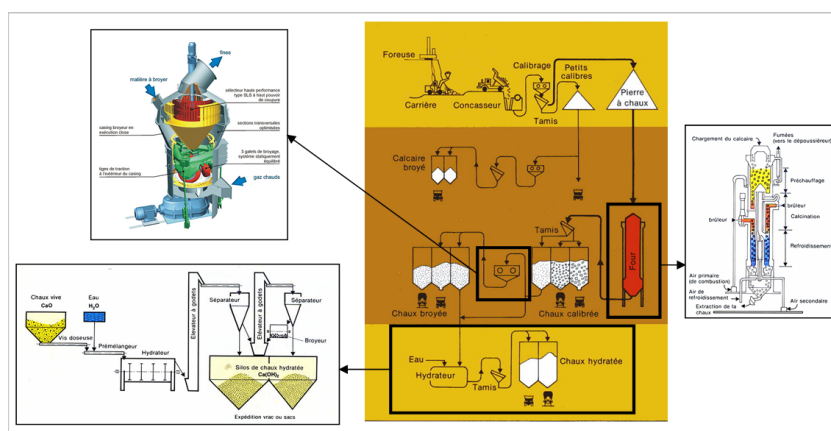
2.3 Sensations, perceptions, cognition, émotions

On emploiera ici le terme de **sensation** pour désigner l'activation de modalités sensorielles par un stimulus atteignant les organes des sens et dont la fonction est d'informer sur ce qui se passe à l'extérieur de l'organisme (extéroception), en négligeant donc les sensations qui informent sur ce qui se passe à l'intérieur de nous-même. Au sens strict, une sensation ne devrait donc être simplement la détection d'une modification de structure de l'influx nerveux en provenance d'afférents sensoriels.

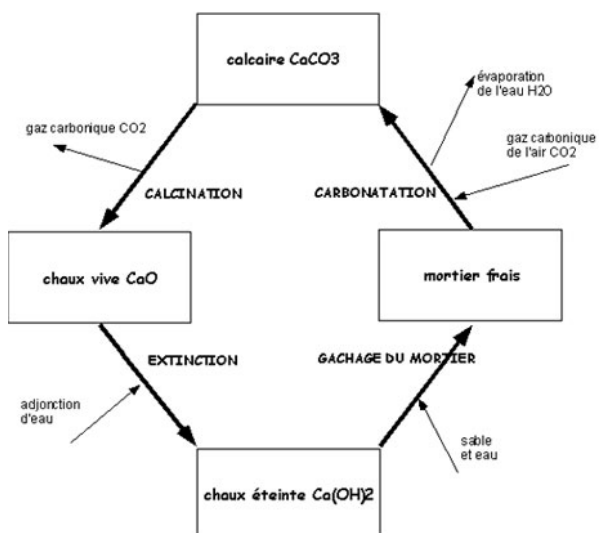
La **perception** sélectionne et structure les données sensorielles, permet d'y trouver un sens et donc de former des représentations. L'étage cognitif permet de mettre les représentations en relation, soit entre elles, soit avec un corpus de représentations organisé antérieurement (expérience, connaissance, croyance, valeurs...). Les nouvelles représentations s'ajoutent au corpus, le transforment, le corrigent et l'enrichissent en permanence.

Dans ce paysage, nous réserverons une place particulière aux **émotions** pour plusieurs raisons qui valent définition [JTP8] :

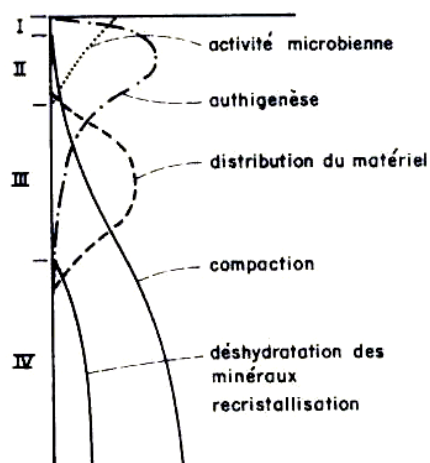
- ce sont des réactions, provoquées par une déviation du niveau de stimulation auquel on est accoutumé, à la perception d'un changement jugé significatif selon nos propres critères (des préférences pour des états particuliers du monde ou de nous-mêmes). Ce sont donc des "jugements incarnés" [244, 243], ce dernier terme étant pris dans son sens éthymo-



(a) Cycle industriel de la production des chaux. En cartouches, gauche à droite et de haut en bas : broyeur, four, hydrateur (d'après documents Balthazard & Cotte et Pfeiffer SE)



(b) Du calcaire au mortier ou à l'enduit : une succession de modifications chimiques



(c) un procédé naturel antérieur : la diagenèse d'une boue en calcaire [11]

logique.

- elles transitent par une zone spécifique de l'encéphale (amygdale, cortex préfrontal) et provoquent très rapidement une réponse corporelle "instinctive" (préconsciente) qui se produit avant que les sensations extéroceptives n'atteignent le neo-cortex que l'amygdale informe également [301]
- elles sont également traitées dans des zones spécifiques du neo-cortex [260]
- il en existe une grande variété (émotions fondamentales, sociales, corporelles, esthétiques...), chaque type étant l'objet d'approches spécifiques
- elles ont en commun des caractéristiques qui empêchent leur quantification par les voies de l'analyse sensorielle traditionnelle : rapidité, brièveté, complexité, instabilité, labilité...
- elles font l'objet d'une métrologie spécifique : auto-évaluation (SAM : *self-assessment manikins*), examen de signaux physiques dépendants (tonalité de la voix, température de la peau, consommation d'oxygène, production d'hormones...), observation comportementale non invasive (éthologique)
- lors de l'auto-évaluation, les dimensions habituellement considérées sont (figure 2.3) la *valence* (caractère positif ou négatif), l'*activation* (intensité) et la *dominance* (position supérieure ou inférieure dans laquelle on se "sent" par rapport à l'émetteur du stimulus). Dans le cas des matériaux, plusieurs études affirment que les dimensions de dominance et d'activation sont confondues (voir par exemple [204, 299])
- de nombreuses approches en design et en ingénierie de produits se définissent comme émotionnelles (emotional design [220, 82, 81, 224], kansei [216, 14], empathic design [245, 186]...) mais la majeure partie des études dites *émotionnelles* dans l'industrie ne traite pas à proprement parler d'émotions (pour une discussion sous forme de synthèse, voir en particulier [74])
- dans le domaine de l'aspect des matériaux, deux types d'émotions méritent une attention particulière : la *surprise* [190, 189, 191] et les *émotions esthétiques*. Plusieurs approches de ces dernières sont possibles, dont nous extrayons en particulier l'approche en 7 dimensions de Roberts [255], particulièrement fertile pour nous comme nous avons pu le montrer en plusieurs occasions [JTP8, C12]
- enfin selon moi la *qualité perçue* est pour les consommateurs une notion émotionnelle et non sensorielle

2.4 Prototypes, archétypes, stereotypes

Bien que les trois termes soient souvent employés comme synonymes dans le langage courant, ils désignent trois concepts différents.

La notion de **prototype** trouve ses fondements dans le domaine de la sémantique et de la linguistique cognitive. On pourrait définir un prototype comme la combinaison de stimuli la plus représentative d'une catégorie. De ce fait, le terme est surtout utilisé pour les espèces naturelles ou pour des objets [257]. Mais on peut également l'utiliser pour des concepts abstraits. Dans notre domaine, c'est par exemple vers l'étude des prototypes que sont

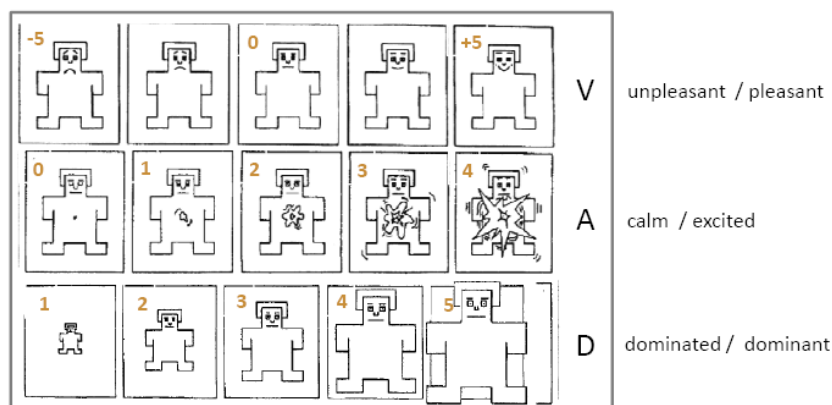


FIGURE 2.3 – SAM (*self-assessment manikins*) : les trois dimensions traditionnelles de l'évaluation d'une émotion

dirigés les travaux de la *World Color Survey* auxquels il sera fait allusion au chapitre XX.

La notion d'**archétype** est héritée de la philosophie platonicienne pour laquelle le terme désigne un état idéal des choses perceptibles. Plus près de nous (voir par exemple [150]) elle se charge d'une valeur symbolique. Dans notre domaine, on pourra ainsi parler de l'archétype d'un métal, d'un granite, d'un cuir, d'une couleur... Nous serons amenés à l'associer plus loin aux notions d'image mentale et d'espaces conceptuel.

Le terme de **stéréotype** vient curieusement du monde de l'imprimerie où il désignait à l'origine l'image reproduite sur métal d'une page entière à imprimer, par opposition à une page composée par la juxtaposition de caractères mobiles. On y trouve toujours aujourd'hui ce sens de représentation simplifiée, mais propagée collectivement et généralisée à un groupe entier de personnes ou d'objets. Les stéréotypes se bâtissant en partie sur des expériences conflictuelles, on voit assez peu le terme dans le domaine de la perception des matériaux. On en trouve toutefois la trace dans des jugements reflétant des expériences malheureuses, du type "le plastique, ça vieillit mal".

2.5 Aspect et approche philosophique

Pour les philosophes, le questionnement sur l'apparence se rattache à la problématique de la conscience. Ce débat n'est pas si éloigné qu'il peut paraître de nos préoccupations sur la caractérisation de l'aspect.

L'histoire de la philosophie regorge de débats sur les distinctions entre sensations, perceptions et représentations. Une revue complète étant hors des objectifs de ce travail je me bornerais à rappeler quelques points de repères car ils entrent en résonance avec des notions considérées comme modernes auxquelles il sera fait appel plus loin dans ce mémoire. Ils montrent au passage comment la réflexion philosophique s'est entrecroisée régulièrement avec les approches physiologiques et optiques...

C'est à travers l'exemple de la vision, sens premier par lequel nous percevons les choses même de fort loin, que le questionnement sur l'opposition entre apparence et réalité a été initié par les philosophes grecs, puis généralisé ra-

pidement aux autres sens. Parmi les premiers, Empédocle [140] construit une théorie des couleurs pour expliquer comment le monde se signale à nous. Il s'interroge donc sur les signaux émis par les choses qui nous entourent et sur leurs causes. Au passage il tire argument de l'aptitude des peintres à reproduire toute couleur visible au moyen du mélange de quelques pigments, et ce faisant il est quasiment "l'inventeur" de la notion de métamérisme. Mais c'est avec Platon [241] que le questionnement sur la fiabilité des sensations prend toute son importance. Pour lui s'opposent un monde des idées, peuplé d'archétypes parfaits et incorruptibles, et un monde sensible constitué de copies imparfaites et labiles des archétypes. La classification qu'il imagine progresse donc vers la "perfection" depuis les images (reflets. . .) jusqu'aux idées (représentations intellectuelles) en passant par les modèles (êtres et choses) et les objets mathématiques (figures et nombres). Même si cela peut sembler très éloigné de nos préoccupations, il n'en est rien, et nous retrouverons la notion d'archétype lorsque nous parlerons de catégorisation et de similarité. Aristote [7] pose clairement les problèmes liés aux 5 sens et à la conscience. Il est un des premiers à établir clairement la différence entre les sensations, les perceptions et l'interprétation des perceptions : ". . . si la perception que nous sommes en face de quelque chose de blanc ne peut être prise en défaut, que le blanc soit telle chose déterminée ou telle autre peut être faux. Enfin vient la perception des attributs universels qui accompagnent les objets auxquels sont attachés les caractères que l'on a ressentis, et c'est là qu'est possible la plus grande quantité d'illusions sensorielles". Au XVI^e siècle on voit apparaître sous l'influence des progrès en physique et médecine des théories physiologiques et mécanistes. Descartes est le premier à bâtir un modèle géométrique et topographique de la transformation des rayons lumineux en motifs au niveau du nerf optique, formulant au passage la "loi de Descartes" décrivant le phénomène de réfraction. Passant du niveau des sensations à celui des représentations, il suppose que l'on peut avoir à l'esprit une "idée" des choses même en l'absence de sensations et qu'il s'agit donc d'une représentation qui persiste dans le cerveau après que la stimulation des organes sensoriels ait cessée [79, 80]. Mais à peine 50 ans plus tard Leibniz argumente contre les théories mécanistes, contestant qu'on puisse jamais construire une machine qui pense, sente et perçoive [181]. Pour lui, la matière est réduite à l'état de phénomène et le monde n'existe pour nous qu'en tant que représentation. Au XVIII^e siècle, les idées sur la notion d'espace mental se précisent, en particulier avec les travaux de Hume [138]. Il pense que tout ce qui se présente à l'esprit consiste en différents genres de perceptions : sensations, impressions, idées, fictions, préjugés. . . , qui ne peuvent être distingués du fait de la forte interaction entre nos représentations mentales et la manière dont nous traitons les stimuli qui nous parviennent. Comme le souligne Isabelle Girard [112], pour Hume "c'est la tendance naturelle à l'association (l'imagination) qui va découvrir des ressemblances entre différentes perceptions". Kant [154] utilise une formulation encore plus compacte : pour lui nous "recevons des représentations" en provenance des objets. La sensation est donc seulement l'effet d'un objet sur notre faculté de représentation. A partir de la fin du XIX^e siècle et pendant la première moitié du XX^e, les découvertes scientifiques vont à nouveau donner du grain à moudre aux réflexions philosophiques en matière de perception et de conscience : on y relève l'influence de la physique quantique, de l'informatique, de la psychanalyse. Un

des premiers acteurs du changement de point de vue est Husserl [139], l'inventeur de la "phénoménologie". Pour lui, une sensation est une expérience de la conscience, et en ce sens nous sommes acteurs de nos perceptions, nous les accomplissons littéralement. Pour donner un exemple de ce que cela implique, on peut se référer à la position philosophique et technique de Sergiu Celibidache, chef d'orchestre disparu il y a quelques années, et penseur de la phénoménologie musicale. En grand provocateur, il professait que la musique ne veut rien dire : c'est seulement du son. Selon lui son travail n'était donc pas de donner un sens à la musique, mais seulement de conduire le son en le rendant le plus perceptible possible jusqu'à chaque auditeur, à qui incombait ensuite la tâche de "donner du sens". Quiconque a entendu le résultat ne peut qu'être sidéré par la puissance d'évocation de ces interprétations basées sur le refus d'interpréter ! On peut immédiatement traduire la leçon en termes de formulation (et même la mettre en parallèle avec "le matériau n'est pas la matière, mais son analyse par le technicien" (G. le Guennec) : une matière première ne devrait être incorporée dans un matériau que si celui-ci permet d'en révéler ou d'en apprécier pleinement les propriétés. . .

Dans la seconde moitié du XX^e siècle, l'informatique et en particulier les avancées en matière de robotique et d'intelligence artificielle ont influencé de manière déterminante la réflexion, qui s'est déplacée de l'approche philosophique de la conscience vers le domaine de la cognitive. Au début des années 90, divers ouvrages [89, 258, 77, 308] exposent simultanément qu'il existe des preuves tant biologiques que psychologiques de la nécessité de lier conscience et cognition.

Pour compléter ce survol, on peut avec Pacherie [225] classer les attitudes philosophiques concernant les perceptions en trois doctrines ayant de nombreuses subdivisions et quelques intersections :

1. une position "réaliste" qui attribue aux choses une apparence objective. Elle distingue des "qualités premières" perceptibles conservées hors de toute perception (la taille, par exemple) et des "qualités secondes" qui n'existent pas indépendamment de leur perception par un sujet (la couleur. . .).
2. une position "réaliste indirecte" qui énonce que l'on ne perçoit pas directement les choses mais des objets mentaux internes.
3. une position "anti-réaliste" pour laquelle il n'y a pas de réalité s'il n'y a pas d'expérience perceptive.

On voit que le débat philosophique est perturbé par le statut complexe de l'apparence des objets : elle est notre seule information sur le monde qui nous entoure, mais nous la décryptons à la lumière de notre expérience passée de ce monde. Seul un nourrisson vierge de tout système de représentation pourrait nous renseigner sur des perceptions non dirigées, et il n'en a pas la capacité. . .

2.6 Aspect et approche cognitive

Par "Sciences Cognitives" on désigne un ensemble de disciplines qui étudient le fonctionnement de l'esprit humain : psychologie cognitive, intelligence artificielle, philosophie de l'esprit, neurosciences cognitives, linguistique. . . Elles sont en cela un prolongement des théories philosophiques de la connaissance.

Parce qu'elles tentent d'expliquer la manière dont l'intellect code, stocke, traite et extrait de l'information pour créer des représentations, elles se situent à l'interface entre sciences humaines et sciences dites "dures". Les sciences cognitives ne se prononcent donc pas sur la notion d'apparence, mais sur sa représentation et son traitement.

Dans le cadre de ma réflexion sur une ingénierie de l'aspect, les points qui ont retenu mon attention sont la théorie computationnelle qui se concentre sur la modélisation des mécanismes neurophysiologiques, la notion d'image mentale qui dépeint l'organisation des représentations, celle d'espace conceptuel qui fournit un cadre formel pour la manipulation des représentations, et enfin l'aspect linguistique.

Théorie computationnelle

Pour les tenants de la théorie computationnelle, dont le précurseur fut Chomsky dans les années 50, les systèmes cognitifs sont totalement caractérisés si l'on identifie une compétence cognitive, un algorithme et un mécanisme physique effectuant l'algorithme [240]. Mais les découvertes de la fin du XX^e siècle en matière de neurosciences, d'architectures neuronales (informatiques) et de traitement du signal ont permis l'élaboration d'une vision de plus en plus complexe de ce modèle, aboutissant à des synthèses comme celle de Chen et al. [43] dans le domaine de la perception et de la représentation visuelle. Un des exemples les plus étonnants est la "cartographie corticale" [267, 27] qui utilise les acquis de l'étude du cortex visuel des primates pour produire une représentation des images transmises au cerveau, donnant ainsi en partie corps à l'inquiétude exprimée par B.F. Skinner (1963) : *"Suppose someone were to coat the occipital lobes of the brain with a special photographic emulsion which, when developed, yielded a reasonable copy of a current visual stimulus. In many quarters this would be regarded as a triumph in the physiology of vision. Yet nothing could be more disastrous, for we should have to start all over again and ask how the organism sees a picture in its occipital cortex"* [274]. Ces résultats très spectaculaires (Figure 2.4) sont d'une grande utilité dans le domaine de la vision artificielle en temps réel, et à plus long terme probablement dans celui de la remédiation des déficits visuels. Ils le sont beaucoup moins dans celui de l'ingénierie de l'apparence qui nous préoccupe : indiscutablement nous percevons l'image 2.4a et non l'image 2.4b, même si c'est cette dernière que traite notre cortex visuel.

Les avancées en matière de neurophysiologie ont également été déterminantes dans la compréhension des divers circuits traitant l'information. C'est la mise en évidence des rôles respectifs du thalamus, de l'amygdale et du néo-cortex cérébral qui a permis de comprendre comment un stimulus externe diffuse littéralement au sein des structures cérébrales. Le chemin rapide (environ 10 millisecondes) court-circuite le néocortex et provoque des réponses automatiques, inconscientes et émotionnelles, alors qu'un chemin deux fois plus lent conduit en parallèle à des réactions conscientes. Des échanges bidirectionnels entre l'amygdale et le néocortex permettent que les deux réponses se régulent. Dans le néocortex, un ensemble de zones et sous-zones (aires) spécialisées mais semble-t-il "plastiques" gèrent pour certaines la détection (aires sensorielles) pour d'autres les tâches d'association (la reconnaissance, la mémoire, le comportement ou la planification)[250]. En ce qui concerne la plasticité ou la distri-

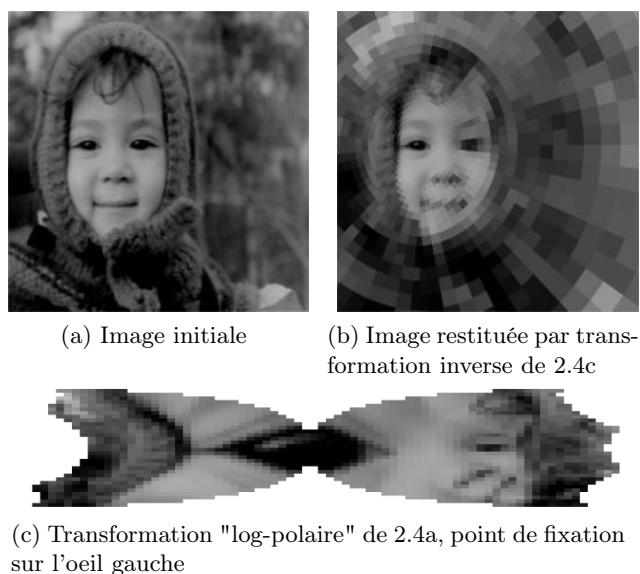


FIGURE 2.4 – La transformation log-polaire inspirée des travaux de Schwartz sur le cortex visuel des primates [27]

bution des fonctions, de nombreux chercheurs notent que l'imagerie cérébrale ne met pas en évidence la nécessité du recours à une aire unique pour réaliser un type d'activité cognitive [101, 212, 238].

Ces travaux tant computationnels que neurophysiologiques ne nous renseignent donc pas sur les opérations *intellectuelles* réalisées sur l'information acquise. Les outils qui nous seront plus utiles pour cela sont les "images mentales" et les "espaces conceptuels" qui modélisent la façon de les organiser.

Les images mentales

Une description détaillée des controverses qui ont agité la recherche en matière de représentations mentales est donnée par Gallina [107]. Selon l'auteur elles auraient fini par aboutir à un consensus autour du rôle des images mentales dans les processus cognitifs. On pourrait considérer que le système cognitif humain comporte deux niveaux de représentation interagissant avec deux niveaux de mémoire. Les deux niveaux seraient un niveau "conceptuel" amodal contenant tout notre savoir, résidant dans notre "mémoire à long terme" et un niveau "représentationnel" modal se trouvant dans notre "mémoire de travail" et pouvant être actualisé à l'occasion de nouvelles expériences cognitives.

Les images mentales, représentations modales d'un concept, en seraient donc des déclinaisons adaptées au contexte et manipulées par l'esprit pour répondre à des besoins ou des questions de complexité variable. On voit bien que malgré leur dénomination d'*image*, elles ne font pas uniquement appel à des éléments visuels : ainsi l'image liée à "chocolat" incorpore-t-elle des éléments olfactifs et gustatifs... voire éventuellement tactiles, ou même topologiques si mon problème est de savoir où j'en ai égaré une tablette. Par ailleurs, le fait qu'il existe diverses *catégories* de chocolat nous amène directement à la notion d'espace conceptuel : un espace immatériel dans lequel s'arrangent les différentes représentations *utiles* du chocolat.

Les espaces conceptuels

Pour l'ingénieur, la notion de concept telle que décrite par Gallina est très intéressante mais pas utilisable. C'est du domaine de l'intelligence artificielle qu'est venu un formalisme immédiatement attractif : celui des "espaces conceptuels" dédiés à la modélisation des représentations. Gärdenfors qui en est l'inventeur avoue avec humour qu'un de ses buts était justement "*d'attirer les ingénieurs [...] qui tentent de développer des systèmes artificiels capables d'accomplir des tâches cognitives et recherchent des idées pour représenter l'information*" [118]. Un autre intérêt de la théorie est sa tentative d'unifier plusieurs disciplines qui sont, d'après l'auteur : "*philosophy, computer science, psychology and linguistics...and there is a tail of neurosciences*". Enfin, elle met en œuvre les notions-clés de dimension, de distance, de domaine et de similarité.

Les attributs d'un espace conceptuel sont résumés par la Figure 2.5, qui met en évidence la volonté de recourir à une représentation géométrique de l'information :

1. Un espace conceptuel est tout d'abord défini par un ensemble de *dimensions* ou *qualités*. Elles peuvent éventuellement avoir une signification clairement sensorielle, mais beaucoup de ces dimensions sont abstraites. Une distinction importante est leur caractère *intégral* ou *séparable* : les dimensions intégrales sont interdépendantes lors de la perception (la saturation et la clarté, par exemple), alors que les dimensions séparables sont perceptibles de manière indépendante (le poids et la teinte, par exemple). Il semble clair que le statut des dimensions peut changer selon le degré d'expertise de l'observateur : l'orient d'une perle est une dimension intégrale pour un observateur naïf, de même que la qualité perçue d'un véhicule alors que ces notions explosent en une multitude de dimensions séparables pour un expert de l'industrie des transports (les spécialistes parlent de 2000 articles de cotation).
2. L'espace s'organise en *domaines*, ensembles de dimensions séparables de toutes les autres (la couleur...).
3. On peut définir des *relations* entre points de l'espace. En cela l'auteur rejoint l'approche d'Edelman [90] : dans la représentation il y a quelque chose de plus que les données brutes, et il s'agit des relations entre données
4. Dans l'espace, un *concept* correspond à un ensemble de qualités et de relations (la lettre "a", "une pomme" sont des concepts). Ce point est crucial car comme rappelé par Edelman [90, 91] à propos de la reconnaissance de caractères, deux "a" tracés par deux mains différentes sur deux documents différents, puis scannés, ne peuvent être comparés en tant que listes de coordonnées de leurs pixels, alors que les relations entre coordonnées établissent facilement la ressemblance. Ceci ouvre un champ très fertile de questionnement quant à la nécessité de disposer de mesures extrêmement précises pour distinguer deux matériaux : les relations entre données même acquises avec une précision inférieure, ne seraient-elles pas suffisantes ?
5. Les *propriétés* sont quant à elles des *régions* de l'espace. Elles possèdent donc des valeurs selon les différentes dimensions. Ces valeurs sont ju-

gées possibles pour le domaine considéré. Comme je l'ai signalé [JTP6], le jugement sur les valeurs peut être lié à l'expérience vécue, à divers préjugés ou normes, ou encore à un savoir théorique. Considérer une propriété visuelle comme une projection dans le plan visuel d'une région multisensorielle revêt là encore un fort potentiel, au moins théorique : pourrait-on étudier les interactions sensorielles (entre vision et toucher par exemple) par le biais de projections "obliques" ?

6. On peut définir dans l'espace conceptuel une *mesure de la similarité* (de la distance) entre points. Cette notion centrale sera discutée plus loin. A ce stade on peut néanmoins rappeler que sur une carte routière :
 - deux points très proches sont jugés similaires à l'échelle d'utilisation (Annecy et Annecy-le-Vieux sur une carte routière au 1/250000^e. C'est exactement l'hypothèse de la discernabilité colorimétrique : il existe dans l'espace des couleurs une distance (euclidienne) en dessous de laquelle deux perceptions sont indiscernables
 - la similarité doit être rapportée au bon domaine ("j'habite à l'Elysée" et "j'habite à l'hôtel Matignon" ne sont pas similaires bien que les lieux soient géographiquement proches)
 - c'est également la logique de l'analyse sensorielle : pour un descripteur donné (dimension), une note est attribuée par un sujet entraîné par comparaison à des standards appris et application d'une proportionnalité (dans les intervalles entre standards)
7. Enfin, l'espace conceptuel peut être décrit, il existe donc une *sémantique* capable d'en rendre compte et cette sémantique s'analyse à son tour en termes d'espace sémantique. Pour l'auteur, ce lien provient du fait que les structures conceptuelles sont littéralement "incorporées" (embodied), et donc fondées sur les sensations comme le démontrent les travaux d'Herskovits [132], Lakoff [178] ou Helmantel [131] qui mettent en évidence des liens entre adjectifs et propriétés, entre verbes et concepts temporels, entre noms et domaines, ainsi qu'entre locutions adverbiales et relations spatiales

Ainsi défini, l'espace conceptuel de Gärdenfors ne se distingue pas selon moi des espaces qualifiés de "perceptuels" par d'autres auteurs [281, 223, 100]. Dans l'espace conceptuel l'objet est représenté par son apparence, on s'y trouve donc dans une optique de "réalisme indirect". On reviendra sur cet outil au chapitre 7 mais on perçoit intuitivement bien son caractère modal, multiscalaire (je présente régulièrement aux étudiants l'exemple du tri des couverts : la catégorisation effectuée sur un vaste ensemble de couverts conduit à séparer spontanément les fourchettes, cuillères et couteaux. Si on ne laisse que les fourchettes, les différents modèles seront triés spontanément).

Pour clore sous forme de clin d'œil cette section consacrée aux espaces conceptuels, la Figure 2.6 présente une image bidimensionnelle de l'espace conceptuel des théories actuelles sur la conscience, qui illustre clairement l'antagonisme entre tenants des représentations (vehicle) et des traitements (process).

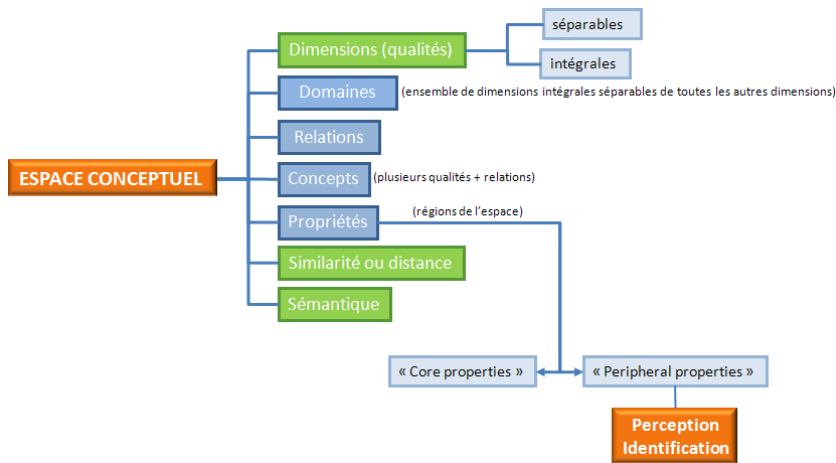


FIGURE 2.5 – Attributs d’un espace conceptuel au sens de Gärdenfors [JTP7] d’après [118]

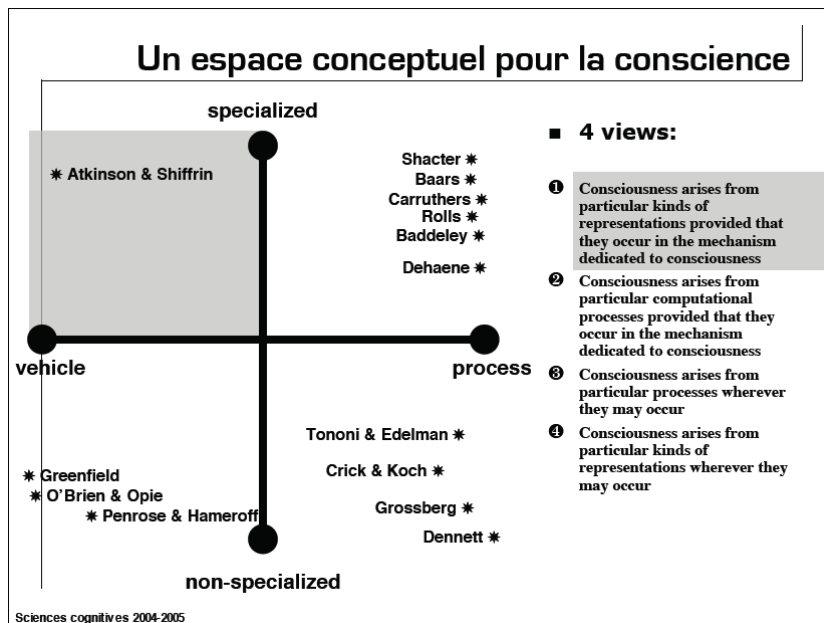


FIGURE 2.6 – Un espace conceptuel au sens de Gallina, celui des théories modernes de la conscience [210]

2.7 Aspect et approche sensorielle

On peut situer la naissance de l'analyse sensorielle dans les années 1920 dans le domaine de l'industrie agro-alimentaire. Elle se définissait alors elle-même comme la "*science relative à l'examen des propriétés organoleptiques d'un produit par les organes des sens*" [141]. L'analyse sensorielle tend à considérer l'individu comme un instrument de mesure des propriétés sensorielles, et base son discours technique sur la rationalisation d'un domaine subjectif. Les principaux axes de cette démarche concernent l'évaluation des caractéristiques sensorielles et des différences par des épreuves descriptives ou discriminatives, la caractérisation des préférences par des "études consommateurs" et des épreuves hédoniques, et la recherche des causes des préférences par la cartographie de celles-ci.

Pour cette discipline, l'aspect prend la forme d'un ensemble de descripteurs qui font l'objet d'une évaluation chiffrée par comparaison à des références apprises. Ils doivent pour cela répondre à un cahier des charges précis et être :

- Pertinents, c'est à dire contextualisés
- Précis, pour éviter l'ambiguïté de termes comme par exemple "doux"
- Discriminants, pour fournir la plus grande dynamique possible à la notation
- Exhaustifs, pour éviter les effets de caricature
- Indépendants, c'est à dire séparables au sens de [118]
- Et surtout associés à une méthodologie d'évaluation (protocole) précisément décrite

Ainsi définis, les descripteurs apparaissent comme des analogues des "dimensions" de l'espace conceptuel, et il est possible de construire des référentiels pour l'entraînement des jurys. En principe un référentiel est spécifique d'un domaine d'application ou d'un type de produit [205], même si certains prétendent à une certaine universalité [248, 146]. En termes d'espaces conceptuels, un référentiel sensoriel est donc *une* représentation d'un *domaine* ou d'un sous-domaine, constitué par autant de "collections" ordonnées que de *dimensions*.

En pratique, le cheminement décrit par la norme ISO 11035 consiste à trouver les descripteurs consensuels d'une sensation pour un groupe de sujets référents (jury), puis à construire une échelle d'étalons d'intensité pour chaque descripteur. Le groupe, ou un autre groupe, est alors entraîné à répondre convenablement à des stimuli calibrés. Après une phase d'élimination des individus présentant une reproductibilité insuffisante ou un trop grand écart à la moyenne du groupe, on utilise ce jury comme instrument de mesure. Les tests sensoriels peuvent revêtir une grande variété de formes, dont la présentation est hors du cadre de ce mémoire. Le lecteur intéressé trouvera la description des attributs des tests et leurs modes opératoires dans le manuel méthodologique de Depledt [78].

Dans la dernière décennie du XX^e siècle, la tendance générale à considérer tout phénomène comme complexe a fait évoluer l'analyse sensorielle selon trois axes : la prise en compte des différences individuelles (segmentation des panels), la relation avec l'analyse instrumentale (reverse engineering) et la prise en compte d'attributs holistiques ou cognitivement complexes [214]. On voit que ce faisant l'analyse sensorielle abandonne quelque peu son discours sur le

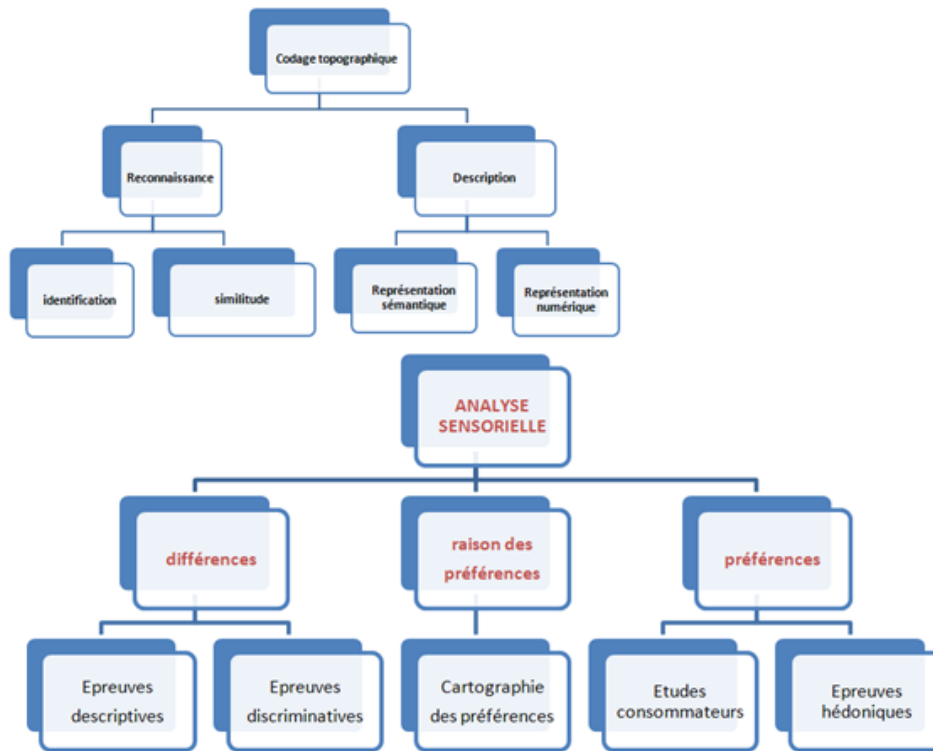


FIGURE 2.7 – Le passage de la perception à l'analyse sensorielle

caractère absolu des mesures, et rapproche ses méthodes et ses objectifs de ceux de la psychologie cognitive.

2.8 Aspect et approche psychophysique

L'approche psychophysique exploite les résultats d'épreuves de discrimination, de tri et de classement pour déterminer des seuils de perception, des sensibilités et des stratégies de détection des stimuli. Elle cherche donc à déterminer les caractéristiques des filtres permettant au système sensoriel humain de transformer un stimulus en une sensation, ainsi que les processus par lesquels ce filtrage est effectué. Les travaux fondateurs sont par exemple ceux de physiologistes (Weber, sur la perceptibilité des incréments) et de mathématiciens (Fechner, sur la dépendance logarithmique des réponses et des stimuli) travaillant sur la quantification des différences perceptibles, et sur les relations entre intensités de stimulation et de réponse. Ils obtiennent des courbes stimulus-réponse qu'on peut qualifier d'empiriques (Figure 2.8). Depuis Shepard [269], on utilise des techniques comme le positionnement multidimensionnel (MDS, technique sur laquelle nous reviendrons plusieurs fois) pour estimer l'organisation géométrique de ces relations sans formuler d'hypothèse *a priori*. Avec le temps l'intérêt s'est déplacé vers la compréhension des processus de transduction, permettant de construire des fonctions transformant le stimulus en réponse psychophysique. Cette démarche, qui nécessite de savoir reconnaître les structures cellulaires responsables de la détection des stimuli et de

leur codage, conduit à construire des fonctions de filtrage à partir de modèles complétés par des expériences d'égalisation, ou à partir de mesures directes permises par la miniaturisation et les progrès des électrodes neurologiques [73]. Avec la mise en œuvre de ces techniques, on dispose de bonnes descriptions directes des réponses des capteurs rétinien, tactiles ou auditifs mais également de neurones intervenant dans des représentations plus abstraites (par exemple *number neurons* [269, 73]).

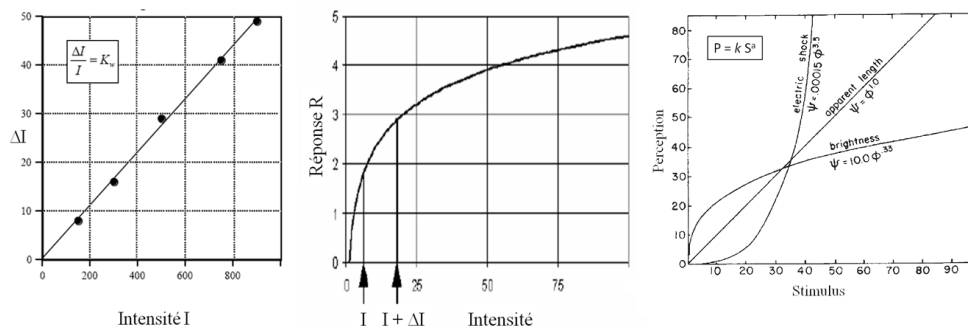


FIGURE 2.8 – De gauche à droite, les lois classiques de Weber (le seuil de discrimination de 2 stimuli s'accroît linéairement avec l'intensité des stimuli), de Fechner (le stimulus est redimensionné en une représentation interne logarithmique) et Stevens (le stimulus est redimensionné en une fonction puissance)

2.9 Aspect et approche physique

L'approche physique de l'aspect concerne les composantes des stimuli mesurables instrumentalement. Elle nous ramène à la notion philosophique de *qualités* évoquée plus haut. Elle n'est donc plus centrée sur l'observateur mais sur le matériau et ses interactions avec les énergies auxquelles il est soumis et sur lesquelles il agit comme un filtre. L'interaction de ce niveau physique avec les autres niveaux dont nous traitons (Figure 1.1) lui confère plusieurs particularités par rapport à l'approche qu'en feraient les physiciens :

1. les niveaux énergétiques auxquels on s'intéresse doivent être compatibles avec ceux que détectent les capteurs humains visuels, tactiles et auditifs
2. le choix des propriétés à mesurer et des instruments de mesure est lui-même un sujet d'étude, qui nécessite une bonne compréhension des mécanismes gouvernant les sensations. Ainsi le descripteur thermique du toucher est-il dépendant de l'effusivité d'un matériau plutôt que de ses autres propriétés (une céramique à 20 degrés paraît froide, une plaque de polystyrène à la même température paraît tiède). Le recours à une approche analogique (doigt thermique de Renault) peut donner des résultats corrélés à la sensation mais non semblables : le temps de réaction du doigt thermique est sensiblement plus long que celui d'un doigt humain.
3. la résolution des mesures n'a pas à être très supérieure à la résolution des capteurs humains telle qu'elle est déterminée par l'approche psychophysique
4. les "sorties" numériques issues des différents instruments disponibles peuvent être de statuts très divers : intensités électriques brutes issues

d'un capteur (jauge de pression, thermocouple), transformations en une grandeur via un processus de calibration (réflectance, pression, température), données dérivées par filtrage (triplet colorimétrique), résultat d'un calcul complexe (effusivité thermique)

5. la notion de stimulus peut faire débat : les stimuli visuels sont-ils des intensités structurées par des relations spatio-temporelles, des images ou les deux à la fois ?
6. les progrès de la modélisation physique ou multiphysique permettent de générer des stimuli virtuels qui peuvent être traités comme des stimuli réels. On peut également simuler leur mesure via un capteur lui-même virtuel (voir par exemple les logiciels SPRay [290], COMSOL Multiphysics [51] ou MIST [111]). Dans le cas de stimuli-images virtuels on déplace l'objet d'étude comme semblent le montrer les nombreux travaux menés en substituant des représentations sur écran d'images d'objets plus ou moins brillants à l'observation de scènes réelles.

2.10 Conclusion

La question posée en titre du chapitre était "de quoi *aspect* est-il le nom?". A ce stade nous pouvons retenir de ce survol :

1. que l'aspect d'une chose peut être décrit en son absence en référence à un modèle idéal archétype ou à une collection d'exemplaires construite par expérience (prototypes, auxquels s'applique une sémantique qui renseigne sur les dimensions principale de la représentation
2. que les représentations font l'objet d'une catégorisation dont un des modèles est celui des espaces conceptuels
3. que l'établissement de relations entre stimuli est une composante essentielle des processus de catégorisation
4. que l'aspect d'une chose ne nous est perceptible qu'à travers des processus psychophysiques qui transforment des stimuli physiques, chimiques ou physico-chimiques en continuums de valeurs ordonnables qui sont également des représentations
5. que les descripteurs de l'analyse sensorielle s'apparentent à des dimensions de l'espace conceptuel
6. que depuis la fin des années 70 l'étude empirique des relations entre stimuli et réponse par les sciences cognitives passe par des techniques de positionnement multidimensionnel et de moins en moins par des techniques corrélatoires
7. que du fait des avancées en neurophysiologie on s'intéresse de plus en plus à la circulation de l'information électrique au sein du système perceptif, les grandeurs psychophysiques étant utilisées à des fins de vérification des modèles et d'*étalonnage*

Cette énumération nous incite à envisager de tenter de rassembler trois niveaux de cartographie en un seul objet, à la manière des diatopes géopolitiques de Lacoste [176] : un étage sémantique, un étage psychophysique modal et un étage physique correspondant aux stimuli.

Les matériaux, générateurs de stimuli

Il s'agira d'étudier en détail les signatures spectrales [...] dans la zone d'Aram Chaos, une dépression de 300 km de diamètre caractérisée par des terrains chaotiques et des traces laissées par des écoulements catastrophiques. Les cartes minéralogiques seront intégrées (sous SIG) à des données d'imagerie à haute résolution afin d'étudier la corrélation entre les signatures spectrales et la géomorphologie des terrains observés, afin d'aboutir à un scénario permettant d'expliquer l'histoire géologique de cette région.

S. Le Mouélic et O. Bourgeois, "Etude par spectro-imagerie de la surface de Mars", proposition de stage de Mastère "Géosciences planétaires" de l'Université de Nantes, 2007

Les stimuli détectés par notre système sensoriel visiotactile possèdent dans notre approche d'ingénierie un double statut : ils sont à la fois symptôme et propriété d'usage :

1. un aspect insuffisamment brillant est parfois considéré, même inconsciemment, comme le symptôme d'un défaut de polissage. L'ingénieur aura ici une démarche inverse, "remontant" au défaut via un modèle de la propriété
2. lors du choix d'un broyeur industriel, on peut s'interroger sur celui qui conduira à la meilleure blancheur d'une poudre d'oxyde. Dans ce cas la propriété constitue tout ou partie de la valeur commerciale du produit et il convient de prédire au mieux les conséquences d'un choix technique sur la future valeur marchande

Les stimuli auxquels nous nous intéressons sont des signaux émis par les matériaux en réponse à une sollicitation énergétique : radiations électromagnétiques (vision) ou contraintes thermomécaniques (toucher, audition)... Les interactions ont lieu à différentes échelles : moléculaire (atomes, ions et assemblages d'atomes), nanométrique (structures cristallines, couches minces), micronique ou quasi-micronique (particules, objets structurés naturels ou artificiels : carapaces, écailles, réseaux de diffraction...), millimétrique à centimétrique (surfaces texturées : roches, béton, bois, métaux travaillés, peintures affectées de défauts...). A chaque échelle, tout un arsenal théorique et logiciel permet de décrire les phénomènes et de quantifier ou prédire les interactions. Il n'entre pas dans l'objet de ce mémoire d'en dresser une liste qui aurait bien du mal à être exhaustive. Ce qui suit présente quelques exemples afin d'illustrer notre démarche, qui est principalement motivée par la volonté de cartographier ensemble des stimuli réels (mesurables sur des matériaux existant) et synthétiques (issus de modèles pour représenter des matériaux virtuels). Cette approche est classique en colorimétrie où les coordonnées colorimétriques de matériaux de référence et de leurs contretypes calculés peuvent être représentées dans le même espace.

3.1 Apparence visuelle et structures moléculaires

Pour les ingénieurs du domaine des matériaux, les structures moléculaires appartiennent plus au domaine de la matière qu'à celui des matériaux proprement dit. Bien que cette échelle soit donc à l'extrême limite amont fixée à notre thématique, les phénomènes qu'elle suscite sont d'importance majeure pour les stimuli que nous étudions. Les interactions lumière-matière, à l'échelle atomique ou moléculaire, se traduisent par des phénomènes d'absorption et de transmission différentielles de l'énergie incidente, ce qui donne naissance aux propriétés spectrales comme la couleur. Pour les modéliser, la première idée est évidemment d'utiliser une approche *ab initio* pour calculer l'interaction entre un atome ou groupe d'atome et un rayonnement électromagnétique. Parce que cela demande des compétences extrêmement spécialisées et des moyens de calculs conséquents même pour des assemblages très simples, nous n'utilisons pas cette approche sinon à travers des partenariats académiques. Le lecteur intéressé trouvera néanmoins en bibliographie [10] un lien vers une liste de modèles et logiciels de simulation *ab initio* ainsi que des logiciels basés sur des approches

semi-empiriques. Dans notre optique d'ingénierie, nous utilisons le formalisme de la théorie (il s'agit plutôt d'un modèle que d'une description réaliste) dite du "champ cristallin" (modèle ionique) ou du "champ de Ligand" (modèle covalent) proposée par le physicien Hans Bethe [197, 198]. Selon celle-ci, un ion chromophore voit sa structure électronique affectée par l'intensité et la topologie du champ électromagnétique émis par le squelette cristallin dans lequel il est inséré. Cette déformation de la structure électronique se traduit spectralement, y compris dans le visible, par des décalages calculables ou mesurables des bandes d'absorption, comme le montre la Figure 3.1.

Cette théorie présente pour nous plusieurs avantages :

1. elle est à la portée des ingénieurs en matériaux possédant un bagage standard en physico-chimie
2. elle permet quelques calculs de base et manipulations de concepts à partir des spectres de réflectance, en particulier :
 - a) lorsqu'on est capable d'attribuer les bandes d'un spectre d'absorption à des transitions entre niveaux il est possible de calculer un certain nombre de paramètres caractéristiques du champ, et donc de remonter à l'environnement d'un ion métallique dans un cristal
 - b) les paramètres les plus caractéristiques de cet environnement sont les "paramètres de Racah" B et C liés à la répulsion entre électrons, et $\Delta = 10Dq$ (où Dq est la force du champ cristallin)
 - c) on dispose de diagrammes types, dits diagrammes de Tanabe-Sugano [285, 286, 287] qui permettent de prédire semi-quantitativement les bandes d'absorption résultant d'une configuration donnée
3. elle est classiquement utilisée pour interpréter la couleur des complexes métalliques

La Figure 3.2 illustre les résultats obtenus dans le cas de l'adsorption d'ions molybdate sur des billes de gel de chitosane [PL4]. R' désigne la réflectance normalisée (équation 3.2) après application de la correction de Saunderson (équation 3.1). Cette dernière permet la correction de la réflectance mesurée R_{mes} pour en retrancher les phénomènes de réflexion à l'interface supérieure (r_e correspond à la réflexion lors de l'entrée dans le matériau et r_i au franchissement de la même interface dans l'autre sens). Les pics de réflectance observés montrent pour l'ensemble des concentrations un maximum relatif vers 500 nm (vert-bleuâtre) et un épaulement vers 460 nm (bleu-violacé). Un maximum absolu est atteint entre 560 et 580 nm (jaune-verdâtre à jaune), avec une absorption significative au-delà de 600 nm. L'augmentation des concentrations en molybdates se traduit par l'augmentation de la réflectance à 500 nm et l'inversion du rapport des réflectances à 500 et 580 nm. La couleur résultante évolue du gris au jaune-verdâtre aux faibles concentrations puis aux concentrations plus élevées les billes prennent une teinte bleu-vert de plus en plus intense. Ceci peut être interprété comme significatif de la prédominance des formes réduites du molybdène sur les formes oxydées lorsque les billes sont mises en contact avec des solutions fortement concentrées en ions molybdates, alors que pour les faibles concentrations initiales en molybdates les formes adsorbées sont dans des états d'oxydation plus élevés. Cette interprétation (table 3.1), qui rejoint ce que l'on sait de la synthèse du "bleu de molybdène", est cohérente avec celles issues de la spectrométrie infra-rouge.

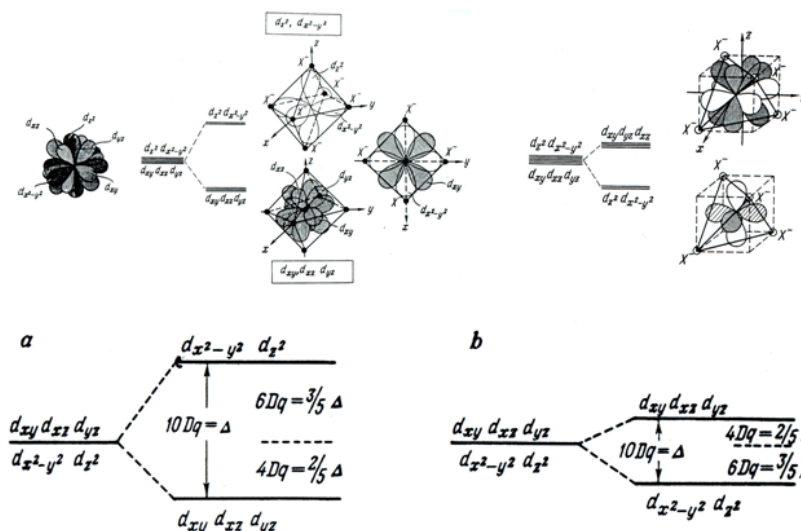


FIGURE 3.1 – Le formalisme de la théorie du champ cristallin [197, 198]. En haut, décomposition des niveaux énergétiques correspondant aux orbitales d d'un ion de métal de transition (à gauche) par un environnement octaédrique (au centre) ou tétraédrique (à droite). En bas : relations entre paramètres Dq et Δ . Pour leur signification voir texte.

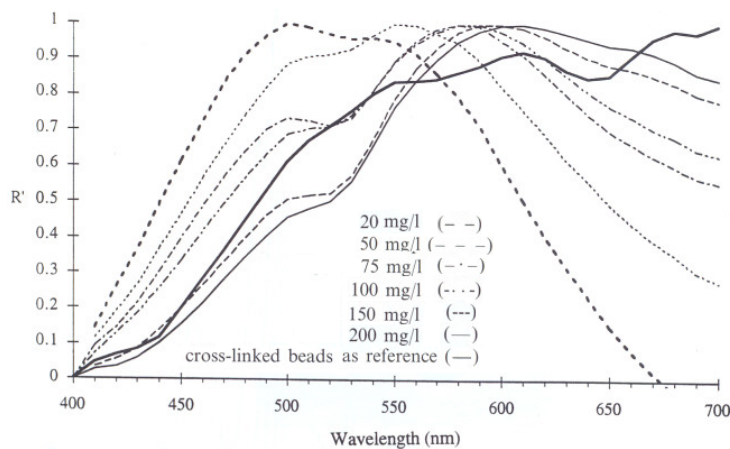


FIGURE 3.2 – Adsorption d'ions molybdates à différentes concentrations sur billes de chitosane : spectres de réflectance normalisée après correction de Saunderson [PLA]

$$R_{mes} = r_e + (1 - r_e)(1 - r_i) \frac{R}{1 - r_i R} \quad (3.1)$$

$$R'_\lambda = \frac{R_\lambda - R_{400nm}}{R_{max} - R_{400nm}} \quad (3.2)$$

TABLE 3.1 – Molybdène : degrés d'oxydation, configurations électroniques (entre parenthèses, configurations types) et couleurs

Degré d'oxydation	Configuration	Couleur
Mo	$4d^5 5s^1$	incolore
Mo I	$4d^5 (\Leftrightarrow Mn^{2+})$	bleu
Mo II	$4d^4 (\Leftrightarrow Mn^{3+})$	jaune, vert, bleu
Mo III	$4d^3 (\Leftrightarrow Cr^{3+})$	vert, violet
Mo IV	$4d^2 (\Leftrightarrow V^{3+})$	vert, vert-jaune, jaune
Mo V	$4d^1 (\Leftrightarrow Ti^{3+}, V^{4+})$	vert
Mo VI	$4p^6$	incolore

3.2 Apparence visuelle et nanostructures

A l'échelle nanométrique, on rencontre nanoparticules, couches minces, structures périodiques et défauts. Dans notre domaine d'ingénierie, cette échelle est longtemps restée celle des couches minces et des structures périodiques de dimension équivalente aux longueurs d'onde de la lumière visible : réseaux et matériaux interférents. Le taux actuel d'utilisation des nanoparticules métalliques dans le secteur des "matériaux de grande diffusion" est très faible ou quasi-nul, et jusqu'à récemment les seuls matériaux dont les propriétés visuelles étaient attribuées au comportement optique de particules nanométriques (formées in situ) étaient des matériaux vitreux contenant des colloïdes : verres (le verre groseille, ou "Rubis doré") ou émaux pour céramiques. L'optique des nanoparticules métalliques présente de nombreuses particularités que le lecteur intéressé trouvera décrites dans les synthèses de Daniel et Astruc [65] et Khlebtsov et Dykman [164]. La plupart sont des conséquences de l'existence des plasmons de surface, des ondes électromagnétiques propagées à l'interface entre un métal et son environnement diélectrique par l'oscillation des électrons de conduction. Les propriétés qui en résultent montrent une dépendance forte avec la taille des particules : lorsque celle-ci décroît, la proportion d'atomes situés à sa surface augmente. Cette dépendance se rencontre aussi pour les *quantum dots*. Les domaines concernés sont principalement l'instrumentation (nanoparticules utilisées comme détecteurs), le secteur biomédical (nanoparticules-sondes diagnostiques ou thérapeutiques) et la nano-optique elle-même (nano-guides d'ondes).

Interférence

Le domaine des matériaux de grande diffusion est beaucoup plus familiarisé avec les conséquences des phénomènes d'interférence, présents en traitement de surface (anodisation, . . .) et responsables de l'existence de pigments interférentiels. Les particules qui les produisent sont généralement de taille micronique plutôt que nanométrique, mais le phénomène est lié à des sous-structures dont la dimension significative est bien d'ordre nanométrique. L'interférence est due à la superposition de couches ultra-minces d'indices de réfraction différents : dans le domaine des filtres interférentiels les couches minces sont fréquemment métalliques sur substrat diélectrique, et dans le domaine des pigments on a le plus souvent un empilement de couches d'oxydes associées ou non à des couches destinées à renforcer la visibilité du phénomène (couches fortement absorbantes). Outre les indices de réfraction, le paramètre significatif est l'épaisseur des couches. Il introduit une différence de marche entre rayons réfléchis aux deux interfaces de la couche, qui n'est constructive que quand elle est un multiple de la longueur d'onde (équation 3.3). La Figure 3.3 illustre la géométrie du phénomène. Il en résulte des variations de teinte avec les angles d'incidence et d'observation, qui donnent naissance à la notion de "chemin chromatique" sur laquelle nous reviendrons (Figure 3.4).

$$2n_2d \cos(\theta_2) = m\lambda, m \in \mathbb{N} \text{ selon la nomenclature de la Figure 3.3} \quad (3.3)$$

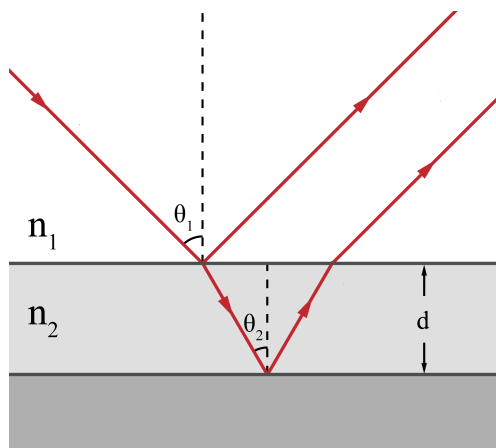


FIGURE 3.3 – Paramètres réglant le phénomène d'interférence

De nombreux outils permettent de calculer le résultat d'une interférence. La plupart d'entre eux proviennent des domaines de l'optique ou de l'opto-électronique (calcul de filtres). Nous utilisons principalement TFCalc [276], FreeSnell [144] et GranFilm [179]. Leur utilisation première concerne des milieux dont l'extension horizontale peut être considérée comme infinie par rapport à l'épaisseur (films). En les combinant avec un raisonnement qualitatif [315], une observation visuelle et des mesures réalisées sous microscope on peut néanmoins les utiliser pour expertiser ou modéliser des particules interférentes.

Nous donnons ci-après un exemple d'utilisation de TFCalc pour l'investigation de déviations constatées lors de la synthèse d'un matériau destiné à l'industrie cosmétique [PDC4]. Les noms des constituants et leurs indices de

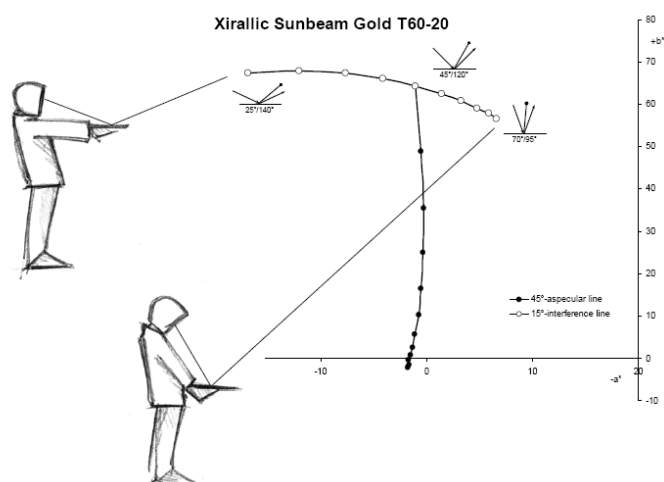
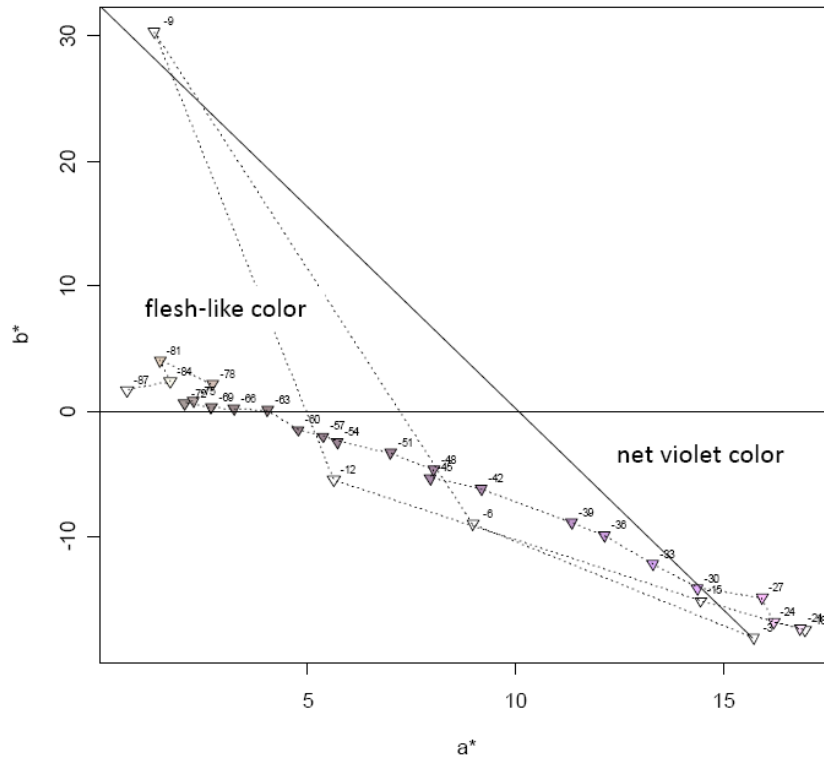


FIGURE 3.4 – "Chemin chromatique" : coordonnées chromatique (a^* , b^*) pour une succession organisée d'angles d'incidence et de détection. Pigment Merck, [58]

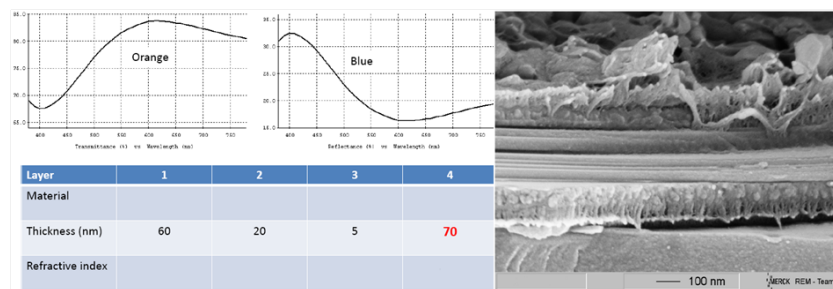
réfraction ont été masqués pour raison de confidentialité. Les mesures spectrométriques sont réalisées deux fois : macroscopiquement au moyen d'un goniospectrocolorimètre Instrument Systems (platine GON360 couplée et spectromètre MAS40) sur des couches minces obtenues par dépôt sur lame de verre, et microscopiquement sur des particules isolées sous microscope Leitz dont on a remplacé la caméra CCD habituelle par un spectroradiomètre à visée Pritchard (PhotoResearch PR650) muni d'une monture adéquate et dûment calibré. La Figure 3.5 illustre un des résultats obtenus. Une déviation de 15 nm de l'épaisseur de l'une des quatre couches suffit à expliquer le comportement colorimétrique constaté, et cette déviation est confirmée par l'examen en microscopie électronique. Le défi en matière d'ingénierie est donc la maîtrise de l'épaisseur de cette couche.

3.3 Apparence visuelle et microstructure

L'échelle micronique est celle des particules et des mélanges auxquels nous sommes le plus souvent confrontés. C'est l'ordre de grandeur des dimensions des particules de poudres minérales ou organiques les plus familières au monde industriel, sur lesquelles nous avons commencé nos activités : farines, actifs et charges pharmaceutiques ou cosmétiques, pigments et charges pour peintures, bétons, céramiques, papiers ou polymères... (qui sont des matériaux et non des matières). C'est également l'échelle de leur structuration, tant en volume qu'en surface (Figure 3.6). La contribution de cette échelle à l'aspect visuel est liée aux phénomènes de diffusion (simple ou multiple) et de diffraction, gouvernés par les constantes optiques (indices de réfraction), la taille, la forme des particules, et les propriétés géométriques de leur assemblage. Ces dernières peuvent être décrites de manière discrète aux noeuds d'un réseau régulier ou de manière statistique [295, 121]



(a) Chemin chromatique expérimental



(b) Prédiction et contrôle MEB

FIGURE 3.5 – Modélisation de la structure d'un pigment interférentiel expérimental [PDC4] : chemin chromatique, réflectance et transmittance prédites pour un angle d'incidence, coupe transversale dans une particule isolée

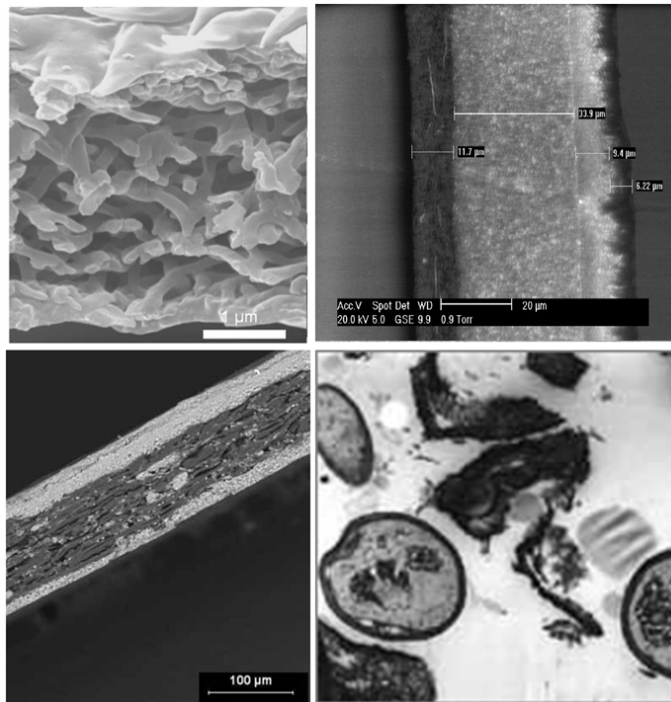


FIGURE 3.6 – Microstructures naturelles et artificielles, dans le sens de la lecture : carapace du coléoptère blanc *Cyphochilus* [124], peinture automobile, papier et pâte à pain. Les barres d'échelles représentent respectivement 1, 20, 100 et 50 μm .

Diffusion volumique

A l'échelle micronique, la diffusion de la lumière par une particule isolée est aisément décrite par des formalismes qui sont des solutions exactes des équations de Maxwell : celui de Mie pour les formes simples (sphères pleines ou creuses, voire couvertes, ou ellipsoïdes) et celui de Waterman (T-matrices) pour les objets de formes complexes décrits de manière discrète (le lecteur intéressé en trouvera une description fouillée dans Mishchenko et al. [209]). Mais il est rare que les objets de telle taille se rencontrent isolés. Ils constituent généralement des milieux plus ou moins denses (aérosols, suspensions, pâtes, solides) où se produisent principalement des phénomènes de diffusion multiple. Des structures diffusantes se rencontrent également chez les êtres vivants : émail, carapace blanche du scarabée *Cyphochilus* [124]... Pour une synthèse des modèles de diffusion et de leur formalisme mathématique, le lecteur pourra se référer en particulier à Simonot et al. [272], qui proposent également leur propre modèle. On trouvera dans la synthèse due à Kahnert [151] un examen de différentes méthodes récentes utilisées dans le cas de particules non sphériques, ainsi que le détail des aspects calculatoires.

Plusieurs approches sont possibles :

1. la modélisation dite "continue" dans laquelle les variations de flux énergétique sont décrites par l'équation de transfert radiatif pour tout élément homogène du milieu diffusant. Le plus connu de ces modèles est celui de Kubelka-Munk, qui résume les propriétés optique d'un matériau à deux

coefficients macroscopiques K et S , respectivement coefficient d'absorption et de diffusion relatifs à un diffuseur de référence

2. les modèles discrets dans lesquels les éléments de volume considérés sont de la taille des particules. On y retrouve l'approche de Mishchenko, étendue à des clusters de plusieurs milliers de sphéroïdes [192]
3. les modèles prenant en compte la diffusion simple pour décrire le comportement au niveau de l'élément de volume : modèles de Melamed (voir en particulier les travaux de Garay et al. [PL8]), Shkuratov [271], Simonot et al. [272].

En matière d'ingénierie, ces derniers nous intéressent tout particulièrement car ils établissent un lien entre comportement individuel et collectif des particules, et expriment le résultat dans l'espace du stimulus physique (réflectance, transmittance. . .). Le modèle de Melamed, raffiné par Garay et al. [PL8] pour prendre en compte le facteur de forme de particules assimilées à des ellipsoïdes, nous a permis d'aborder en particulier le problème des variations de réflectance d'un matériau lors de son broyage : étant donnée la réflectance d'une poudre minérale de courbe granulométrique connue, quelle serait la réflectance d'une poudre issue du même matériau mais de granulométrie ou de forme différente ? L'application est double :

1. audit d'un matériel de broyage par voie colorimétrique : l'écart d'aspect à la sortie d'un broyeur équipé d'une mesure granulométrique en ligne est-il dû à un écart de performance du broyeur, à une dégradation du matériau broyé ou à une pollution par le broyeur lui-même ?
2. aspect cartographique : production de courbes de réflectance diffuse synthétiques, pouvant être traitées de la même manière que des courbes expérimentales

Diffusion géométrique par la surface

La diffusion géométrique par les irrégularités d'une surface est due à la répartition des normales à cette surface. Il s'agit en quelque sorte d'une dispersion de la réflexion spéculaire (dont les caractéristiques propres dépendent quant à elles de l'indice de réfraction relatif du matériau) en fonction des conditions locales de pente et de courbure (Figure 3.7). C'est la cause principale des fonctions de réflectance bidirectionnelle (BRDF, voir chapitre 5). De nombreux auteurs ont montré que toutes choses égales par ailleurs il existe la plupart du temps une grande similitude entre la distribution statistique des orientations des normales à la surface et la fonction de réflectance (donc les caractéristiques de brillant par exemple), et de nombreuses interactions entre aspect visuel et tactile en découlent [218, 201, 188, 135, 185]. On constate toutefois que la plupart des modélisations utilisent encore des paramètres rugosimétriques statistiques alors que ceux-ci sont inadaptés, de nombreuses surfaces d'aspects différents pouvant conduire à des valeurs statistiques identiques.

Diffraction

Un autre phénomène notable issu de l'organisation des matériaux à l'échelle micronique est la diffraction, qu'on peut décrire comme une interaction entre

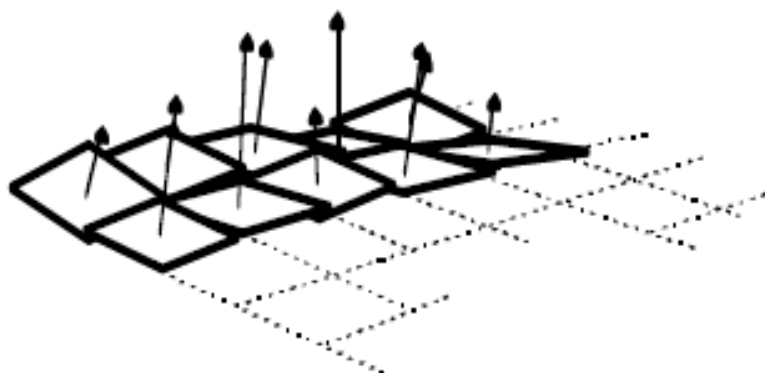


FIGURE 3.7 – Orientation locale des normales à une surface [188]

une onde incidente et des surfaces à structure périodique. Cette propriété exploitée à la fois en instrumentation (monochromateurs) et en marquage (impression, gravure) est également largement répandue dans la nature (plumes d’oiseaux, ailes de papillons. . .) où elle peut atteindre une très grande complexité comme chez *Papilio palinurus* [310, 311] où les couleurs bleu et jaune sont produites par une seule structure, via une double réflexion sur les deux faces perpendiculaires de cavités.

De manière simple, les positions angulaires des maxima d’intensité diffractée sont données par l’équation de réseau 3.4 dans laquelle m est l’ordre de la diffraction, G est la fréquence de la structure et ϵ est l’angle entre le rayon incident et le plan perpendiculaire aux structures. Il en découle que pour une incidence α on trouve les différentes longueur d’ondes à différents angles β (équation 3.5) :

$$m\lambda = d(\sin \alpha + \sin \beta) \text{ ou } Gm\lambda = \cos \epsilon(\sin \alpha + \sin \beta) \quad (3.4)$$

$$\beta(\lambda) = \sin^{-1}\left(\frac{m\lambda}{d} - \sin \alpha\right) \quad (3.5)$$

Ici encore l’ingénieur dispose de logiciels permettant de générer des signaux émis par des réseaux virtuels et de les confronter à des signaux cibles réels (la diffraction est également modélisée en synthèse d’image, voir par exemple [300]). Pour notre part nous utilisons PCGrate [262], logiciel qui accepte comme paramètres la géométrie du réseau, sa structure (éventuellement multicouche), les propriétés optiques de ses constituants et les caractéristiques de l’illumination (géométrie, intensité, répartition spectrale, polarisation) (Figure 3.9). Nous donnons ci-après un exemple d’application à l’ingénierie d’un réseau de type opale inverse organique (obtenue par auto-assemblage de polystyrène sur PVC ou PMMA) [PL11]. La Figure 3.8 montre les chemins chromatiques obtenus expérimentalement en réflexion et en transmission. Le tableau 3.2 compare le paramètre d_{calc} calculé à partir de ces données avec les mesures de d_{mes} réalisées en microscopie électronique. LR et LT désignent les résultats des calculs réalisés à partir des données expérimentales de goniospectrométrie obtenues respectivement en réflexion et en transmission.

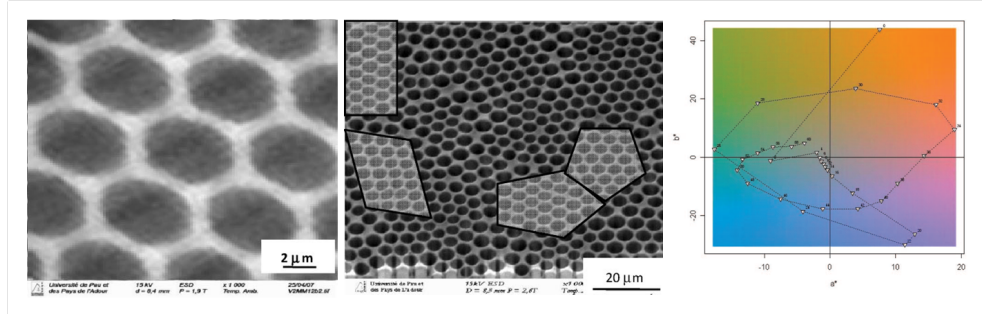


FIGURE 3.8 – Structures auto-organisées, polystyrène sur mica [PL11]. De gauche à droite : ordre local, structuration en domaines, chemin chromatique mesuré en transmission (voir tableau 3.2)

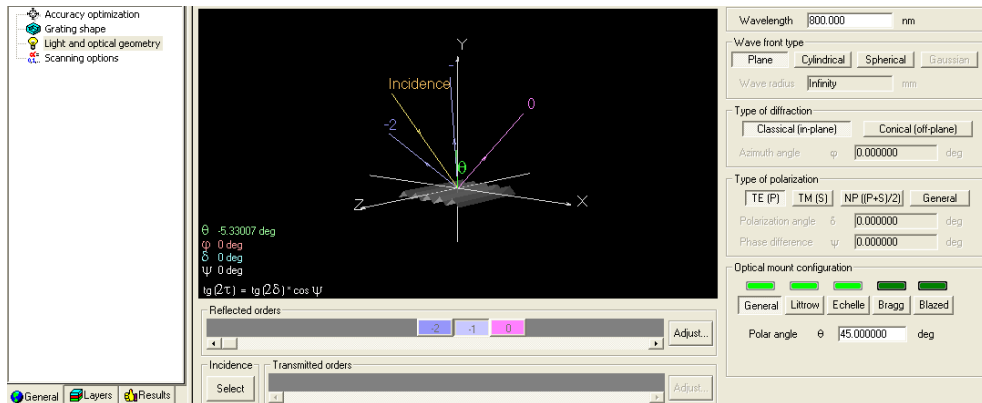


FIGURE 3.9 – Une partie de l'interface utilisateur de PCGrate : spécification de la géométrie d'illumination [262]

Ech	d_{calc} (μm)		d_{mes} (μm)
	LR	TL	
S1	1.16	1.16	1.22
S2	1.52	1.54	1.44

TABLE 3.2 – Opales inverses : périodicités prévues et mesurées expérimentalement (voir texte)

un exemple de structure complexe : la peau

En cosmétique par exemple, la mise au point de certains produits passe par une bonne compréhension des phénomènes optiques prenant naissance au sein des "tissus mous" des mammifères. De nombreux modèles sont fournis par la littérature spécialisée, basés sur la superposition des échelles : entités cellulaires (keratinocytes, mélanocytes, collagène, microvaisseaux), empilement de couches de textures différentes (épiderme, derme, niveau basal), structures intermédiaires (couche de sebum, poils, rides fines), macrostructures (rides, pores). La Figure 3.10 fait voisiner une représentation artistique du phénomène de diffusion (Georges de la Tour, détail du *St-Joseph*, 1642) avec à droite une approche récente plus technocentrée [30], et la Figure 3.11 présente, dans le sens des aiguilles d'une montre : un modèle de propagation [194], un modèle structural, les coefficients d'absorption (μ), coefficient d'anisotropie (g), indice de réfraction (n) et épaisseur (t) [203], et enfin les comparaisons entre mesures et simulation de la réflectance [194].

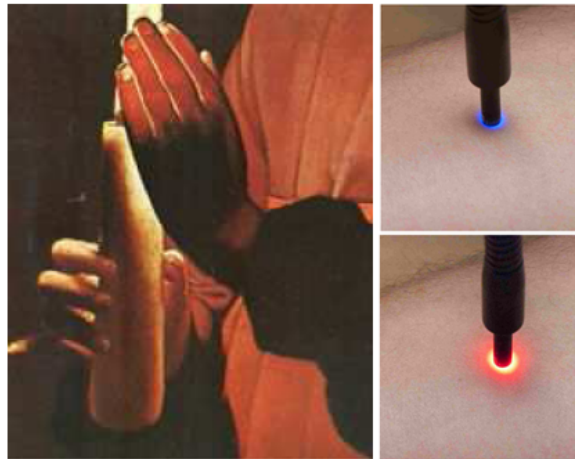


FIGURE 3.10 – Deux illustrations de la diffusion de la lumière par les "tissus mous" humains : Georges de la Tour (1642) et [30]

3.4 Apparence visuelle et macrostructure

Nous qualifions de "macrostructure" toute structure régionalisée de taille supérieure à la résolution des capteurs sensoriels humains dans les conditions d'observation. C'est donc une notion qui n'est pas bornée du côté des grandes dimensions, et qui n'est limitée du côté des petites dimensions que par notre incapacité à nous approcher infiniment du matériau. Elle n'a donc pas de pertinence en soi : la texture d'un bloc de granite est significative s'il est utilisé en pavage ou en construction, mais en télédétection elle ne l'est pas. Inversement, pour un observateur infiniment petit un fond de teint ou une peinture apparaîtraient comme fortement texturés.

Toujours dans notre optique d'ingénierie, nous pouvons donc envisager le rôle de la macrostructure de 2 manières différentes :

1. la macrostructure est elle-même un élément du stimulus : les éléments sont plus grands que le pouvoir séparateur de l'oeil mais plus petits que

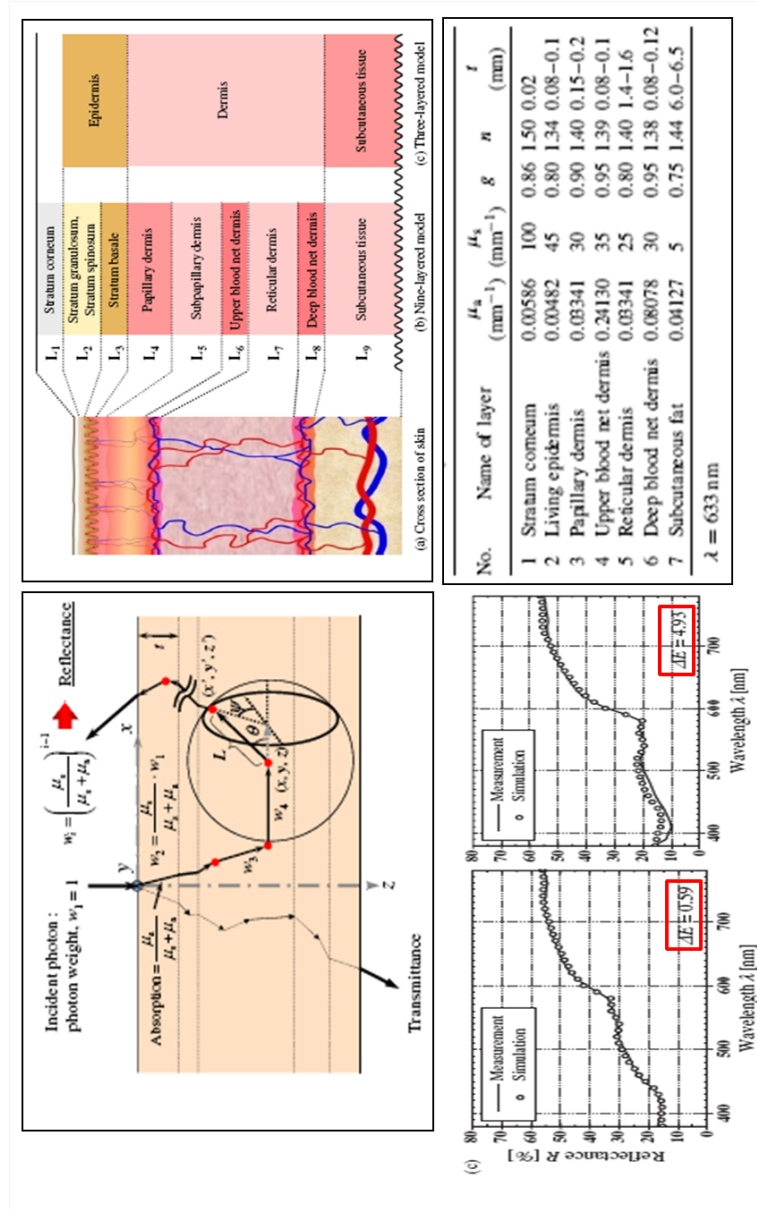


FIGURE 3.11 – Modélisation et validation d'un modèle multicouches de l'ensemble derme-épiderme. Adapté de [194] (voir texte)

le champ visuel : la scène incluse dans le champ visuel n'est pas perçue comme unie.

2. la macrostructure est largement plus grande que le champ visuel mais exerce une influence sur les caractéristiques d'aspect du matériau en usage : c'est par exemple le cas des gisements de matériaux utilisés pour leurs propriétés de blancheur ou de couleur

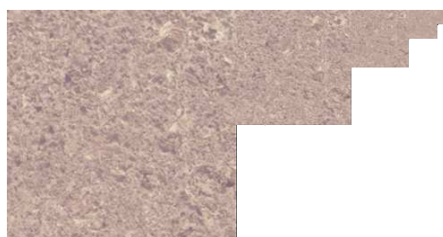
Stimuli texturés

Il n'entre pas dans le champ de ce mémoire de traiter du premier cas : c'est pour en traiter que j'ai proposé à D. Lafon, spécialiste au CMGD de l'analyse de texture et de l'analyse d'images, de rejoindre l'équipe paloise de l'EMA dans le milieu des années 90 pour y développer une approche spécifique de la perceptibilité des textures couleur. Nous avons alors dans l'idée de construire un continuum reliant les approches instrumentales légitimes pour les matériaux unis et les approches de l'imagerie peu précises pour les matériaux unis mais incontournables pour les matériaux texturés tels le bois ou la pierre. Cette approche a donné lieu à nos premiers travaux sur les façades de bâtiments [C6] puis aux travaux en cours de N. Concha-Lozano sur le rôle visuel de la patine des roches en restauration de bâtiments, après un détour par la perception visiotactile de la texture des bois poncés [TD6]. Un résultat entre néanmoins dans le champ de l'approche de visualisation et de cartographie développée ici : *carte d'identité chromatique*.

Il s'agit d'un outil reliant la richesse chromatique d'une surface à la distance d'observation. On conçoit qu'il existe une distance à laquelle cette richesse est maximale, alors qu'elle est minimale à des distances infiniment courtes (le champ visuel contient de moins en moins d'objets) ou très grandes (la surface se réduisant à un point de couleur unique dans le champ visuel avant de coalescer avec son environnement pour des distances encore supérieures). Si on la représente dans un diagramme de chromaticité tridimensionnel, on constate que la palette chromatique d'une image (le *gamut*) passe d'un volume à une surface avant de se réduire à une ligne et enfin à un point. Pour assurer l'homogénéité de la représentation sur le plus grand intervalle de distances possible nous mesurons la surface de l'enveloppe alpha-convexe du nuage de points, détournant pour cela l'idée exploitée par Cholewo et al. [48] dans le domaine de l'impression couleur. Le lecteur intéressé par les mathématiques associées à la notion d'alpha-forme trouvera le détail dans Edelsbrunner et al. [92]. La Figure 3.12c illustre le type de représentation obtenu, qui relie le logarithme de la surface de l'alpha-forme (\mathcal{S}_α) à la distance d'observation (ici approchée par la focale de prise de vue f). L'hypothèse sous-jacente est que l'on peut intégrer un élément d'une image à une autre dès lors que leurs valeurs de (\mathcal{S}_α) sont identiques. La figure 3.12 illustre le type de résultat obtenu par incorporation de l'image 3.12b à l'image 3.12a (on a conservé une petite ligne noire au sommet de l'élément collé pour améliorer sa détection visuelle).

Rôle du gisement

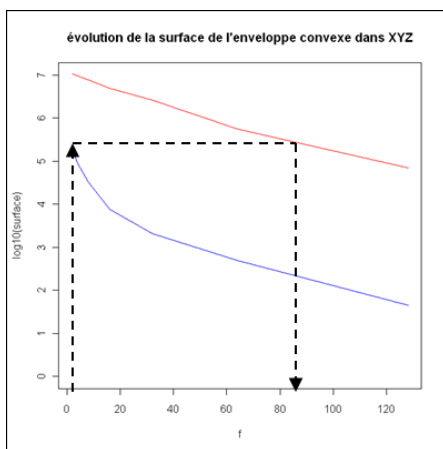
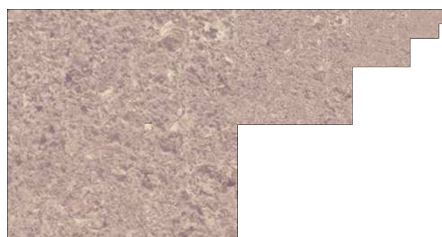
Bien que le gisement de matériaux naturels puisse être qualifié de méga-structure, il joue lui aussi un rôle dans les propriétés visuelles du matériau :



(a) Image 1 à différentes distances d'observation



(b) Image 2 à différentes distances d'observation

(c) Evolution du paramètre S_α (voir texte)

(d) l'image (b) introduite dans le carré de gauche de l'image (a) selon le rapport de distance choisi dans (c)

FIGURE 3.12 – Carte d'identité chromatique : intégration d'une image dans une autre en fonction de la signature chromatique de leurs textures (voir texte)

1. une roche est un assemblage de constituants minéralogiques possédant chacun leur comportement optique propre, et à ce titre c'est une "formule" au sens des industries de la couleur
2. l'histoire géologique du gisement est inscrite dans la microtexture des éléments minéraux et dans la mesotexture de la roche

Nous en donnons ici un exemple, dont les détails sont passés sous silence pour raison de confidentialité. Le gisement de pigments naturels dont il est question est éparpillé sur de nombreux sites sur lesquels un seul produit est sensé être exploité. L'exploitation consiste en un concassage grossier suivi d'un tri manuel puis d'un broyage fin. La qualité finale du produit subit des variations assez faibles ($\Delta E \approx 1$) mais largement détectables au regard des exigences de la filière industrielle dont il constitue un intrant. Lorsqu'on étudie la pétrographie de ces gisements, on ne trouve pas moins de 14 facies différents pour des compositions chimiques extrêmement proches (dans les disciplines géologiques le terme *facies*, qui signifie justement *aspect*, correspond à un ensemble de caractères descriptifs distinctifs d'un minéral, d'une roche ou d'un processus géologique...). La dimension des blocs concassés faisant l'objet d'un tri manuel est telle qu'ils contiennent la plupart du temps un mélange de plusieurs facies. Or seuls quelques-uns de ceux-ci présentent des caractéristiques propres

à assurer la meilleure qualité (clarté minimale et chromaticité maximale avec un angle de teinte spécifié). L'idée est donc de proposer un concassage plus fin, permettant d'obtenir des fragments homogènes, et d'appliquer le tri sur ceux-ci. La partie gauche de la Figure 3.13 résume l'algorithme permettant de classer chaque fragment concassé. La segmentation en 14 classes résulte d'une expertise pétrographique. Parallèlement, on fait l'hypothèse que chaque facies peut être assimilé à une formule pigmentaire, et que leur mélange peut être traité comme une nouvelle formule par le biais du formalisme de Kubelka-Munk évoqué précédemment. Cette approche permet de proposer les classes les plus homogènes possibles tout en atteignant pour un groupe de classes la meilleure qualité possible. Nous avons procédé à une expérience de vérification selon la méthodologie suivante :

1. extraction d'un lot par la méthode traditionnelle
2. division en 2 moitiés selon un processus aléatoire
3. traitement de la première moitié selon la méthode traditionnelle (non triées)
4. sur la nouvelle moitié
 - a) nouveau concassage à une maille très inférieure
 - b) tri manuel des 14 facies selon préconisation, fournissant la qualité optimale (B) et deux autres qualités (A et C)
5. réalisation d'éprouvettes issues des trois qualités constituées et mesure colorimétrique

La partie droite de la Figure 3.13 montre dans les diagrammes (L^*, a^*) et (a^*, b^*) l'amélioration effectivement constatée ($\Delta L^* \approx 1.2$ et $\Delta a^* \approx 0.4$ pour la qualité B). Les facies de la classe A étant les plus fréquents déterminent la qualité moyenne du lot exploité, la qualité B isolée donne le meilleur compromis clarté-teinte-saturation et la qualité C s'avère néfaste.

3.5 Physique et psychophysique : L'exemple de la transparence

Une propriété comme la transparence permet d'illustrer en raccourci la problématique du lien entre structure, propriété physique, mesure instrumentale et expression psychophysique. Dans l'exemple qui suit on s'intéresse à des matériaux qualifiés de transparents, et non de translucides.

Physique et matériaux transparents

La transparence est principalement une fonction inverse de l'intensité des phénomènes de diffusion lumineuse. Parce qu'elles sont en général dominantes dans le cas des matériaux translucides ou opaques, on pense classiquement à la diffusion géométrique par l'interface principale tout d'abord (cas des verres dépolis), et à celle par la taille des particules, largement modélisée. Pour des matériaux qualifiés de transparents, on oublie souvent des termes de poids moindre : lorsque les variations locales d'indices de réfraction sont importantes et (ou) lorsque le nombre d'interfaces à franchir est grand la diffusion joue un rôle perceptible. Les variations locales d'indice de réfraction peuvent être liées à

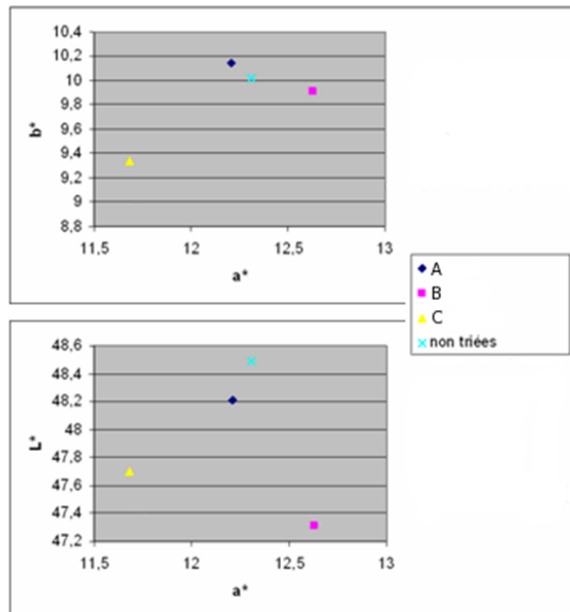
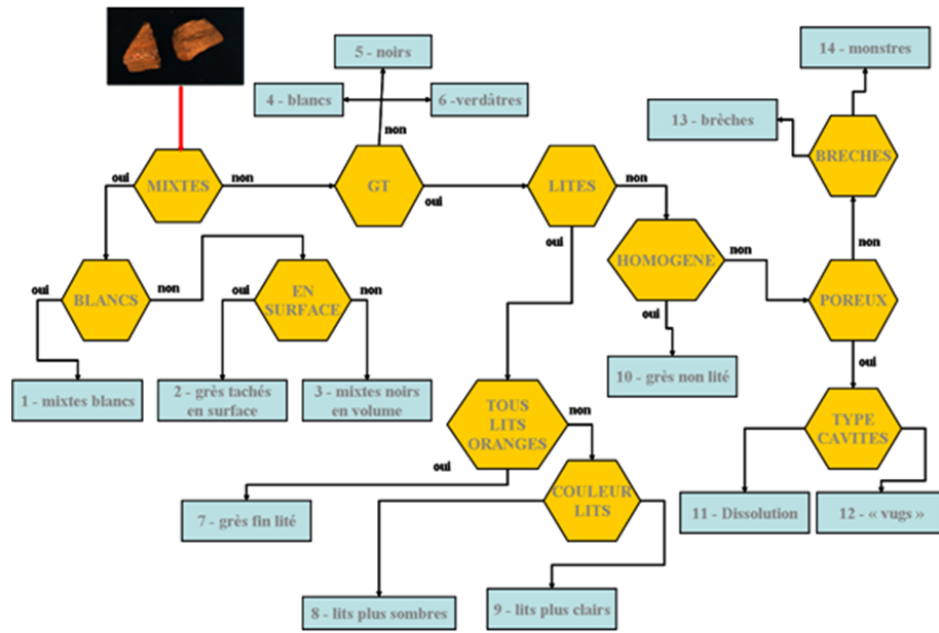


FIGURE 3.13 – Exploitation sélective dans un gisement de pigments naturels vu comme une formule pigmentaire à 14 constituants (voir texte)

une structure plus ou moins cristalline (orientations de chaînes de polymères), à des juxtapositions de domaines de nature différentes (un minéral et un polymère, un minéral et de l'air), mais également à des juxtapositions de domaines anisotropes optiquement que la lumière parcourt selon des orientations différentes de l'ellipsoïde des indices de réfraction. Le nombre d'interfaces franchies dépend de la taille, de la forme et de l'organisation mésostructurale du matériau (Figure 3.14, [173]). La simple juxtaposition sans gradient de domaines d'indices différents provoque une diffusion qui peut être significative même en l'absence de toute porosité, et dont l'expression est donnée par l'équation 3.6. RIT y désigne l'intensité transmise dans la direction "principale" (*in-line direction*), T_{th} l'intensité maximale transmissible théoriquement, r le rayon moyen des domaines, d l'épaisseur totale du matériau et λ la longueur d'onde du rayonnement incident.

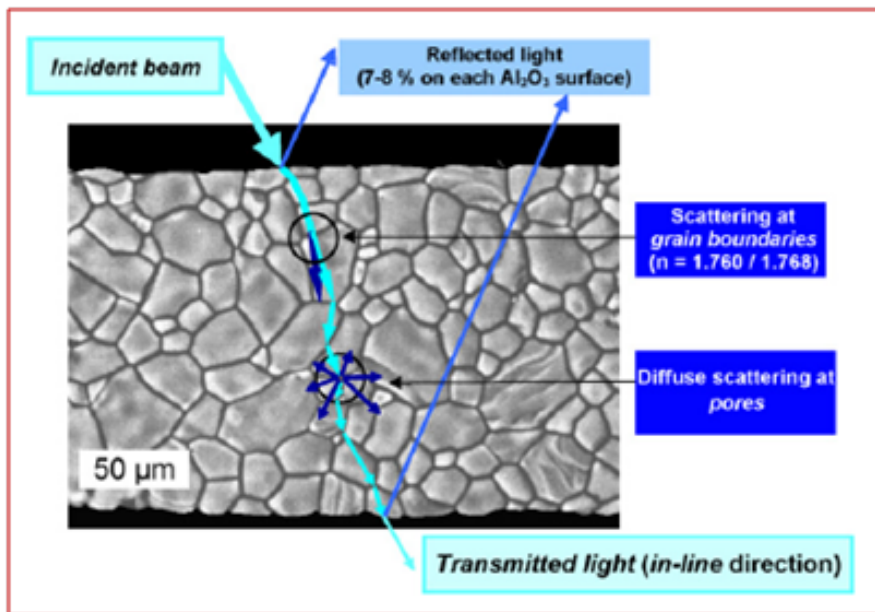


FIGURE 3.14 – Diffusion dans une céramique alumineuse ([173])

$$RIT = T_{th} \exp \left\{ -3\pi^2 \frac{\Delta n^2 r d}{n^2 \lambda^2} \right\} \quad (3.6)$$

$$T_{th} = 2n / (n^2 + 1); \lambda = \lambda_0 / n$$

Psychophysique de la transparence

La psychophysique de la transparence s'est principalement intéressée aux éléments permettant de définir, dans une superposition de deux couches plus ou moins réfléchissantes, quelle est la couche supérieure et quel est son degré de transparence (voir les trois prototypes de la Figure 3.18). Le formalisme associé à cette problématique apparemment éloignée de la notre est néanmoins fertile, car un observateur juge généralement de la transparence en l'absence de toute connaissance sur la structure du matériau, mais au moyen de descripteurs psychophysiques perçus par tous. Comme le montre la Figure 3.15 [183], les critères sont relatifs à l'altération des caractéristiques de l'arrière-plan : atténuation

des contrastes, modification de la palette des couleurs, reflets sur l'objet semi-transparent (le *glare* des anglo-saxons) et perception de la frontière de l'objet. Mais on peut également former un jugement sur une supposée transparence en l'absence d'arrière-plan, par une extrapolation (une représentation...) de la dispersion de la source lumineuse par l'objet (Figure 3.16 [105]). L'approche psychophysique a fait l'objet de nombreux travaux [206, 4, 168] qui tendent à une synthèse entre le formalisme dit des *X-junctions* et un modèle basé sur les luminances (Figure 3.17, [168]).



FIGURE 3.15 – Indices de transparence déduits de l'observation d'un arrière-plan [183]

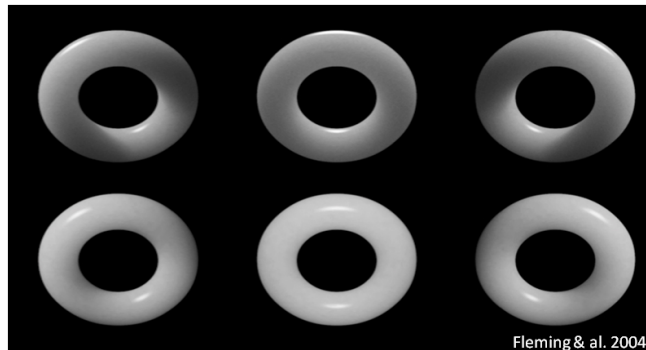


FIGURE 3.16 – Indices de translucidité, déduits de l'observation d'un objet sans arrière-plan [105]

Si on désigne par a, b, p et q les luminances respectives du fond blanc, du fond noir, et de leurs images à travers l'objet étudié, il vient :

$$\begin{aligned} \alpha &= (p - q)/(a - b) \\ t &= (aq - bp)/(a - b) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Les règles de décision associées sont, dans l'expérience initiale :

- si $\alpha = 0$ le disque est opaque
- si $\alpha = 1$ et $t = 0$ le disque est invisible
- $a > b \Rightarrow p > q$
- $a > b \Rightarrow (a - b) \geq (p - q)$

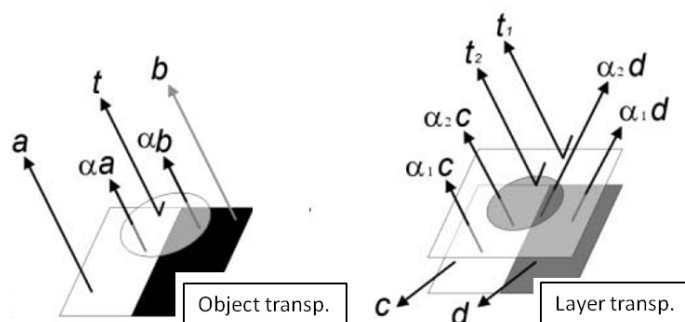


FIGURE 3.17 – Modèle de transparence unifié selon Kitaoka [168]. a, b, c, d : luminances ; $\alpha, \alpha_1, \alpha_2$: transmittances ; t, t_1, t_2 : intensités réfléchies par la surface situé au premier plan

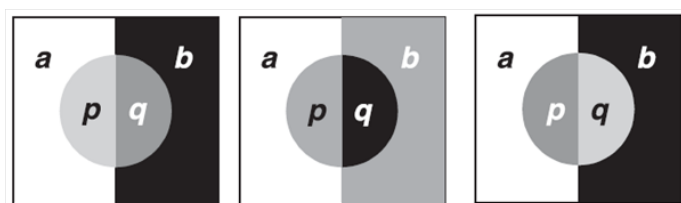


FIGURE 3.18 – Trois perceptions différentes du rapport de position de deux surfaces, en fonction de leurs rapports de luminances. Cette configuration est très aisément réalisée expérimentalement au moyen de cartes de contraste normalisées (voir texte)

$$- a > b \Rightarrow aq \geq bp$$

Nous utilisons donc les quantités α et t comme quantificateurs de la transparence psychophysique. La Figure 3.19 illustre le lien entre les variations d'indice de réfraction et la transparence. Les illustrations de la ligne supérieure correspondent à un examen polarographique d'éprouvettes (pour une éprouvette d'épaisseur constante, les couleurs révèlent les biréfringences locales d'origines diverses : orientations préférentielles, contraintes résiduelles, concentration de particules), celles de la ligne inférieure sont obtenues lors de l'observation d'une carte de contraste par transparence (pour une distance mire-objet fixée) [COL17].

mesure instrumentale

La caractérisation instrumentale de la transparence repose sur des approches diverses selon le domaine d'application. La Figure 3.20 est une représentation gonioradiométrique classique : la totalité de l'énergie transmise par un matériau strictement transparent devrait en ressortir à une position angulaire prévue par les lois de la réfraction. En cas de légère dispersion, un matériau peut néanmoins être encore senti comme transparent, puis la dispersion angulaire augmentant on voit apparaître un attribut de "voile" (*haze*). La surface du pic gaussien des intensités diffusées angulairement représente la quantité d'énergie transmise, et la largeur à mi-hauteur a pour cause principale la diffusion.

L'approche des opticiens (et des photographes) consiste plutôt à mesurer les

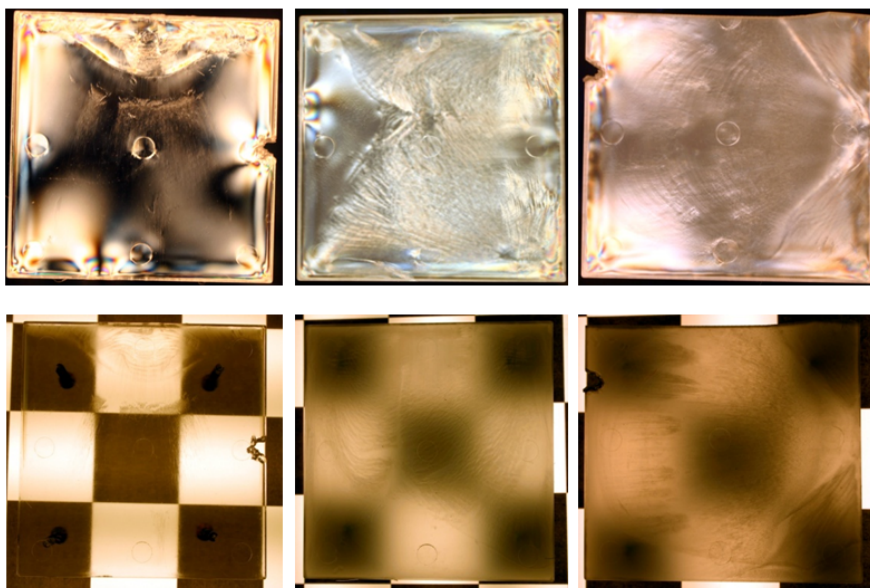


FIGURE 3.19 – Trois éprouvettes vues en polarographie (haut) et en lumière naturelle (en bas). Mire rétro-éclairée, distance mire-objet : 40mm) [COL17]

caractéristiques d'une fonction de transfert de modulation : on étudie les intensités mesurées dans le plan de l'image d'une mire présentant des bandes de contraste donné se succédant à des fréquences variables connues (Figure 3.21). Nous en avons fait un emploi détourné pour caractériser des verres dépolis [PL10].

Il existe enfin en matière industrielle deux approches normatives de la transparence des matériaux : celle de la norme ASTM D1746, qui donne lieu à une famille d'instruments de type *CL* – 100 (Zebedee) et celle des normes ASTM D 1003 et D 1044 mises en œuvre dans les instruments de type *Haze Guard Plus* (BYK-Gardner). Une discussion détaillée des questions posées par la coexistence des deux approches a été présentée par Koo [170].

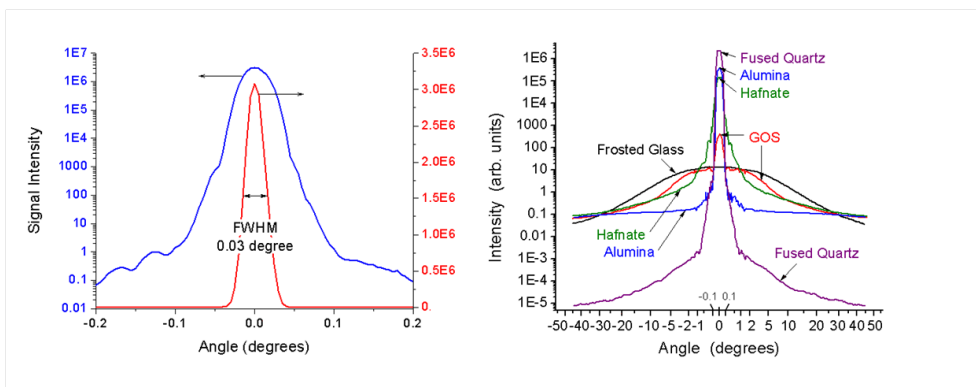
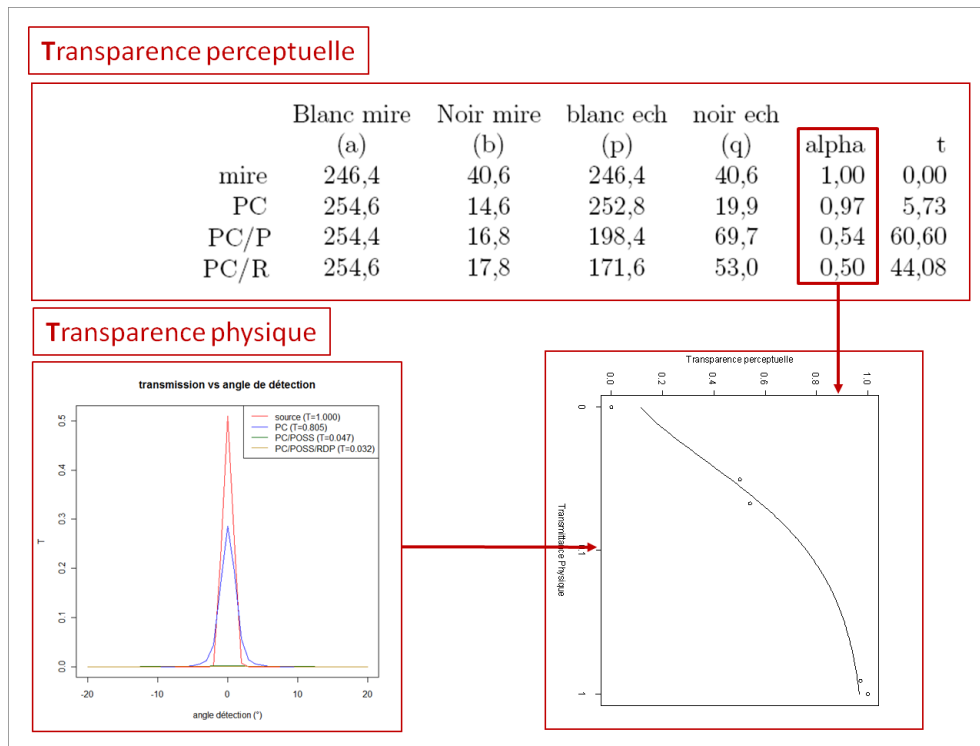


FIGURE 3.20 – Mesures goniométriques en transmission. A gauche, nomenclature (FWHM : largeur à mi-hauteur). A droite, caractérisation de quelques matériaux de référence (illumination perpendiculaire). Les angles en abscisse sont comptés en mode aspéculaire : 0 indique la direction "principale" de sortie



FIGURE 3.21 – Principe de la mesure d’une fonction de transfert de modulation

Enfin, la Figure 3.22 montre la relation entre mesure instrumentale (transmittance) et psychophysique (composante α , dissociée du *glare t*).



ger des stimuli synthétiques issus de modèles physico-réalistes avec des stimuli empiriques mesurés instrumentalement. Un autre élément favorable est le développement de modèles statistiques d'organisation des matériaux hétérogènes, qui permet de s'affranchir d'une description discrète du milieu et de traiter le problème des changements d'échelle. Mais la principale difficulté qui demeure nous semble être l'écart entre les paramètres des modèles et ceux collectés et manipulés en réalité par les ingénieurs.

De plus, un physico-réalisme rigoureux ne s'avère pas forcément nécessaire lorsqu'il s'agit d'expliquer un comportement et d'en prédire le sens d'évolution. Un raisonnement de type qualitatif basé sur la mise en œuvre de modèles moins raffinés s'est plusieurs fois avéré pertinent au cours de nos travaux. Dans ces cas précis il nous a fallu utiliser des outils de comparaison entre stimuli qui soient moins sensibles au comportement local qu'au comportement d'ensemble.

Les outils graphiques présentent généralement cette propriété.

L'exemple colorimétrique

En outre, vu que certains citrons siciliens présentent un camaïeu chromatique strictement identique à celui des canaris portugais, on a la preuve que la méthode chromatico-naturaliste pour la nomenclature des couleurs ne présente aucune garantie scientifique.

Umberto Eco, "Le théorème des 800 couleurs", 1982

Il n'entre pas dans l'objet de ce mémoire de retracer en détail les fondements de la colorimétrie. Les ouvrages de référence abondent, dont il existe pléthore de résumés dans thèses ou mémoires. Rappelons sous forme très synthétique que la colorimétrie exprime dans un référentiel conventionnel, constitué de modèles de sources lumineuses ("illuminants"), de modèles de détecteurs ("observateurs standards"), et de géométries normalisées des attributs caractéristiques de la perception humaine de la couleur ou de l'apparence d'échantillons. La technique colorimétrique s'assigne deux buts principaux qui sont l'échange de données standardisées sur le comportement visuel des matériaux et la prédiction de la couleur résultant de mélanges de composés colorants (dénommée "contretypage" - ce qui suppose l'existence d'une référence à atteindre - ou "formulation").

On peut faire remonter les recherches sur la modélisation du système colorimétrique à la fin du XIX^e siècle avec les travaux de Maxwell, mais c'est à la fin des années 1920 que les expériences d'égalisation de Guild et Wright ont réellement ouvert la porte à une colorimétrie à visée industrielle en donnant naissance à la notion de "systèmes colorimétriques". Depuis, quantité de systèmes ont été inventés, préconisés, améliorés, voire abandonnés également. Tous reposent sur l'existence de composantes trichromatiques spectrales, ce qui se traduit par l'obtention de triplets de valeurs dérivées de mesures d'intensité spectrale : les coordonnées trichromatiques.

Un organisme international, dénommé Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), avait été créé en 1913 à la suite de la Commission Internationale de Photométrie (CIP) afin ". . . d'étudier toutes les questions ayant trait à l'industrie de l'Eclairage et aux Sciences qui s'y rapportent, et d'établir par tous moyens appropriés des ententes internationales sur les questions d'éclairage". La CIE fédère aujourd'hui environ 40 comités nationaux en vue de l'élaboration de normes et méthodes de base en matière de métrologie, ainsi que de directives d'application. Du fait des technologies disponibles, la CIE s'est longtemps cantonnée aux aspects de métrologie instrumentale (photométrie, spectrométrie, radiométrie). Elle ajoute aujourd'hui à ses réflexions les dimensions de la métrologie "non instrumentale", terme choisi pour qualifier les méthodes ayant recours à l'imagerie (désignées par les anglo-saxons sous le terme de *imaging technologies*, la métrologie instrumentale étant désignée comme relevant des *non-imaging technologies*). Dans ce contexte, la CIE distingue les notions de *couleur* et d'*apparence*.

4.1 La notion de Couleur au sens de la CIE

Parce que le terme même de couleur est ambigu, la CIE distingue la *couleur perçue*, "combinaison quelconque d'un élément chromatique et d'un élément achromatique" et la *couleur psychophysique*, "spécification d'un stimulus de couleur par des valeurs définies expérimentalement" [283]. Les systèmes colorimétriques, qui expriment la couleur psychophysique, sont des constructions destinées à permettre de repérer dans des espaces *ad hoc* les positions relatives de stimuli colorés mais également de statuer sur la perceptibilité des écarts. Ils intègrent donc des processus de changement de repère et de transformations graphiques destinés à les rendre le plus uniformes possibles.

Une couleur, mesurée initialement comme la répartition spectrale d'une énergie émise, réfléchiée ou transmise, se positionne dans un espace colorimétrique puis est traduite par un ensemble de grandeurs plus perceptuelles correspondant aux attributs psychophysiques.

Les systèmes colorimétriques ont été conçus à une époque où les matériaux industriels présentaient des couleurs démunies d'effets (ce que les anglo-saxons dénomment *solid colors*). De ce fait ils décrivent la couleur au moyen de seulement 3 attributs qui sont la *teinte* (qui situe la couleur dans l'échelle des catégories de couleur perceptibles), la *saturation* (qui porte une information de pureté : de quelle quantité une couleur s'éloigne-t-elle d'un stimulus achromatique ?) et la *clarté* (qui porte une information énergétique). Sous réserve de transformations adéquates, on peut donc construire des espaces à trois dimensions plus ou moins homogènes dotés d'une définition de distance colorimétrique ΔE entre stimuli. Il existe de nombreuses formules, dont certaines constituent des métriques (formule CIE) ou des quasi-métriques (formule CMC). Pour une discussion des mérites et des inconvénients des principales de ces formules, le lecteur intéressé pourra se reporter aux synthèses de Sève (et en particulier à [283], pages 163-168 de la première édition). Quoi qu'il en soit, l'ordre de grandeur des variations est sans commune mesure avec la logique adoptée pour notre travail, les relations entre produits n'étant pas modifiées fondamentalement lorsqu'on utilise l'une ou l'autre.

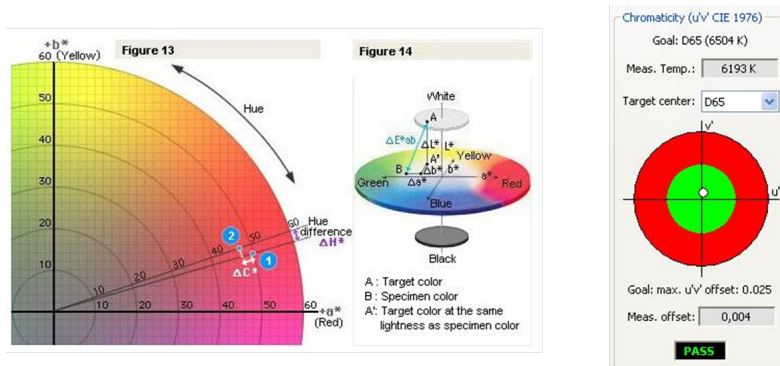


FIGURE 4.1 – Un exemple d'espace colorimétrique : $L^*a^*b^*$ CIE 1976. Les attributs de teinte (H^*), saturation (C^*) et clarté (L^*) se traduisent également dans un système trirectangle à 2 axes de couleurs antagonistes a^* (rouge-vert), b^* (jaune-bleu) et un axe de clarté L^* (blanc-noir). Ce système est conçu pour être euclidien, d'où la possibilité de donner la même signification aux différences calculées entre deux points quelles que soient leurs positions relatives (dans un repère local centré sur l'un d'entre eux – on verra pourquoi au chapitre 7 –).

4.2 La notion d'Apparence Visuelle au sens de la CIE

La notion d'*Apparence visuelle* est plus difficile à définir. Au sens de la CIE elle regroupe une liste d'attributs (Sève [283] préfère parler de "classes d'apparence") dont la *couleur* telle que définie précédemment est un élément.

S'y ajoutent la brillance, la transparence et la texture (en laissant de côté la forme, du fait de notre positionnement dans le domaine des matériaux et non des objets).

A la lecture de cette liste, à laquelle il me semble qu'il manque des aspects temporels (on pourrait parler de permanence ou de fréquence, de pulsation ou de scintillement) et des aspects angulaires (on pourrait parler de chatoyance ou d'iridescence) et peut-être des aspects polarimétriques. On comprend qu'il s'agit d'attributs qui nécessitent :

1. une mise en rapport d'informations perçues. La brillance naît de la comparaison entre intensités provenant de différents points de l'objet, la transparence est jugée en quantifiant l'alteration des caractéristiques d'une scène située derrière l'objet et vue à travers lui, pour les objets très réfléchissants l'observateur peut accommoder sur l'*image* de la source lumineuse (et juger de la qualité de la reproduction de cette image comme pour la transparence) *OU* accommoder sur *la surface* de l'objet (et percevoir des caractéristiques texturales de l'image comme la "peau d'orange")
2. une perception immédiate ou holistique
3. un recours à des fonctions cognitives pour l'interprétation

Ceci nous ramène donc à notre questionnement sur les espaces conceptuels, d'autant qu'on pourrait raffiner la liste des attributs à l'infini (l'observation experte des matériaux permet la subdivision de certains éléments de la liste). Ainsi le *brillant* est un attribut complexe qui donne lieu à de nombreuses expressions : brillant spéculaire, brillant de contraste, voile, lustre, netteté d'image. . .

4.3 Les tendances actuelles de l'instrumentation

Sous l'impulsion de nouvelles matières premières ou de nouveaux matériaux, la pratique colorimétrique se trouve confrontée à des effets pour la caractérisation desquels elle n'a pas été conçue. La géométrie classique utilisée en caractérisation et formulation des peintures par exemple, dite "diffus-8°" (illumination diffuse par une sphère d'intégration et observation sous un angle unique permettant de retenir ou non une information relative à la réflexion spéculaire) est peu informative, voire trompeuse, pour la caractérisation de peintures à effets (contenant des pigments interférents ou métalliques).

Les principaux effets actuellement disponibles appartenant à la famille des effets goniométriques (en anglais *gonioapparent color appearance*, interférence et diffraction) le recours à des goniospectrocolorimètres devient plus courant dans l'industrie. Ces instruments permettent de disposer librement une source lumineuse plus ou moins collimatée et un détecteur relié à un spectrophotomètre en deux angles quelconques d'un même plan dit d'illumination contenant dans ce cas les trois vecteurs $(\vec{\omega}_i, \vec{n}, \vec{\omega}_r)$. La diffusion de ce type de matériel se reflète dans la normalisation : ASTM E 2194-03 et DIN 6175-2 pour la mesure des matériaux contenant des pigments métalliques ; ASTM E 2539-08 pour la mesure de pigments interférentiels ; SAE J1545 pour les enduits, les textiles. . . et de nombreuses publications rendent compte de la bataille qui se livre pour la spécification d'une géométrie optimale.

Ces appareils, dont certains permettent également une mesure de l'état de

polarisation de la lumière ne sont pas tous basés sur un spectrophotomètre classique, et certains utilisent des dispositifs d'imagerie [202, 165, 318]. On peut ensuite mentionner des dispositifs "multiangles fixes" dans lesquels un spectrophotomètre est relié à un ensemble de détecteurs statiques disposés dans le plan d'illumination (parmi lesquels BYK Garner BykMac, GretabMacbeth ColorEye-640, robot CARFLASH d'Optronik, prototype ColorDimensions [COL13], et les plus anciens X-Rite MA68-II, Minolta CM-512m3...). Enfin, certains instruments sont intermédiaires entre ces dispositifs multiangles et les instruments de mesure de la fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle : par exemple les instruments dotés d'optiques de Fourier permettant de détecter tous les rayons réfléchis en une seule mesure sur tout l'hémisphère pour une position de source (voir par exemple les instruments conçus par ELDIM [26]).

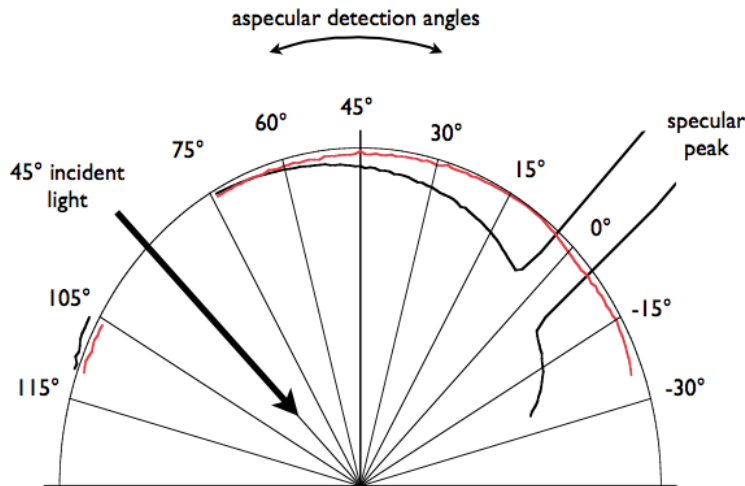


FIGURE 4.2 – Géométrie et nomenclature des angles pour une mesure goniospectrométrique [318]

4.4 Les représentations associées

L'apparition des goniospectrophotomètres et goniospectrocolorimètres ouvre la porte à la collecte d'un nombre potentiellement infini de géométries (ω_i, ω_r) , et a donné lieu à l'invention de nouveaux outils de description, qui n'ont pas encore été validés en tant qu'attributs : le chemin chromatique, la texture de clarté, le scintillement. Ceci a généré une littérature abondante d'une part sur la pertinence psychophysique des angles, d'autre part sur le mode de représentation des données.

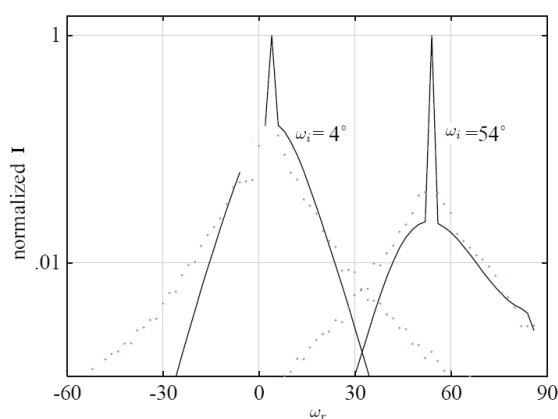
représentations graphiques

Dès les approches les plus triviales, on se heurte au problème du nombre de dimensions à représenter. Ce qui était naturel pour les géométries fixes (par exemple un diagramme $R = f(\lambda)$) ne fonctionne plus si l'on représente

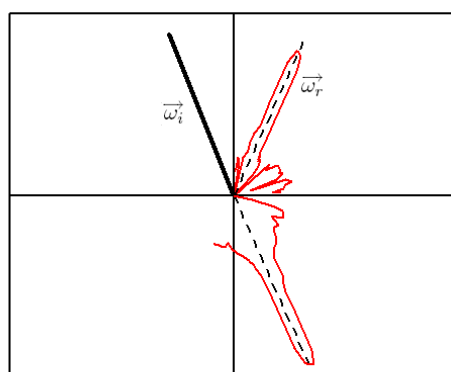
les angles de détection en abscisse. Il reste néanmoins facile de représenter en fonction des angles une donnée énergétique non spectrale (Albedo, intensité totale... normalisée ou non), ou une donnée échantillonnée à une longueur d'onde (Figure 4.3a).

Les approches tridimensionnelles (en portant la longueur d'onde sur un axe perpendiculaire aux deux premiers) se heurtent à deux difficultés graphiques majeures qui sont le masquage des spectres les uns par les autres et l'interprétation de la perspective.

On améliore grandement la compréhension des graphiques en adoptant une représentation angulaire plutôt que rectangulaire. L'adoption d'une échelle logarithmique améliore quant à elle les performances en matière de comparaison de signaux dans le cas de matériaux très spéculaires (Figure 4.3b).



(a) une représentation rectangulaire de $I = f(\omega_i, \omega_r)$



(b) une représentation angulaire, logarithmique, d'une indicatrice des intensités

FIGURE 4.3 – Deux types de graphiques de base en goniospectrométrie

représentations cartographiques

Les difficultés liées aux graphiques traditionnels ont généré des représentations dénommées "chemins chromatiques" dans lesquelles l'information spectrale est abandonnée au profit de la seule information colorimétrique (triplets). Elles sont lues comme des "cartes chromatiques" montrant l'évolution de la

couleur en fonction des angles. Elles présentent en théorie de nombreux avantages :

- elles peuvent permettre la représentation simultanée de plusieurs échantillons
- elles peuvent permettre de représenter plusieurs logiques de variation des couples sources-détecteurs
- il n'y a théoriquement pas de limite au nombre de couples représentés

La situation n'est pas pour autant aussi simple en pratique, comme le montrent les Figures 4.4, 4.5 et 4.6. Les instruments multiangles statiques testés par Cramer en 2001 [58] ne s'accordaient pas sur une géométrie : la Figure 4.4 superpose les réponses et met en évidence leur variabilité en fonction du dispositif adopté. La représentation de trop nombreux produits sur un même diagramme rend le message confus, même s'il permet de décrire le phénomène mis en évidence (Figure 4.5 [57]). Inversement ne retenir que quelques points focalise l'attention de l'utilisateur mais fait perdre la notion de chemin, c'est à dire l'information sur le comportement dynamique du produit (Figure 4.6). Par ailleurs, le plan de chromaticité ne comporte par définition pas d'information de clarté. Or à proximité de l'angle de réflexion spéculaire cette donnée devient primordiale et la notion de teinte n'a plus grand sens. Le choix d'une représentation sur fond coloré selon le plan de chromaticité (comme dans la Figure 3.8) est à écarter pour cette même raison.

Nous avons proposé (Figure 4.7) une représentation du chemin chromatique dans laquelle les informations de chromaticité et de clarté sont rendues par la couleur de chaque point, et où les lignes d'interférence et 45°-aspéculaire au sens de [57] sont figurées par deux traits continus de deux niveaux de gris différents. Cette représentation allie information quantitative (trajectoires) et information qualitative (couleur perçue).

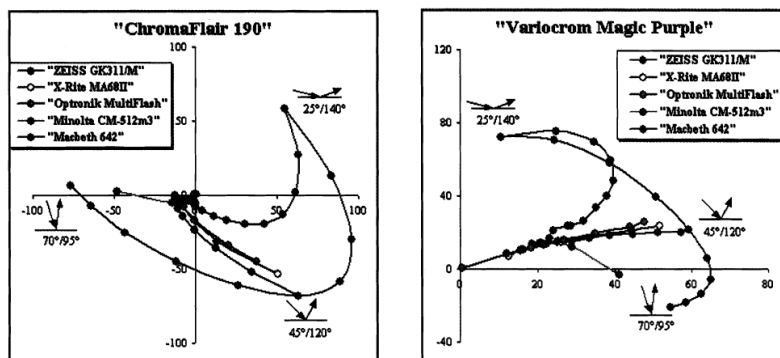


FIGURE 4.4 – Chemins chromatiques de 2 échantillons vus par 5 instruments [58]

4.5 Catégories, prototypes et couleur : la WCS

Un aspect moins connu (du moins dans le domaine des matériaux...) des travaux sur la couleur est l'approche ethnographique de la *World Color Survey* (WCS) qui questionne l'existence de concepts *naturels* de couleur (innés, donc supposés d'origine physiologique) et l'existence de prototypes (collections construites, donc acquises, donc culturelles). Cette démarche s'appuie sur une

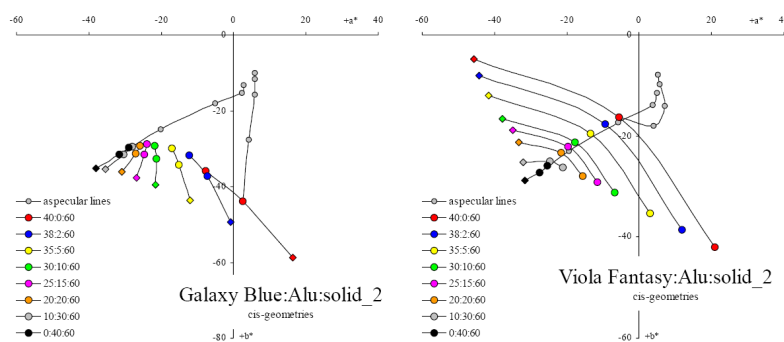


FIGURE 4.5 – Chemins chromatiques de 2 gammes de mélanges ternaires [57]

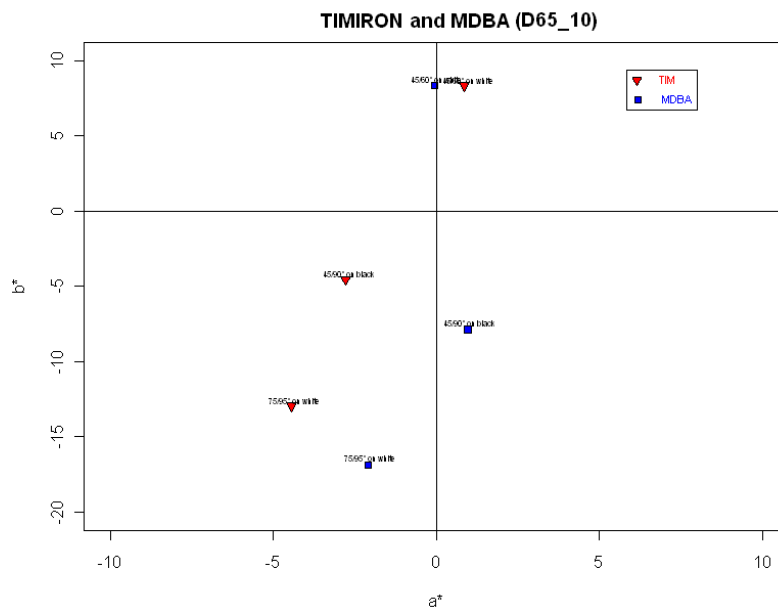


FIGURE 4.6 – Caractérisation chromatique minimale (une des représentations adoptées en R&D dans l'industrie)

colossale collecte de données entreprise à partir de la fin des années 70 suite aux travaux de Berlin et Kay [20] sur l'universalité des processus de construction des catégories de couleur.

Les données portent actuellement sur 110 langues orales. Pour chacune d'elles 24 locuteurs dont c'est la langue maternelle ont accompli 2 tâches :

1. nommer des couleurs représentées par 330 vignettes du nuancier de Munsell (présentées dans un ordre immuable)
2. choisir dans un sous-ensemble de vignettes Munsell les meilleurs exemplaires correspondant aux termes principaux cités lors de la tâche 1

Les données qui en résultent sont à la disposition de tout chercheur [53] et constituent un extraordinaire champ d'investigation tant statistique que sémantique [161, 162, 160, 163, 187, 247, 246]. Pour notre travail, la WCS et les études qui en découlent présentent plusieurs intérêts :

1. utilisation d'une métaphore cartographique : les 330 vignettes de Munsell disposées dans un ordre fixé constituent une grille de référence sur

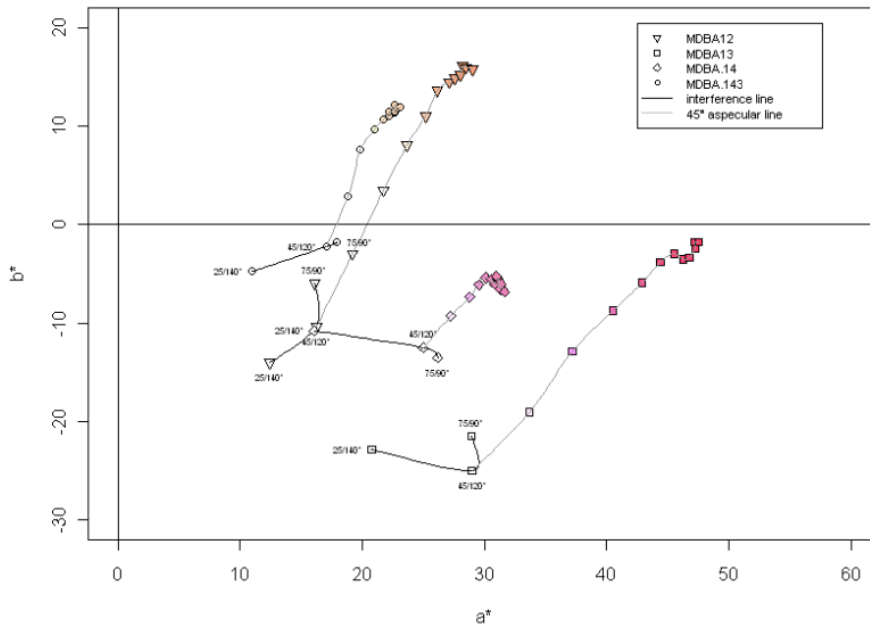


FIGURE 4.7 – Chemin chromatique de 4 produits cosmétiques, selon ce travail

laquelle peuvent être reportés termes, fréquences ou autres grandeurs d'intérêt (Figure 4.8). De fait, de nombreuses publications s'intéressent aux clusters apparaissant sur ces cartes, aux caractéristiques des frontières, et à la notion de similarité entre termes.

2. recours aux notions de catégorie et de prototype : Globalement, les travaux initiaux de Berlin et Kay (sur une vingtaine de langages en 1969) ont montré l'existence de catégories (concepts) de couleur sur les frontières desquelles les locuteurs ne s'accordent pas mais sur les prototypes desquelles ils sont d'accord, tant pour un langage unique qu'entre langages. De nombreux langages non écrits sont structurés autour de 5 prototypes [193] et ces prototypes semblent être choisis comme étant "le plus éloigné possible" les uns des autres ou "les plus différents des couleurs des autres catégories qu'aucune autre couleur de leur propre catégorie" [85] (cette notion d'éloignement est forcément relative à la structure même de la "carte-support" choisie, ce qui est souvent opposé aux travaux basés sur la WCS). De ce fait des langues parlées en des lieux très éloignés présentent des parentés cartographiques, comme l'ont montré Kay et al. [163] en comparant 9 langues (figure 4.9) : le Berinmo et l'Iwam (Papouasie Nouvelle-Guinée), le Berik et le Bauzi (Indonésie), le Paya et le Jicaque (Honduras), le Sirionó (Bolivie), le Colorado (Equateur) et le Yaminahua (Pérou).
3. recherche du "meilleur exemplaire" à associer à un terme donné. Pour nous cet exemplaire ne revêt pas d'intérêt en lui-même mais peut révéler une représentation mentale ou une spécificité culturelle particulières. La figure 4.10 réalisée à partir des données de [53] montre les associations au mot "café" pour plusieurs langues du Mexique : la couleur du grain mûr est associée au terme, à côté du brun qu'y associent les occidentaux.

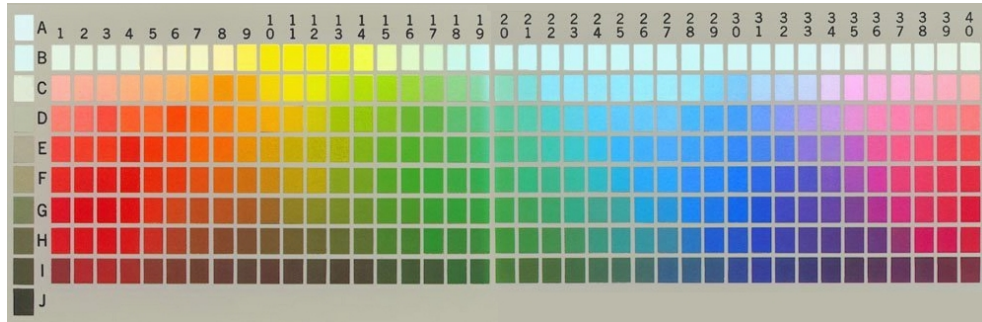


FIGURE 4.8 – La grille Munsell utilisée pour la récolte des données de la *World Color Survey*

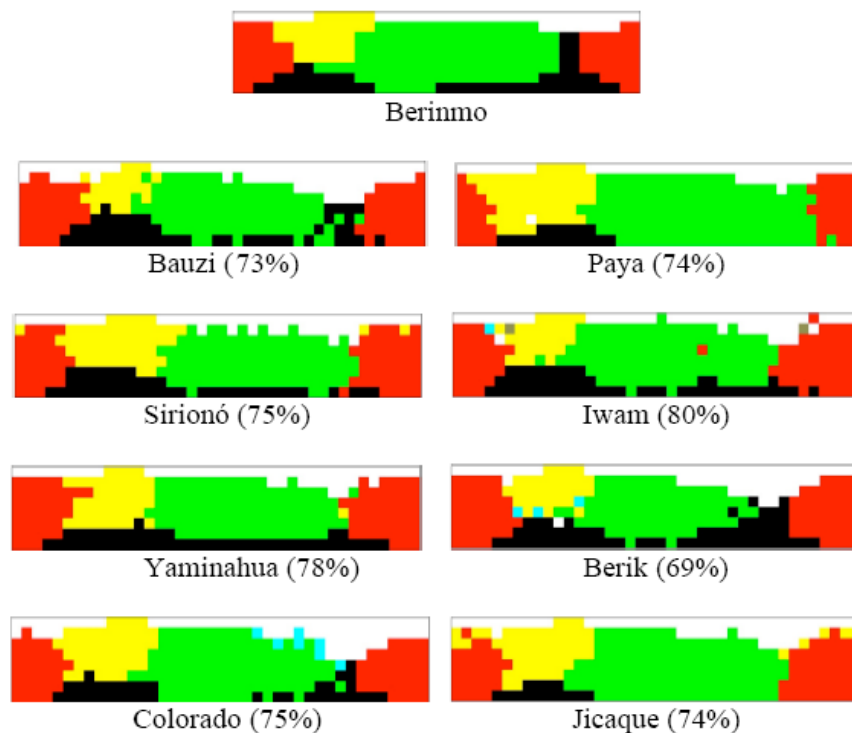


FIGURE 4.9 – Les catégories déterminées par la WCS dans 9 langues parlées en Indonésie, Papouasie et Amérique du Sud [163]. Entre parenthèse, la similarité calculée par les auteurs entre le tracé des limites de catégories et celles du Berinmo.

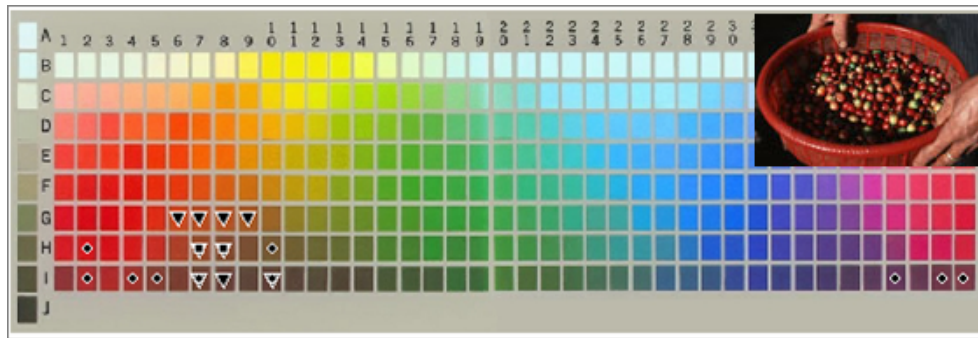


FIGURE 4.10 – Meilleurs exemplaires pour le mot "café" en Huave, Tlapanec et Zapotec (Mexique). En cartouche, grains mûrs récoltés.

Malgré des formes très différentes, on peut établir un parallèle entre l'approche de la WCS et le formalisme des espaces conceptuels de Gärdenfors. Ce dernier relie les catégories de Berlin et Kay à ce qu'il appelle des "propriétés naturelles" et qu'il définit comme des régions convexes d'un domaine à l'intérieur d'un espace conceptuel. Prenant l'exemple des travaux de Sivik et Taft [273] sur la dénomination des couleurs en suédois, polonais, espagnol et anglais, il développe la thèse selon laquelle "la plupart des propriétés s'exprimant au moyen d'un vocabulaire simple en langage courant peuvent être décrites comme des propriétés naturelles" selon le critère de convexité.

4.6 Conclusion

L'approche colorimétrique fait aujourd'hui tellement partie de la culture des grandes entreprises de la "filiale industrielle de l'aspect" qu'on en oublie souvent les prérequis au profit de l'application automatique d'un système accepté par chaque profession. L'ajustement perpétuel de ces systèmes pour en améliorer l'uniformité donne lieu à une littérature considérable, mais sans que des changements radicaux en résultent en matière de classement de stimuli. Même si nous-même pratiquons ce type de colorimétrie, le point que nous préférons retenir dans le cadre de ce travail est qu'un espace colorimétrique peut être considéré comme une carte au sens que nous lui donnerons au chapitre 7. Si le positionnement de plusieurs stimuli éventuellement complexes (structurés spatialement ou temporellement) sur cette carte résulte de la mesure physique de ratios énergétiques, la topologie de l'espace veut traduire une organisation perceptuelle (opposition vert-rouge, bleu-jaune, opposition couleur-contraste, sensibilité photométrique, différences juste perceptibles. . .) qui à la fois reflète et oriente nos modes de catégorisation. De plus une information cognitive est plaquée sur cet espace *via* la dénomination des couleurs qui montre à la fois des invariants trans-culturels et des spécificités. Vouloir cartographier des propriétés sensorielles complexes, c'est en quelque sorte tenter de reproduire cette logique colorimétrique dans d'autres secteurs de l'espace conceptuel associé à nos matériaux.

Les fonctions en synthèse d'image

Lorsque l'humain virtuel nous fait face, son visage aussi inexpressif que parfait nous en dit long sur le travail qu'il est encore possible d'accomplir en rendu de la peau, de la structure cellulaire aux rides, de la dispersion subsurfacique aux BTF.

Vincent Vivanloc, Mathias Paulin et Jean-Pierre Jessel, 2004

La synthèse d'image, largement répandue aujourd'hui dans des activités de R&D (Conception, Design) mais également dans des domaines plus proches du grand public (jeux vidéo, cinéma), utilise des "objets" particuliers pour représenter virtuellement l'aspect visuel des matériaux. Ces objets, désignés par leurs acronymes (BRDF, BSSRDF, SVBRDF, BTF...) sont eux-mêmes un champ de recherche très actif : quel est celui qui conduit au plus grand réalisme, quel est celui qui consomme le moins de moyens informatiques (temps de calcul et espace de stockage), quel est celui qui est le plus simple à obtenir à partir des matériaux ou à synthétiser *ex nihilo*... ?

Parce que les données nécessaires à l'expression de ces fonctions sont acquises sur des matériaux, on voit se multiplier les instruments de mesure : goniospectromètres et gonioradiomètres variés, bancs de capture d'images calibrées... dont la technicité, le coût d'opération et les difficultés d'utilisation sont symptomatiques de la "course aux armements" que connaissent tous les secteurs des sciences et techniques ayant recours à l'imagerie.

Par ailleurs, la relation déjà signalée entre aspect de surface et brillance trouve dans les fonctions qui seront décrites ci-après une expression satisfaisante [218, 201, 188, 135, 185, 268]. L'ingénierie d'aspect des matériaux pourrait-elle (et à terme devra-t-elle) s'appuyer sur les résultats fournis par ce type d'instruments pour décrire et concevoir des matériaux dont les effets, de plus en plus complexes, comportent plusieurs composantes directionnelles ?

Pour répondre à la question, il convient de rappeler comment ces outils sont définis, puis et de s'interroger sur leur adéquation à la démarche d'ingénierie.

5.1 Fondements

La synthèse d'image est également dénommée rendu réaliste, ce qui met en avant la volonté de rendre fidèlement compte de l'aspect d'objets qui sont des matériaux mis en forme. Les algorithmes de rendu traitent des données d'intensité, qui correspondent en fait à des radiances, puissances réémises sous un angle donné par unité d'aire projetée A et par angle solide ω :

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA \cdot d\omega \cdot \cos\theta} \quad (5.1)$$

On doit distinguer pour toute surface projetée la radiance incidente $L_i(x \leftarrow \omega')$ et la radiance sortante $L_o(x \rightarrow \omega)$. Entre les deux, le domaine des interactions lumière-objet dues aux propriétés de la matière, à celles de la surface et à celles de la forme. L'enchassement des échelles de structuration se reflète dans la succession d'outils destinés à en rendre compte (Figure 5.1).

L'équation du rendu

Si on omet le paramètre *temps*, l'équation du rendu s'écrit dans sa forme générale :

$$L_o(\mathbf{x}, \omega, \lambda) = L_e(\mathbf{x}, \omega, \lambda) + \int_{\Omega_x} L_i(\mathbf{x}, \omega', \lambda) f_r(\mathbf{x}, \omega', \lambda) (\vec{\omega}' \cdot \vec{n}) d\omega' \quad (5.2)$$

dans laquelle λ est la longueur d'onde, \mathbf{x} un "point" de la surface observée, ω l'angle d'observation, et ω' un angle d'incidence. Les termes en L sont des

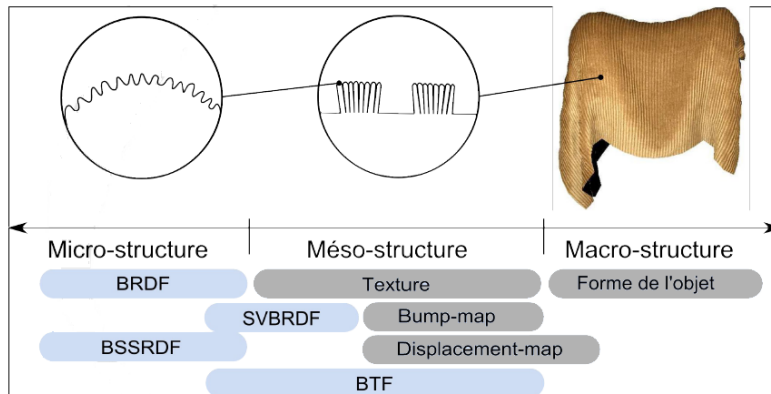


FIGURE 5.1 – Echelles de structuration et fonctions pour le rendu. Les fonctions sur fond grisé ne sont pas décrites dans ce travail

radiances spectrales. L'intégrale $\int_{\Omega_x} \dots d\omega'$ somme toutes les illuminations incidentes $L_i(\mathbf{x}, \omega', \lambda)$ sur l'hémisphère Ω_x centré en \mathbf{x} .

Le membre de gauche de l'équation 5.2 représente donc la quantité totale de lumière d'une longueur d'onde donnée renvoyée vers le "détecteur" et le terme de droite $L_e(\dots)$ désigne la lumière émise par l'objet. Dans l'intégrale, le produit scalaire $\vec{\omega}' \cdot \vec{n}$ est destiné à prendre en compte le rôle de l'orientation de la surface.

Dans l'expression originale de l'équation de rendu, f_r est la fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle (BRDF). Elle représente la proportion de lumière renvoyée par réflexion de ω' vers ω . Il existe, en réalité, un grand nombre de fonctions f , selon les grandeurs mesurées (radiance, réflectance...), le nombre de dimensions prises en compte (ponctuelles, spatiales,...) et les phénomènes physiques pris en compte (réflexion, diffusion..., séparément ou simultanément).

5.2 la famille des fonctions à " $\lambda + 4$ dimensions"

La famille des fonctions à " $\lambda + 4$ dimensions" (dites BxDF) ne prend pas en compte la variabilité spatiale des surfaces illuminées : ces surfaces sont donc considérées comme optiquement unies. Le terme \mathbf{x} disparaît donc de l'équation de rendu, et 4 dimensions suffisent à rendre compte de la géométrie (Figure 5.2) : deux angles pour l'angle d'incidence (θ_i, Φ_i) et deux pour l'angle d'observation (θ_r, Φ_r) .

fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle (BRDF)

Cette fonction représente le rapport d'une radiance sortante dans la direction ω avec une irradiance incidente selon ω' :

$$f_r(\omega, \omega') = \frac{dL_o(\omega)}{dE(\omega')} = \frac{dL_o(\omega)}{L_i(\omega') \cos \theta_i d\omega'} \quad (5.3)$$

Dans la pratique, l'expression sous forme de réflectances *stricto sensu* nécessite une "normalisation" au signal collecté pour un matériau de référence (par exemple un "verre de Carrare", verre noir d'indice de réfraction connu).

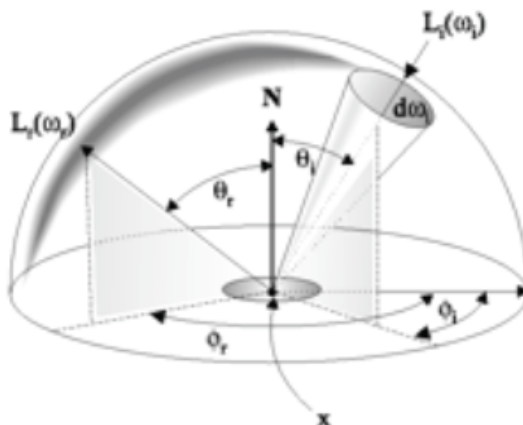


FIGURE 5.2 – Fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle : nomenclature

Dans le cas de la BRDF le point d'incidence et le point d'émergence du rayon détecté sont considérés comme confondus. Mais la notion de ponctualité n'a pas grand sens dans le cas d'une illumination par une source lumineuse réelle, par nature non ponctuelle. Dans le cas de la réflexion sur une surface parfaitement lisse, la dimension de la surface illuminée n'est pas une grandeur pertinente, et il existe une relation directe entre les valeurs de la BRDF et les équations de Fresnel décrivant la réflexion. Les propriétés géométriques des surfaces non lisses structurent la BRDF différemment en fonction de l'aire éclairée : à l'échelle microscopique chaque "facette" de la surface obéit aux seules lois de la réflexion spéculaire de Fresnel, mais au fur et à mesure de l'élargissement de la zone de mesure le nombre de facettes prises en compte s'accroît et la BRDF se complexifie. Elle apparaît alors comme une combinaison de lobes : lobe uniforme lié à la diffusion interne par le volume de l'échantillon, lobe directionnel lié à la dispersion par la topographie de la surface, lobe spéculaire. Dans tous les cas la BRDF, et elle seule, est considérée comme dotée de deux propriétés caractéristiques :

- elle vérifie la *réciprocité d'Helmholtz* : elle est invariante par permutation des directions d'incidence et d'observation : $f_r(\omega', \omega) = f_r(\omega, \omega')$
- elle est conforme au principe de conservation de l'énergie, donc la valeur de l'intégrale hémisphérique ne peut excéder 1

Quelques autres membres de la famille des BxDF

La même approche peut être faite pour les quantités d'énergie transmises par l'échantillon (on parle alors de fonction de distribution de transmittance bidirectionnelle, BTDF), pour les différentes composantes polarisées contribuant à l'intensité totale (fonction de distribution de réflectance polarisée bidirectionnelle, *polarimetric BRDF*)... En sommant BRDF et BTDF on obtient une fonction dite fonction de distribution de la *dispersion* bidirectionnelle (BSDF)

[70] à ne pas confondre avec une fonction de *diffusion* au sens physique.

La fonction de distribution de la réflectance par diffusion surfacique (BSSRDF) prend en compte la diffusion de la lumière par le volume de l'échantillon en modifiant l'équation du rendu pour tenir compte des rayons ayant touché la surface éclairée A en des points \mathbf{x}_i différents et s'étant propagés dans le volume pour tous émerger en \mathbf{x} (figure 5.3). L'équation devient, en faisant abstraction du terme L_e :

$$L_o(\omega, \lambda) = \int_A \int_{2\pi} L_i(\mathbf{x}_i, \omega', \lambda) S(\mathbf{x}_i, \omega'; \mathbf{x}, \omega; \lambda) (\vec{\omega}' \cdot \vec{n}) d\omega' dA(\mathbf{x}_i) \quad (5.4)$$

où S désigne la BSSRDF remplaçant f_r . Pour exprimer ce terme, on a recours à une approximation des lois de la diffusion de la lumière dite "méthode du dipôle" dans laquelle on remplace le rayonnement incident par deux sources fictives disposées de part et d'autre de la surface et satisfaisant les conditions aux limites. On obtient ainsi une expression de la réflexion diffuse utilisée pour exprimer la contribution de la diffusion multiple, et enfin l'équation de la BSSRDF par sommation des diverses contributions (voir en particulier [147]). La Figure 5.4 illustre visuellement l'amélioration de la description des phénomènes lorsque l'on passe d'une BRDF à une BSSRDF. Mais dans des domaines comme la cosmétique, où l'on recherche une très grande qualité de la représentation des propriétés optiques de la peau, les modèles de BSSRDF n'offrent pas encore un aspect jugé réaliste.

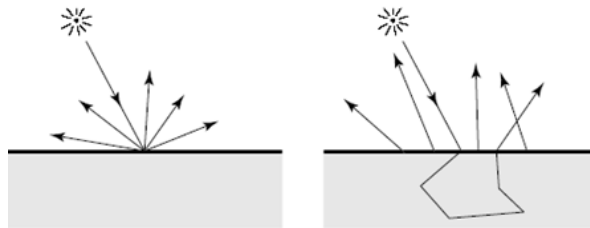


FIGURE 5.3 – BRDF (à gauche) et BSSRDF (à droite)



FIGURE 5.4 – Rendu d'un buste en marbre, au moyen d'une BRDF (à gauche) et d'une BSSRDF (à droite)[119]

5.3 la famille des fonctions à " $\lambda + 6$ dimensions"

Le passage à 6 dimensions découle de la prise en compte des coordonnées des points \boldsymbol{x} de la surface. Cette famille de modèles se compose donc de fonctions qui varient en tout point de la surface (une BRDF, et même plutôt une BSSRDF en tout point \boldsymbol{x} échantillonné)... Le prototype de ces fonctions est dénommé fonction de texture bidirectionnelle (BTF). Le lecteur intéressé par une synthèse pourra se reporter à [104].

Etant donnée la complexité du phénomène à décrire, il n'existe pas d'expression "mathématique" de cette fonction qui est approchée exclusivement de manière empirique. Deux courants principaux se dégagent :

1. le déplacement d'un instrument destiné à produire des BxDF selon un semis de points à la surface des échantillons, avec deux variantes : à un niveau d'échantillonnage (grille régulière) ou deux niveaux (grille lâche de grilles fines [172]). On obtient une fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle variable spatialement, ou BSVRDF
2. l'acquisition de collections d'images constituant une BTF

La première méthode n'appelle pas de commentaires particuliers, si ce n'est que la deuxième variante est justifiée par les auteurs qui la préconisent par des arguments sur la continuité des fonctions. La seconde méthode est la plus répandue. Elle donne lieu à la constitution de bases de données de textures telles la base CURet99 [63] ou la base de l'université de Bonn [28]. Les images constituant ces bases peuvent être structurées de deux manières différentes : soit chaque image représente l'objet ($n \times m$ pixels) sous une géométrie de prise de vue, soit chaque image représente 1 seul pixel sous l'ensemble des géométries de prise de vue. Dans ce cas, des violations des propriétés caractéristiques des BRDF (réciprocité et conservation de l'énergie) peuvent être constatées. La seconde difficulté liée aux BTF provient de la nécessité de compresser fortement les données ou d'avoir recours à des modèles pour conserver des volumes de stockage "raisonnables".

5.4 Gestion du volume des données

La mesure colorimétrique classique requiert le stockage d'une valeur spectrale ou d'un triplet colorimétrique. Le "poids" numérique du stockage, même au format texte, n'excède pas quelques kilo-octets (Ko). Toujours au format texte, une série de mesures goniométriques pour le tracé d'un chemin chromatique (figure 4.7) atteint tout juste 300 Ko bien qu'elle comprenne les mesures de l'échantillon et celles d'un réflecteur de référence. Lorsqu'on passe aux fonctions utilisées en infographie l'ordre de grandeur change brusquement, et il n'est plus question de stockage au format texte... : même stockée sous forme binaire une BRDF non spatialisée représente une trentaine de méga-octets (Mo). Le passage aux BTF fait franchir un ordre de grandeur supplémentaire : les échantillons standards de la base de données de l'Université de Bonn, qui fait référence, sont constitués de 6561 images de dimensions 256x256 pixels représentant 81 angles d'observation et 81 angles d'illumination. Ils "pèsent" chacun 320 Mo, et leurs équivalents haute définition, stockés dans le format propriétaire du logiciel Radiance, occupent chacun entre 1.5 et 5 giga-octets (Go) (Figure 5.5).

L'échange, le stockage et le traitement de tels volumes de données n'est guère viable en pratique. Deux démarches sont possibles pour réduire l'information : la compression et la modélisation, et ce tant pour les BxDF que pour les BTF. Les deux approches ne peuvent être entreprises sans perte d'information.

Les méthodes de compression incluent des méthodes par ondelettes [49], des décompositions en valeurs singulières, des approximations polynomiales [195], des analyses en composantes principales [172], ou des procédures d'échantillonnage. Les modélisations reposent sur diverses approches :

- stocker les paramètres associés à des approches "phénoménologiques" des BxDF (les modèles portant les noms de leurs inventeurs abondent : Phong [237], Cook-Torrance [54], He-Torrance-Sillion-Greenberg [130], Ward [312], Lafortune [177]...)
- stocker les paramètres de modèles probabilistes de texture [122, 123]

Dans une étude récente Filip et Haindl [104] procèdent à des tests psychophysiques au cours desquels ils présentent des images réalisées au moyen de 8 modèles de BTF comparées non pas à des prises de vues réelles mais au rendu de synthèse obtenu avec des BTF complètes. Ils montrent qu'aucun modèle de réduction des données n'est assez performant pour conserver l'ensemble des attributs psychophysiques des stimuli présentés, et qu'ils sont en quelque sorte "spécialisés".

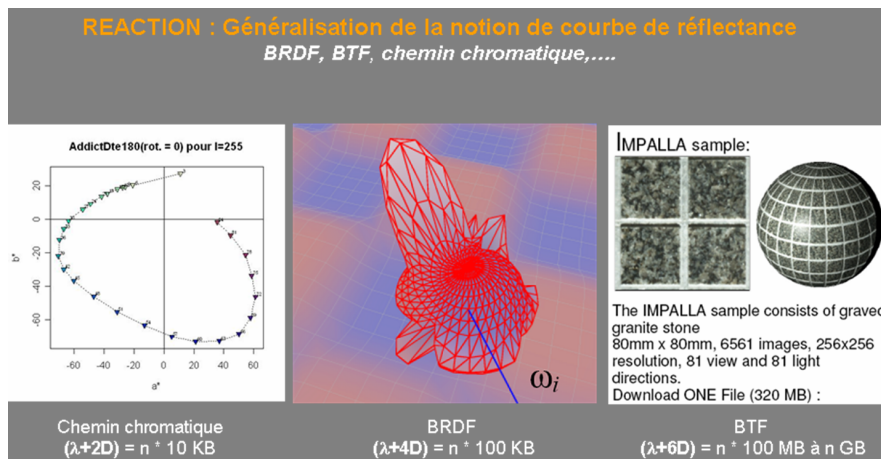


FIGURE 5.5 – Evolution du "poids" de stockage des données (voir texte)

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons intentionnellement examiné les concepts qui véhiculent des données d'aspect sans référence à la "qualité des images" obtenues. Comme le signalait la citation placée en exergue de ce chapitre, il y a en effet encore du chemin à faire pour générer des images statiques ne se distinguant pas de photographies réelles des mêmes scènes. Non pas qu'il n'existe pas d'images de synthèse ayant une qualité photographique, mais celles-ci sont obtenues en "bruyant" les images trop parfaites fournies par les outils de rendu.

De ce survol des outils de l'infographie en rapport avec l'aspect, il ressort que :

1. les données recueillies sont essentiellement destinées à la production d'images.
2. Lorsqu'elles sont utilisées en ingénierie (CAO) l'hypothèse est faite que le rendu *est* réaliste, mais on ne trouve guère de traces bibliographiques de travaux sur l'évaluation psychophysique de ce rendu
3. les instruments permettant l'acquisition des données sont difficiles à mettre en œuvre. Ils délivrent des données auxquelles le monde industriel des matériaux est peu accoutumé, et ne faisant pas l'objet d'une normalisation
4. Les logiciels associés aux instruments d'acquisition commerciaux représentent les données mais ne proposent que peu ou pas d'outils de traitements
5. les données réelles sont trop massives pour être exploitées en ingénierie d'aspect. Trop de données tuent l'information. . .
6. le passage par des compressions (pour diminuer les volumes stockés) ou des échantillonnages fait fatalement perdre de l'information
7. pour des matériaux encore virtuels (en cours de conception), le choix du modèle permettant de générer une fonction est difficile, et sa validation passe par la comparaison à des valeurs (ce qui ramène au point 3) ou la génération d'images (ce qui pose le problème de la détermination objective de leur réalisme, ce qui ramène au point 2)
8. la génération de modèles physico-réalistes nécessite la bonne compréhension des phénomènes physiques, ce qui sort du cadre de l'infographie pour ramener finalement au domaine du chapitre 3

Pour toutes ces raisons, il nous semble que cette approche ne peut être utilisée telle quelle, sans passer par la conception d'outils destinés à exploiter les données sans synthétiser de scènes. Une solution dans notre domaine serait de générer des réponses de capteurs instrumentaux à comparer aux réponses réelles (comme cela se fait dans certaines applications destinées par exemple au domaine militaire).

Deuxième partie

Cartographier l'Aspect

Cette seconde partie aborde la question qui constitue le cœur de la recherche en cours : une cartographie basée sur diverses définitions de la notion de similarité peut-elle être un moyen de comparer et d'optimiser l'aspect de matériaux ? La réponse apportée repose sur une douzaine d'hypothèses de travail :

1. les sensations complexes sont provoquées par des stimuli caractérisables, mais elles sont de nature plus intégrale que séparable : la qualité d'une perle peut être ressentie en dehors de toute capacité du sujet à en définir les dimensions ni à en comprendre les causes physiques
2. ces sensations complexes reposent sur une forte part pré-consciente et/ou émotionnelle
3. l'évaluation de ces sensations est faite par comparaison à des prototypes ou à des archétypes, en termes de similarité ou de dissimilarité
4. les archétypes existent en l'absence d'échantillons, dans l'espace conceptuel. Ils peuvent être étudiés par des approches sémantiques
5. la perception des matériaux réels doit être étudiée dans des espaces fonctionnels, modaux (adaptés à une tâche) et psychophysiques (dimensionnés par la perception et non par les stimuli)
6. les stimuli doivent être caractérisés physiquement au moyen de mesures dont on pourra étudier les relations plus que les valeurs. On peut traiter de manière identique les mesures instrumentales caractérisant des stimuli réels et les résultats de la modélisation physico-réaliste de ces stimuli, mais cela n'implique pas pour autant la validité du modèle.
7. l'instrumentation actuelle tend à produire trop de données, il convient de les synthétiser sous forme numérique (indices) ou visuelle (graphiques) pour en dégager l'information
8. on peut calculer des indices de similarité appropriés dans chacun des espaces de représentation des matériaux : sémantique, fonctionnel, physique
9. ces indices de similarité peuvent être incorporés dans des représentations utilisant une métaphore cartographique
10. sur les cartes, les *trajectoires* ou les *routes* qui relient les échantillons correspondent à des dimensions sensorielles, émotionnelles ou hédoniques
11. les cartes des différents espaces peuvent être superposées soit en se servant de la position d'échantillons-repères ou "balises", soit en mettant en relation des trajectoires homologues d'une carte à l'autre
12. les évaluations sensorielles sont fiables aux informations cartographiques (coordonnées ou distances le long des trajectoires)

La vérification de l'ensemble de ces hypothèses est un travail de longue haleine, qui est en cours. Seuls les éléments les plus avancés à la date de rédaction du mémoire sont examinés dans ce qui suit.

Représentations visuelles et chiffrées

Les pensées de Palomar suivent déjà un autre cours : est-ce «le pré» que nous voyons, ou bien voyons-nous une herbe plus une herbe plus une herbe ? ...Ce que nous appelons «voir le pré» est simplement un effet de nos sens approximatifs et grossiers ; un ensemble existe seulement en tant qu'il est formé d'éléments distincts. Ce n'est pas la peine de les compter, le nombre importe peu ; ce qui importe c'est de saisir en un seul coup d'œil une à une les petites plantes, individuellement, dans leurs particularités et leurs différences. Et non seulement de les voir : de les penser.

Italo Calvino, Palomar, 1983

Le chapitre 4 a mis en lumière la difficulté pour l'ingénieur à exploiter la masse de données mise à disposition par les instruments récents en matière d'aspect visuel. On a également vu que le débat sur la réduction ou la sélection de sous-ensembles de données utilisables n'est pas clos. Le présent chapitre examine une voie "purement graphique" : celle de représentations visuelles non cartographiques synthétisant certaines caractéristiques des données.

6.1 Hypothèses de travail

Le recours à des graphiques de synthèse pour effectuer un travail d'ingénierie est justifié par certains résultats fournis par les sciences cognitives, qui montrent qu'en matière de raisonnement il n'y a pas de différences fondamentales entre le raisonnement symbolique et le raisonnement impliquant des représentations. Des travaux comme ceux de Shin [270] ont apporté des éléments montrant qu'on peut utiliser des diagrammes dans des démonstrations (au sens logique) au même titre que les autres syntaxes, et certains auteurs [213, 127] postulent que le recours aux graphiques est indispensable pour interagir cognitivement avec des données complexes. D'autres [13] postulent que le graphique n'est pas une représentation mais un véritable analyseur de l'objet, thèse à laquelle nous nous rallions dans ce travail. Parmi les domaines les plus prolifiques en représentations visuelles, celui de la fouille informatique de données documentaires (le *Data Mining*) a produit et testé dans la dernière décennie un grand nombre de représentations intermédiaires entre graphes (représentation de relations par des segments organisés) et graphiques, dont beaucoup sont difficilement exploitables [293]

Comme le définit Bertin [21] les propriétés des graphiques sont essentiellement liées à leur alphabet (points, lignes et surfaces), à leur géométrie (topologie et échelles) et à leur palette (intensités et choix des couleurs). En se basant sur la manière dont l'œil humain perçoit les signes graphiques et dont le cerveau en extrait de l'information, la "sémiologie graphique" tente de fixer les règles qui assurent :

1. la correspondance entre données et image
2. le niveau de perception requis par l'objectif visé
3. le bon codage graphique en fonction du type d'information à transmettre (qualitative, ordinale, quantitative...)

Le travail entrepris depuis 2004 repose sur deux postulats supplémentaires :

4. les diagrammes peuvent être ordonnés intuitivement et quasi préattentivement, et si un diagramme est bien conçu et/ou bien compris la classification intuitive d'une série d'exemplaires est identique à la classification des objets.
5. les diagrammes constituent eux-même des objets dont les relations de proximité peuvent être quantifiées et cartographiées (voir chapitre 7) et ces cartographies peuvent être mises en relation avec les autres sources cartographiques (sémantiques, psychophysiques) portant sur les objets réels.

Les postulats 4 et 5 sont en cours de vérification expérimentale sur quelques diagrammes [COL13] produits pour l'interprétation de données gonioscolorimétriques, qui sont présentés dans les sections ci-après.

6.2 Instrumentation et données représentées

Les données utilisées dans ce qui suit sont des données gonioscolorimétriques acquises au moyen d'un instrument mis au point par une start-up (ColorDIMENSIONS) dans le cadre de son accueil à l'EMA. La Figure 6.1 montre une vue latérale de l'instrument, qui se compose :

- d'un plateau réglable en hauteur, tournant sur 360 degrés et inclinable sur 20 degrés, portant une platine XY
- d'une source lumineuse Xenon OSRAM XBO 150 OFR faiblement collimatée, déplaçable manuellement mais conservée fixe lors d'une mesure
- de 28 fibres optiques terminées par une lentille, disposées dans le plan d'illumination sur un arceau fixe tous les 3 degrés dans l'intervalle $3^\circ \leq \theta \leq 84^\circ$
- d'une fibre utilisée pour l'auto-calibration de l'ensemble de détection
- d'un détecteur CCD associé à un réseau de diffraction délivrant une image dont sont extraites 61 valeurs de réflectance au pas de 5 nm dans l'intervalle $400 \leq \lambda \leq 700$ nm

Ce dispositif, voulu par l'inventeur, correspond au geste que ferait un observateur immobile surplombé par une source lumineuse et faisant tourner un échantillon en l'inclinant éventuellement.

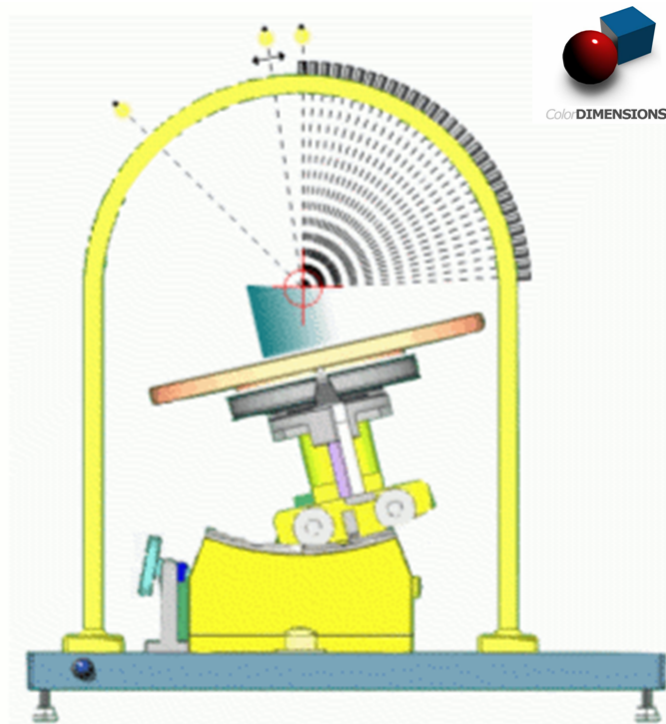
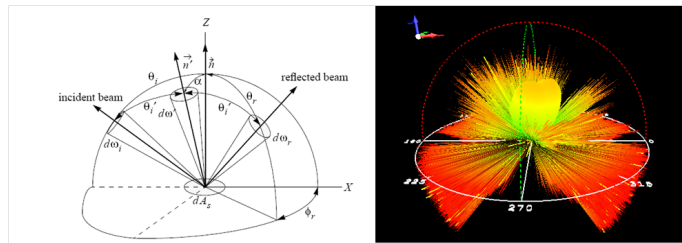


FIGURE 6.1 – Vue latérale du goniospectrocolorimètre ColorDIMENSIONS

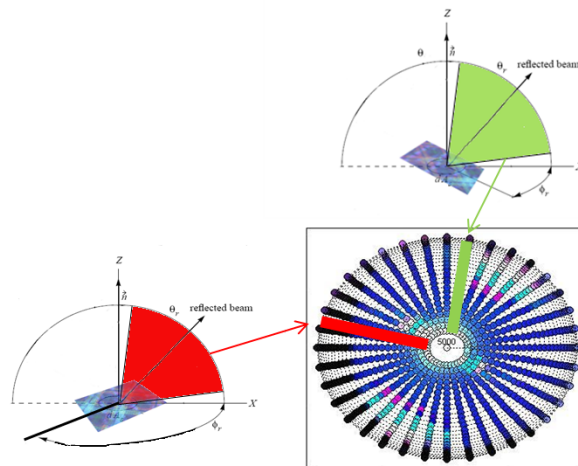
6.3 Le Dôme

définition

Le Dôme est une représentation strictement qualitative, à vocation descriptive. Il s'agit d'une projection sagittale polaire, sur la demi-sphère supérieure, de données colorimétriques acquises sur un échantillon en rotation. Il se présente comme un assemblage de cercles colorés disposés radialement, dont les interdistances dans le plan de projection s'amenuisent vers la périphérie. Contrairement à une BRDF (Figure 6.2a) chaque rayon correspond non pas à un méridien de la demi-sphère supérieure mais à un passage dans le plan d'illumination d'une orientation différente de l'échantillon (Figure 6.2b). La couleur de remplissage des points est obtenue par calcul à partir des réflectances mesurées, pour un illuminant et un niveau d'illumination choisis par l'utilisateur. Elle est également ajustée aux caractéristiques colorimétriques de l'écran.



(a) nomenclature [265] et BRDF expérimentale [94] à partir d'un échantillon fixe



(b) construction d'un Dôme à partir d'un échantillon en rotation

FIGURE 6.2 – BRDF et Dôme [COL13]

exemple

La Figure 6.3 illustre quelques caractéristiques de la représentation. L'échantillon de gauche est un marque-page en cuivre brossé, exploré par pas de rotation $\phi = 25^\circ$ le plateau étant maintenu horizontal. Celui de droite est un

emballage de rasoir manuel destiné aux présentoirs de la grande distribution, mesuré tous les 10° au cours de sa rotation en position horizontale également. Ce second produit se compose d'une couche quasi-transparente et d'une couche réfléchissante, présentant toutes deux des propriétés de diffraction dont les effets sont décalés géométriquement pour créer un effet d'asymétrie. Cet arrangement est destiné à littéralement "attirer" l'attention visuelle, le produit semblant clignoter et changer de teinte lorsqu'on passe devant lui. On constate que :

1. la représentation est suffisamment fidèle pour rendre compte de la palette effectivement constatée (encarts photographiques)
2. les propriétés de symétrie et d'asymétrie sont perceptibles tant en rotation qu'en inclinaison, comme par exemple sur la figure de droite les magentas très clairs dûs à la couche supérieure, qui apparaissent :
 - aux angles rasants dans un plan
 - aux angles proches du spéculaire dans un plan perpendiculaire au précédent
 - pas du tout ailleurs
3. la faiblesse du nombre d'angles ϕ dans la figure de gauche ne nuit pas à la perception de la direction de brossage

On dispose ainsi d'un moyen de mettre en évidence la structure géométrique de la signature visuelle d'échantillon sans quantifier ni représenter de paramètres structuraux. Dans le cas d'échantillons complexes comme celui de la figure de droite, la description sémantique des relations au sein du graphique est plus simple que celle qui peut être faite de l'objet lui-même. La démarche inverse, consistant à s'aider de la représentation pour rechercher sur l'échantillon les caractéristiques de design ou de mise en forme responsables ne présente pas de grandes difficultés.

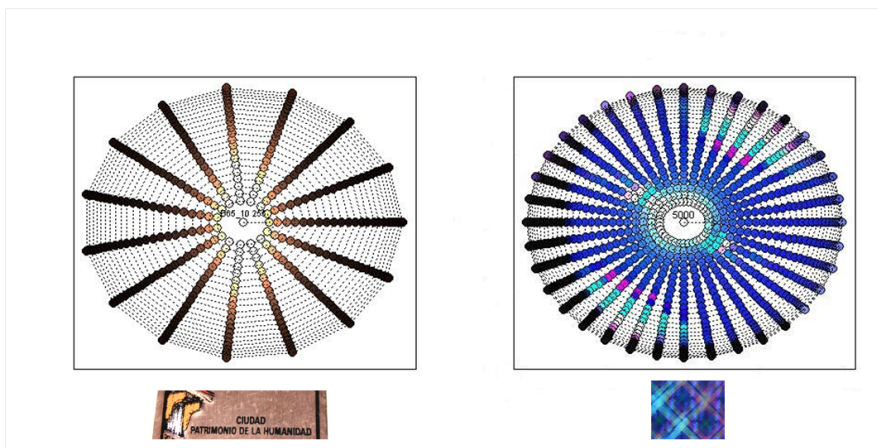


FIGURE 6.3 – Deux Dômes

6.4 Le Blason

Le nom de cet outil a été choisi en référence à l'héraldique et au "blasonnement" (jargon technique destiné à décrire les armoiries), pour des raisons qui

apparaîtront évidentes à l'examen des figures.

définition

Un blason \mathcal{B} est une représentation matricielle des écarts colorimétriques internes à un échantillon, pour une orientation donnée. Elle est inspirée de la représentation visuelle des matrices de corrélation. Il s'agit donc d'un demi-tableau carré dont chaque ligne i et chaque colonne j (avec $j > i$) représente un des angles θ de détection. Le contenu de chaque case est donc une représentation visuelle de l'écart colorimétrique inter-angles. Le blason ne retient donc que les écarts et perd l'information colorimétrique elle-même. Le blason est donc destiné à identifier des classes d'aspect plutôt que des aspects, et permet après apprentissage de discriminer grossièrement les types de phénomènes responsables. Il est à ce titre un complément de la représentation en dôme.

paramétrage

Le paramétrage du blason porte sur trois points : le choix d'une formule d'écart colorimétrique, la discrétisation des valeurs et le choix de la palette de couleurs.

choix d'une formule d'écart colorimétrique Toute formule de l'écart est légitime sous réserve que la palette chromatique lui soit adaptée. Dans leur version de démonstration les blasons utilisent l'écart colorimétrique ΔE^* défini dans l'espace chromatique CIELAB :

$$\mathcal{B}_{ij,j>i} = \Delta E_{ij}^* = \sqrt{(L_i^* - L_j^*)^2 + (a_i^* - a_j^*)^2 + (b_i^* - b_j^*)^2} \quad (6.1)$$

Les défauts de cette formule sont connus et nous y reviendrons partiellement, mais elle présente l'intérêt d'être relativement bien comprise d'un large public ayant quelques connaissances en colorimétrie. Il est bien sûr possible de restreindre cette formule et de représenter des blasons de chromaticité ou de clarté selon les besoins.

discrétisation et choix de palette La matrice calculée est bien sûr stockée sous forme numérique pour d'autres applications, mais le blason en est la représentation visuelle. Nous avons fait le choix de représenter la variable continue ΔE^* à l'aide d'une palette indexée, comportant un nombre discret de couleurs affectées à des intervalles de ΔE^* . Il est en effet aisé de vérifier que l'utilisation d'une palette de type "mélange de primaires" ou encore *heatmap* ne fonctionne pas. Plusieurs raisons peuvent être invoquées :

1. les palettes de type *heatmap*, altitude, etc... possèdent leur propre sémantique, qui n'est pas en rapport avec celle des écarts de couleur
2. l'utilisation d'un mélange de primaires pose le problème de la visibilité des transitions, et conduit à suspecter que les transitions détectables dans la palette choisie puissent ne pas être corrélées aux écarts perceptibles sur l'échantillon, ni même significatives [313]

- l'utilisation d'une grille pour représenter la matrice induit soit le tracé de lignes verticales possédant elles-mêmes une couleur, soit la juxtaposition de couleurs sans séparation posant le problème des contrastes de voisinage.

Le problème de la représentation d'une variable continue par une palette indexée amène à examiner deux questions : celle de la discretisation de la variable et celle du choix des couleurs.

Concernant la discrétisation de la variable, il paraîtrait logique de traduire dans les limites de classes la probable "sensibilité aux différences" des observateurs. Or si ΔE^* est une grandeur dont l'expression mathématique est claire, sa signification psychophysique est assez controversée (voir Sève [283]). En particulier le lien entre les valeurs de ΔE^* et les valeurs de seuils différentiels est difficile à établir, et de plus les sphères de perceptibilité définies dans les espaces CIE 1976 ne sont pas les transformées exactes des ellipsoïdes de McAdam. Il n'y a donc pas de solution qui s'impose spontanément pour fixer des limites aux classes d'écart. Le choix qui a été fait est d'utiliser des classes de taille croissante pour avoir une meilleure résolution dans le domaine des faibles écarts, où la formule d'écart est la moins controversée, et éviter de créer des subdivisions dans le domaine des écarts importants, où la formule n'a pas de réelle signification si ce n'est semi-quantitative ou qualitative.

Le choix des couleurs a été guidé par la volonté d'éviter les ambiguïtés sémantiques déjà signalées. La métaphore finalement adoptée peut être qualifiée de "colorimétrique" : un remplissage achromatique (gris) pour les écarts assimilables à 0, et 31 couleurs classées spectralement (violet, bleu, bleu-vert, vert, vert-jaune, jaune, jaune-orange, orange, rouge) pour les écarts croissants. Cette manière de faire comporte un élément mnémotechnique (tout le monde connaît cet ordonnancement des couleurs qui évoque la succession de l'arc-en-ciel) et incorpore en même temps une partie de la sémantique des *heatmaps* (couleurs froides pour les valeurs faibles, couleurs chaudes pour les valeurs fortes). La Figure 6.4 indique les bornes des intervalles retenues pour la représentation standard.

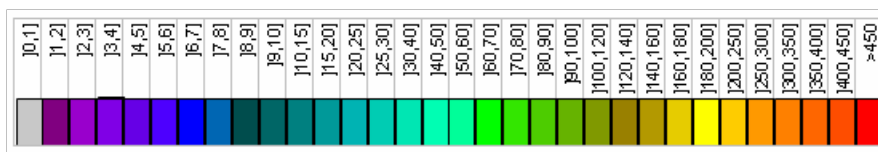


FIGURE 6.4 – Echelle par défaut pour la représentation des blasons

exemples et typologie des blasons

Il est évident dès le premier regard que la lecture de ces graphiques n'est pas aussi immédiate que celle des Dômes, et qu'un apprentissage est nécessaire. Les caractéristiques géométriques des blasons sont les suivantes :

- chaque ligne et chaque colonne d'un blason correspond à la relation du signal détecté sous un angle θ_i (lu sur la diagonale) avec les signaux détectés aux angles $\theta_{j<i}$ (colonne, écarts croissants vers le haut) et aux angles $\theta_{j>i}$ (ligne, écarts croissants vers la droite).

2. toutes les diagonales parallèles à la diagonale principale correspondent à un même écart angulaire $\delta\theta$, croissant en direction du coin opposé à la diagonale.
3. les diagonales parallèles à la seconde diagonale n'ont pas de signification

La Figure 6.5 permet de percevoir au premier coup d'oeil la variété des blasons et leur pouvoir illustratif. Pour l'ensemble des acquisitions le plateau du goniomètre a été incliné de 10° vers les détecteurs, d'où la présence pour les échantillons brillants ou satinés d'une symétrie autour des lignes et colonnes correspondant à $\theta = 18^\circ$ et $\theta = 21^\circ$, qui encadrent l'angle de réflexion spéculaire. Les caractéristiques principales de la représentation apparaissent clairement :

1. les échantillons quasi-lambertiens (ici un des diffuseurs-étalons utilisés sur notre goniomètre) apparaissent uniformément gris (6.5a). Ils restent homogènes même si l'échelle est amplifiée 100 fois.
2. les échantillons diffractants présentent des bandes correspondant aux ordres de la diffraction, caractérisés à la fois par leur position angulaire et leur largeur : un CompactDisc[®] (6.5c) présente 3 ordres espacés de 25 degrés, un carton (6.5d) et une feuille d'emballage (6.5e) seulement 2 ordres séparés respectivement par 30 et 40 degrés. Comme on peut s'y attendre, les écarts sont grands entre toutes les positions angulaires
3. Les figures 6.5f et 6.5g présentent des produits satinés correspondant à l'incorporation de 4 pigments et 2 liants dans des formules cosmétiques. Elles montrent au contraire une forte diffusion illustrées par le fond globalement bleu-verdâtre des blasons

comparaison de blasons accolés

La présentation des blasons sous forme de demi-matrice supérieure conduit immédiatement à la première idée de comparaison entre deux blasons : le second est représenté sous forme de demi-matrice inférieure et accolé au précédent. Il peut s'agir indifféremment de deux échantillons différents ou de deux orientations d'un même échantillon. La Figure 6.6 (emballage de rasoir, voir Figure 6.3) montre le comportement diffractant sous une orientation (demi-matrice supérieure) et diffusant sous l'autre. Le spéculaire intense (première colonne, orange) nettement délimité du fond diffusant correspond à un effet de vernis (sensation de brillant et de profondeur). Les échantillons satinés présentent une transition douce, passant par les teintes bleu-verdâtre et vert, avec des transitions généralement courbes.

6.5 La Boussole

Une des manières de synthétiser les relations entre blasons au cours d'une rotation complète d'un échantillon est d'exprimer la ressemblance visuelle entre l'un d'eux pris en référence et l'ensemble des autres. En exprimant cette similitude visuelle par un indice chiffré on s'offre la possibilité d'en représenter l'évolution dans un diagramme polaire en accord avec l'idée de rotation de l'échantillon.

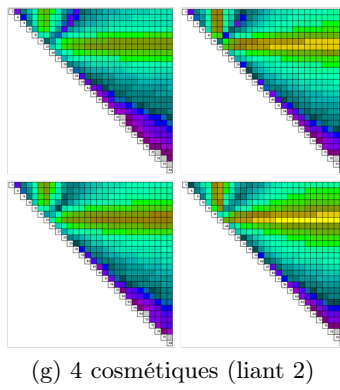
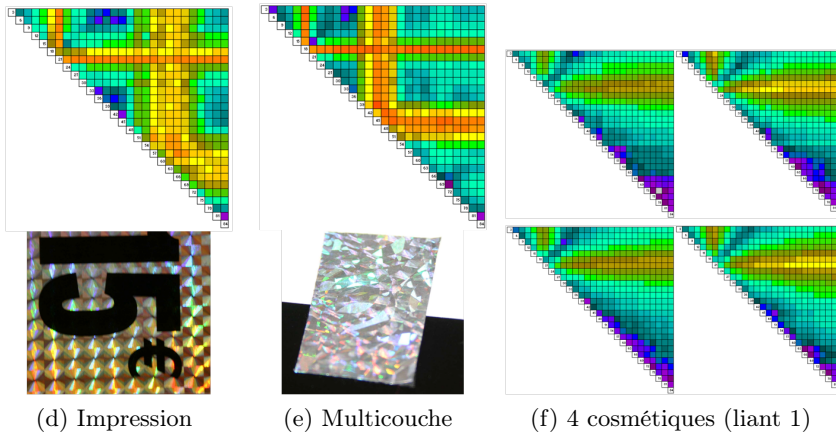
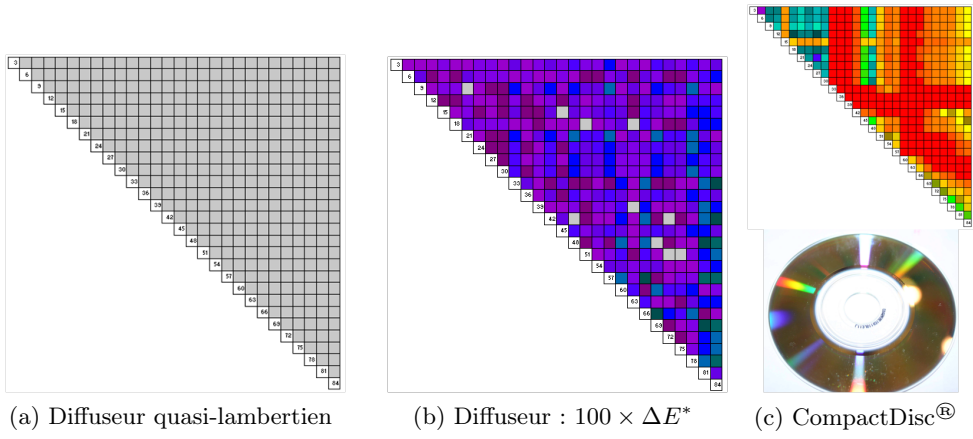


FIGURE 6.5 – 12 blasons

définition

Nous avons dénommé "boussole" une représentation polaire de la similitude visuelle entre blasons correspondant à différentes orientations d'un échantillon. Les orientations sont donc représentées par des rayons du graphique. Chacun de ces rayons est gradué sur l'intervalle $[0, 1]$, et la circonférence externe représente la comparaison à l'orientation de référence. Selon qu'on quantifie la ressemblance ou la dissemblance à cette référence, la circonférence externe correspond donc à la valeur 1 ou à la valeur 0. Enfin, le choix a été fait de donner à l'utilisateur l'opportunité d'examiner les ressemblances à deux niveaux de résolution : valeurs exactes des ΔE^* ou valeurs des intervalles de classe (basée sur la couleur des cases). Seule cette dernière possibilité correspond à un examen visuel rapide. Les deux niveaux sont représentés simultanément (calcul sur les intervalles de classes en rouge, calcul sur les valeurs en gris, ce dernier apparaissant "inclus" dans le précédent, la similitude sur les valeurs étant plus restrictive que celle sur les classes).

indice de Stentiford

Dans ses travaux sur l'expression d'une *attention based similarity* pour le tri automatique d'images, Stentiford [279, 42, 280] a exploré l'hypothèse selon laquelle la ressemblance entre deux images ne nécessitait pas l'égalité "pixel à pixel", mais plutôt l'égalité entre voisinages. Nous avons adapté sa proposition la plus simple au cas des blasons : Soient deux blasons \mathcal{A} et \mathcal{B} . On définit un voisinage V (figure 6.7) comportant n points : n plus proches voisins en colonne ou en ligne, croix ($n = 4$), cases adjacentes de premier rang ($n = 8$)... et un poids p accordé au pixel central. Pour chaque valeur \mathcal{A}_{ij} , le score local s_{ij} est la somme du score de la valeur centrale et de ceux du voisinage, c'est à dire que

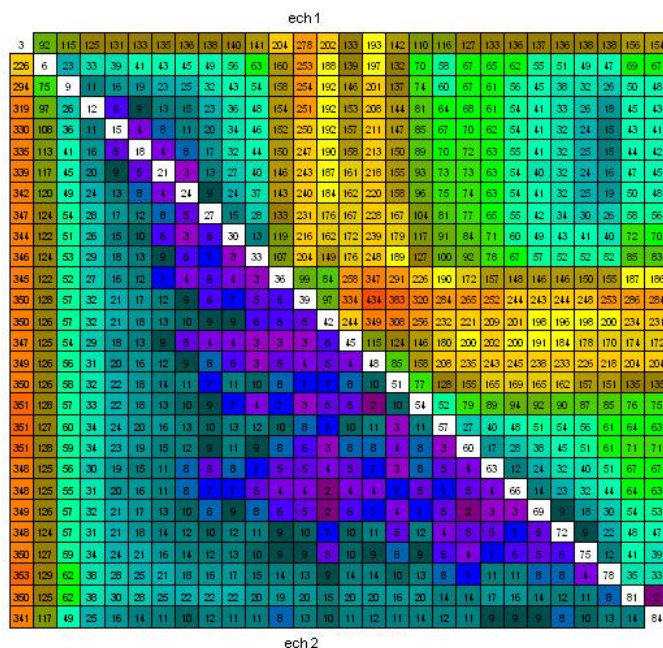


FIGURE 6.6 – Blasons accolés : échantillon de droite de la figure 6.3, pour deux orientations ϕ séparées par 60° . Illumination selon la normale à l'échantillon

la différence entre les valeurs centrales est relativisée par la ressemblance des voisinages. Le voisinage par défaut est une croix et p vaut 4 afin que l'égalité des voisinages "pèse" autant que l'égalité des valeurs centrales :

$$\begin{aligned} &\text{si } \mathcal{B}_{ij} \neq \mathcal{A}_{ij}, s_{ij} = 0 \\ &\text{si } \mathcal{B}_{ij} = \mathcal{A}_{ij}, s_{ij} = p \\ &\text{puis } s_{ij} = s_{ij} + \text{Card}(\mathcal{B}_V = \mathcal{A}_V) \end{aligned}$$

Et finalement le score total $S(\mathcal{A}, \mathcal{B})$:

$$S(\mathcal{A}, \mathcal{B}) = \sum_i \sum_j s_{ij}$$

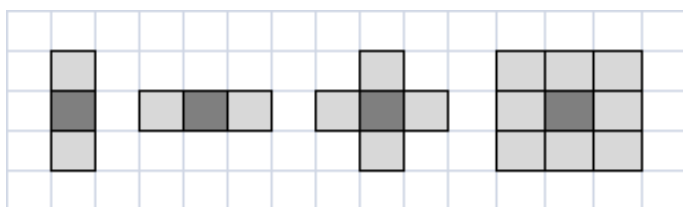


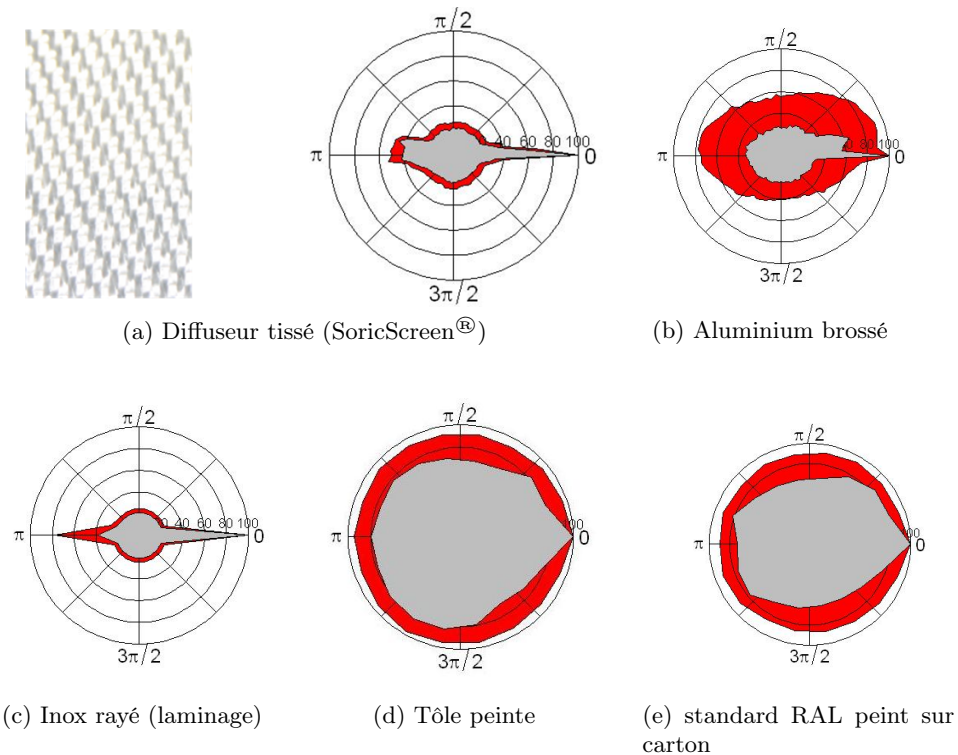
FIGURE 6.7 – 4 voisinages pour le calcul de l'indice de Stentiford

Parce que les dimensions des blasons peuvent varier selon les méthodologies d'acquisition (nombres d'angles de détection θ différents selon les instruments, on se doit de normer les scores afin que $S_{\mathcal{A}\mathcal{A}} = 1$, et donc finalement :

$$S_{\mathcal{A}\mathcal{B}} = \frac{S(\mathcal{A}, \mathcal{B})}{S(\mathcal{A}, \mathcal{A})}$$

exemples

Ainsi définie, la représentation en boussole rend compte de l'influence visuelle de la texturation des échantillons lors de leur mise en rotation. La Figure 6.8 montre quelques signatures de textures très caractéristiques. 6.8a montre la signature d'une texture tissée utilisée pour calibrer des instruments de mesure d'albedo. La boussole présente un plan de symétrie correspondant à l'allongement de la maille et une disymétrie selon cet allongement correspondant au mode de tissage. Sur ce point précis et sur les différentes géométries de mailles, le lecteur intéressé pourra se reporter à [180]. 6.8b et 6.8c correspondent à des métaux : un aluminium brossé dont l'aspect présente différentes échelles (orientation et fréquence) et une tôle d'incox présentant des rayures parallèles à la direction de laminage. Enfin 6.8d et 6.8e présentent des structures très isotropes : une peinture métallisée sur tôle métallique très plane et une fiche cartonnée (RAL 3007) issue d'un nuancier RAL 840HR de moins bonne planéité. La rigidité et la planéité de la tôle peinte conduisent à une représentation presque parfaitement circulaire, et sa charge métallique très fine n'induit aucun effet de scintillement (qui se traduirait par une "rugosité" des contours comme pour 6.8b). Le standard cartonné, très légèrement satiné, n'est pas totalement plan.

FIGURE 6.8 – 5 boussoles (voir texte). Incidence de l'éclairage 10° .

6.6 Exemple d'utilisation des blasons simples

La Figure 6.9 illustre une tentative pour représenter au moyen de blasons l'évolution de la "perlescence" les résultats d'un plan d'expérience destiné à tester les effets combinés de trois constituants dans une formulation cosmétique. Le terme "perlescence" est fréquemment employé en cosmétique pour désigner un effet combiné de transparence, de clarté et de goniochromisme léger obtenu au moyen de pigments interférents ou de substances huileuses. Au delà du fait qu'elle mobilise des images de luxe et de douceur, l'analogie à la perle traduit également la difficulté à dissocier les effets qui conduisent à cette perception. En ce sens, la "perlescence" est un concept holistique et défini de manière floue, comme celui de "soft" dans le domaine du toucher. La représentation a permis de mettre en évidence que :

- l'un des constituants neutralise l'apparition de la propriété
- il existe trois modalités produisant des niveaux quasi-identiques de perlescence (blasons 4,5 et 7)

sans qu'il ait été nécessaire de statuer sur des corrélations entre propriétés ni d'avoir recours à un modèle statistique (analyse de variance...). La formule optimale n'est pas représentée.

Lorsque le nombre d'échantillons augmente et le permet, il n'y a aucune difficulté à remplacer les images de blasons par le tracé de lignes d'iso-indice de Stentiford par rapport à une référence consensuelle.

6.7 Conclusion

Les outils que nous avons développés ne sont pas destinés à remplacer ceux qui servent habituellement à caractériser une couleur ou un aspect visuel. En effet, ils ne véhiculent pas l'information colorimétrique, mais une information sur la structure de cette information... Ils ne sont donc utilisables que pour des stimuli ayant une structure spatiale ou temporelle. Nous les avons ainsi appliqué à des mesures réalisées :

- le long de profils rectilignes
- sur une grille à maille régulière
- pendant l'écoulement de produits dans une cellule transparente

Leur dimension exclusivement visuelle est voulue : nous voulons qu'ils soient l'équivalent des courbes de réflectance ou des chemins chromatiques, que l'on appréhende de façon intégrale sans véritablement y lire des valeurs (l'usage courant est d'ailleurs de les accompagner de tableaux de nombres).

Depuis 2006 nous les avons utilisés de diverses manières : pour reconnaître et discriminer des familles de produits (à la manière des "fingerprints"), pour juger de la modification d'une propriété en direction d'une cible, ou pour réduire l'information instrumentale.

Mais dans l'état actuel d'avancement de ce travail, un point majeur reste à évaluer : est-ce que ces représentations sont intrinsèques [12] ? Autrement dit sont-elles bien des représentations de ce qu'elles sont sensées représenter ? Il est vraisemblable que pour le savoir nous devons commencer par étudier les conditions de leur discernabilité, puis vérifier que le classement des représentations obtenues et le classement des objets réels sont identiques.

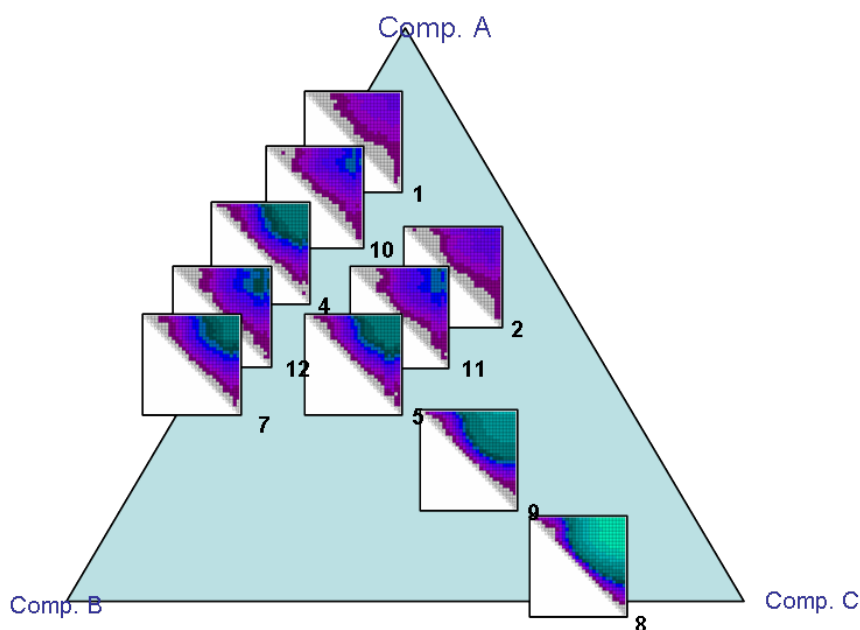


FIGURE 6.9 – Evolution de la perlescence d'une formule cosmétique avec les proportions de trois de ses constituants (pour le code couleur voir figure 6.4)

Cartographie

Donc il faudrait faire, pour chaque animal, de véritables cartes d'affects [...]. C'est évident que cheval de course et cheval de labour c'est la même espèce, ce sont deux variétés de la même espèce, pourtant les affects sont très différents, les maladies sont absolument différentes, la capacité d'être affecté est complètement différente et, de ce point de vue là, il faut dire qu'un cheval de labour est plus proche d'un bœuf que d'un cheval de course. Donc, une carte éthologique des affects, c'est très différent d'une détermination générique et spécifique des animaux.

cours de Gilles Deleuze, Vincennes, 24 janvier 1978

Nous avons vu (chapitre 6) les possibilités de représentation des données au moyen de graphiques et d'indices. Nous abordons maintenant le traitement cartographique de l'information. Les chapitres précédents nous ont permis d'établir qu'un espace conceptuel est un espace géométrique basé sur la notion de dissimilarité assimilée à une distance, que l'approche colorimétrique est un cas particulier d'approche cartographique, rendu possible dès lors que nous disposons d'une *métrique*. Pourquoi ne pas tenter d'étendre cette approche à des propriétés non colorimétriques, définies par des descriptions verbales ou textuelles, par des vecteurs de valeurs, par des graphiques ou par des images ? Comme on va le voir, cette idée n'est pas nouvelle, mais curieusement elle n'est pas mise en oeuvre dans le domaine des sciences des matériaux.

7.1 Qu'est-ce qu'une carte ?

Si l'on s'en tient à sa définition stricte, une carte est une représentation plane, déformée conventionnellement du fait de l'utilisation d'un mode de projection, d'un espace possédant plus de 2 dimensions. Une carte se distingue donc d'un graphique par le fait qu'elle superpose une information qualitative ou quantitative à une grille de coordonnées permettant de rendre compte de relations spatiales selon une métaphore adaptée. On peut noter au passage à l'usage des ingénieurs en matériaux que les célèbres diagrammes d'Ashby (par exemple Figure 7.1) [8], parfois dénommés "cartes de propriétés", n'en sont pas.

C'est le commerce maritime qui a donné à la cartographie sa sémantique actuelle, et ce dès la fin du moyen-âge : comme le montre la Figure 7.2, l'écart visuel n'est pas si grand entre les attributs des portulans (apparus au XII^e siècle et perfectionnés jusqu'à la fin du XVI^e) et ceux de la carte du "TV-Land" virtuel de Gansner [108]. Mais la cartographie d'aujourd'hui s'applique à des territoires inimaginables avant le développement de l'informatique et des réseaux.

Tout en respectant la métaphore cartographique, les cartes et atlas bénéficiant des progrès de l'informatique sont dotées de caractéristiques supplémentaires. Comme le décrit Taylor [288] la "cybercartographie" et les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) qui tendent à remplacer le support papier par le support numérique permettent d'augmenter le nombre de dimensions du repère et de lui superposer une infinité de couches (rasters). Taylor dresse une liste des nouveaux attributs de ces cybercartes, dont il signale qu'on ne les utilise d'ailleurs presque plus pour se diriger : éventuellement multisensorielles, utilisant les NTIC, interactives, incluses dans des "boîtes à outils" analytiques ou informatives, produites par des équipes pluridisciplinaires, évolutives. . . L'auteur s'intéresse peu à la possibilité de cartographier des espaces purement cognitifs ou virtuels, comme une discographie [59, 108] ou un réseau de relations scientifiques ou éditoriales entre chercheurs [108]. Dans le cadre de notre travail c'est ce point qui nous intéresse. Roberts et al. [256] ont étudié les difficultés de navigation à l'intérieur de ces espaces immatériels et énoncent ce qu'ils considèrent comme de bonnes pratiques de représentation :

1. plus le domaine à cartographier est concret, plus la métaphore spatiale est explicite et moins elle nécessite une assistance à la lecture



(a) Portulan d'Albino de Canepa, 1489



(b) "TVland" de Gansner, 2009

FIGURE 7.2 – Deux cartes séparées par 5 siècles : l'Europe du Sud-Ouest à la fin du 15^e et les séries TV à la fin du 20^e ...

représenté à la même échelle horizontale l'évolution des températures le long du chemin du retour. La richesse de l'information est ici véhiculée par la représentation elle-même. A l'opposé, certaines cartes cachent leur richesse sous une apparence classique. C'est par exemple le cas des cartes eco-climatiques de Leibovici et al. [182] (Figure 7.4) qui représentent la dynamique des moyennes mensuelles de 10 variables enregistrées pendant 30 ans (1960-1990) sur le continent africain entre les latitudes 39.143° Nord et 5.731° Sud, à la résolution de 5 minutes d'angle. Le jeu de données comporte donc $12 \times 10 \times 298249$ données. Issue d'une analyse tensorielle, chaque carte représente un aspect de cette dynamique sous forme de gradients entre groupes de variables, sans qu'aucune de ces variables ne soit elle-même représentée.

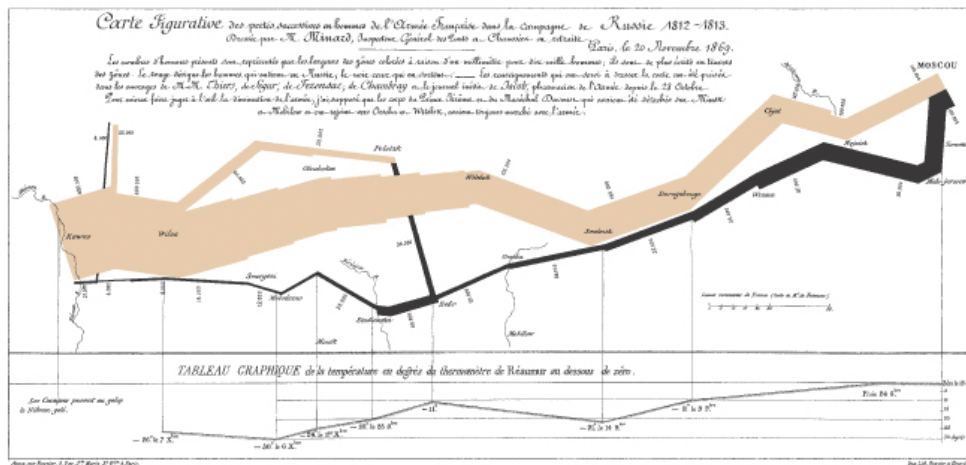


FIGURE 7.3 – La Grande Armée en Russie, 1812. Carte de Charles-Joseph Minard, 1869 [208]

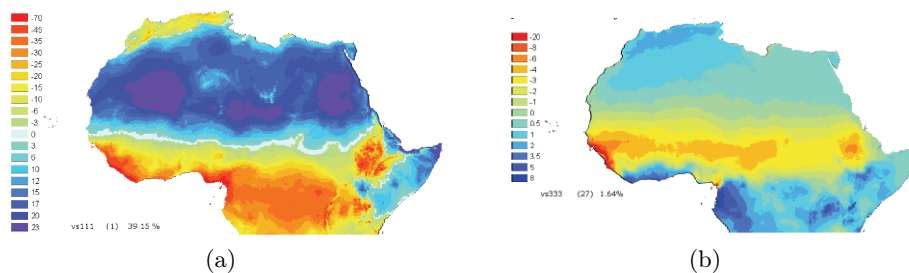


FIGURE 7.4 – 2 cartes tensorielles des dynamiques climatiques en Afrique subsaharienne entre 1960 et 1990 [182]

Propriétés et attributs d'une carte

Comme on vient de le voir, une carte véhicule deux types d'attributs : ceux relatifs à la chose représentée et ceux relatifs à la représentation. Les premiers relèvent des techniques projectives et les seconds de l'esthétique de la cartographie.

Attributs relatifs à la chose représentée Parce qu'une carte plane est la projection d'un espace multidimensionnel, les surfaces, les formes, les distances et les directions sont plus ou moins bien préservées par la représentation. Il n'entre pas dans le cadre de ce travail de faire un inventaire des modes de projection et de leurs domaines d'utilisation, d'autant que ceux-ci sont généralement définis par rapport au problème de la représentation plane de calottes sphériques. Le lecteur intéressé pourra se reporter au manuel très complet de Snyder [275]. Remarquons néanmoins à ce stade que la représentation circulaire du plan de chromaticité (a^* , b^*) dans le système colorimétrique CIELab est une projection azimuthale équidistante de la sphère. Les principales propriétés de ce type de projections sont :

1. l'exactitude des directions si elles sont mesurées à partir de centre
2. l'unicité de l'échelle des distances si elles sont mesurées à partir du centre
3. la représentation des parallèles (saturation) par des cercles équidistants
4. la représentation des méridiens (teinte) par des rayons équidistants

Cette projection ne conserve donc pas la forme des nuages de triplets Lab ou LCH lorsqu'on s'éloigne du centre, d'où la pratique consistant à recentrer le repère sur la référence.

Plutôt qu'un concept de projection, certaines cartes modernes utilisent la notion d'anamorphose. De telles cartes (*cartogram* en anglais) déforment volontairement la géométrie pour faire passer un message. Elles "transcrivent une variable descriptive des lieux en une variable déformant les lieux" [40]. Certains auteurs [76] estiment que c'est une approche particulièrement adaptée au tracé des cartes cognitives, parce que celles-ci sont des représentations de propriétés déformées par l'expérience acquise. Sans abandonner le projet d'explorer plus tard cette piste, nous avons choisi de nous référer pour l'instant à la métaphore de la "carte topographique" parce qu'elle est familière au plus grand nombre, et ne nécessite donc pas de compétences particulières pour être lue.

Telle que nous la connaissons en France, la carte topographique est basée sur la projection conique conforme dite "de Lambert" qui conserve distances, angles et surfaces pour des zones peu étendues. On l'utilise donc couramment pour déterminer des voisinages (distances), des trajectoires (routes) et des domaines (superficies). Selon les échelles, elle contient jusqu'à 3 coordonnées (2 coordonnées géographiques dans le plan de la feuille plus une autre variable quantitative représentée en isolignes : isohypses, isohyètes. . .) et une à deux variables catégorielles indiquées par des aplats et surcharges colorés (peuplement ou utilisation du sol, classification des risques naturels, indications géologiques, hydrogéologiques, pédologiques ou faunistiques. . .). Enfin des icônes indiquent les principaux points remarquables.

Une telle représentation supporte une *métrique*, c'est à dire un ensemble de règles associées à la fonction distance, le tout induisant une *topologie*. Etant donnés trois points x , y et z , les propriétés principales d'une métrique d sont :

$$d(x, y) \geq 0 \quad \text{une distance est toujours positive,} \quad (7.1)$$

$$d(x, y) = 0 \quad \text{si } x = y \text{ égalité des indiscernables,} \quad (7.2)$$

$$d(x, z) = d(y, x) \quad \text{symétrie,} \quad (7.3)$$

$$d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z) \quad \text{inégalité triangulaire} \quad (7.4)$$

Si l'addition est définie dans l'espace considéré, on y ajoute

$$d(x, y) = d(x + a, y + a) \forall (x, y) \quad (7.5)$$

On parle de métrique intrinsèque quand le chemin qui joint x à y a une longueur proche de $d(x, y)$, d'ultra-métrique lorsque l'inégalité triangulaire s'accompagne de la relation $d(x, z) \leq \max(d(x, y), d(y, z))$, et de quasi-métrique lorsque l'équation 7.3 ne tient pas.

Attributs de la représentation Au risque de donner l'impression d'un fouillis inextricable, il est nécessaire de rappeler que l'image d'une carte est elle-même un stimulus ! La représentation cartographique doit donc être lisible, tant au plan sensoriel qu'au plan cognitif. Sur le plan sensoriel les recherches concernent :

- dans le cas de cartes représentant la variation continue d'une variable unique : la mise au point d'échelles de niveaux de gris ou de couleurs ayant des résolutions identiques sur toute leur étendue, ainsi que les problèmes de contraste simultané (voir par exemple Ware [313] sur la capacité de diverse échelles à permettre l'extraction d'information)
- dans le cas de cartes représentant une relation entre deux variables : mise au point de représentations simultanées (superposition), pour lesquelles les points cruciaux sont la monotonie perceptuelle de la représentation de chaque variable, l'évaluation aisée de la valeur de chaque variable, l'indépendance perceptuelle des modes de représentation et la possibilité d'intégrer les dimensions représentées, donc de comprendre la relation (Ware encore [314] propose l'usage de séquences de petits éléments graphiques, dénommés *QTonS*, superposables à une échelle chromatique comme le montre la Figure 7.5)

Qu'est-ce qu'une trajectoire ?

La notion de trajectoire revêt une grande importance dans notre démarche cartographique. Les méthodes que nous utilisons pour produire les cartes d'aspect ont pour première conséquence l'absence de repère absolu : les cartes ne sont pas orientées et les seules "directions" qu'elles comportent sont internes, constituées par l'organisation des points représentant les échantillons. Le repère du graphique est lui-même une pure convention (mais il en est de même du repère d'une carte géographique).

Pourquoi désigner comme des "trajectoires" les lignes qui apparaissent sur une carte ? Celles-ci devraient plutôt être considérées comme des "routes", des "axes" ou des "directions" puisque la notion de trajectoire implique la notion de mouvement, et éventuellement de temps. Mais il se trouve que parmi les premières cartes d'aspect tracées au cours de cette recherche, plusieurs incluaient un déplacement (mesures le long d'un profil) ou une variable temporelle (cartes du vieillissement d'aspect, ou de la perlescence de shampoings). Le concept de trajectoire s'est alors imposé de lui-même. . .

Quoi qu'il en soit, ces objets sont des lignes ou des courbes dans l'espace cartographique projeté. Pour que ces courbes soient conformes à la métaphore cartographique que nous cherchons à développer, elles doivent posséder plusieurs caractéristiques :

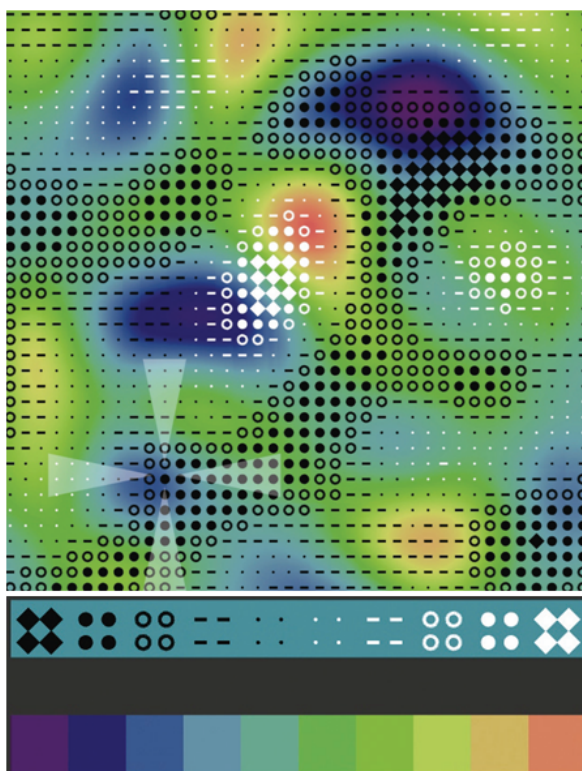
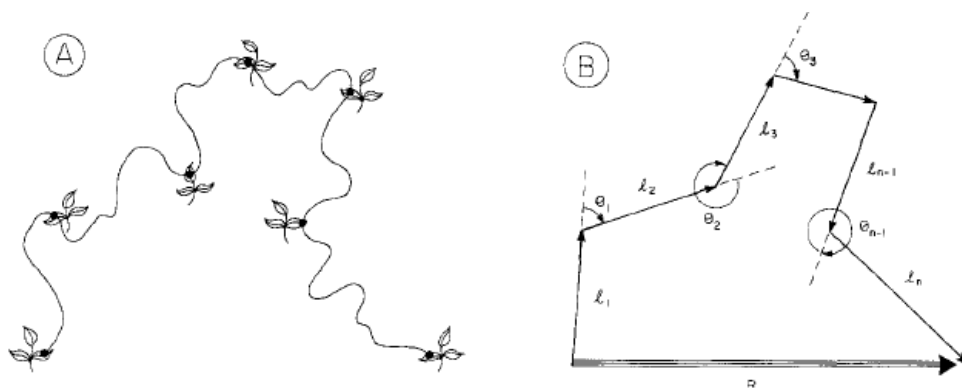


FIGURE 7.5 – Une représentation bivariée utilisant les *QTonS* [314]

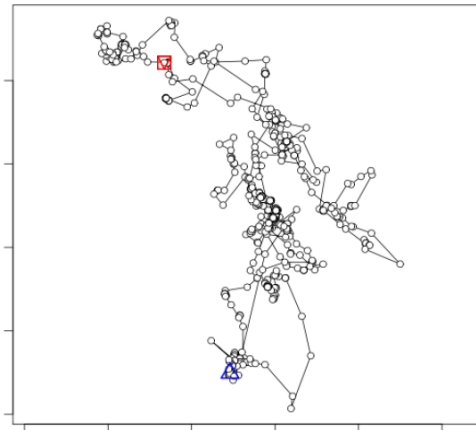
1. avoir un point de départ D et un point d'arrivée A identifiés comme étant les extrémités de quelque chose
2. se rendre de D en A en passant par une succession d'états progressant de façon monotone au cours du trajet
3. progresser statistiquement "en direction" de A , c'est à dire avoir une "rugosité" faible par rapport au plus court chemin entre les extrémités
4. conséquence du point 2, ne pas se recouper (ce qui n'est pas toujours vrai pour une trajectoire réelle, Figure 7.6)

En écologie, où elles sont un objet d'étude courant, les trajectoires sont habituellement décrites de deux manières : une succession de i pas (caractérisés chacun par leur longueur l_i , leur orientation absolue par rapport à un repère conventionnel, une valeur de changement de direction θ_i (orientation relative) et le carré du déplacement résultant R_i^2) ou un tableau de $i + 1$ points en k dimensions. Les méthodes d'analyse et de modélisation diffèrent dans les deux cas : corrélogrammes, statistiques circulaires etc... pour la description géométrique et statistiques spatiales pour les tableaux de coordonnées. Aucune des ces deux méthodes de description ne nous convient réellement : nous sommes confrontés à l'ajustement d'un chemin à travers un semis de points plutôt qu'au tracé d'un parcours passant exactement par les points comme le montre la Figure 7.7.

La notion de "courbe principale" est particulièrement adaptée à cette problématique. Ces courbes ont été proposées par Hastie et Stuetzle en 1989 [128], qui les définissent comme des "courbes non-paramétriques lissées de dimension 1 passant au milieu d'un ensemble de données à p dimensions qu'elles



(a) trajet réel d'un insecte(A) et son modèle descriptif (B) selon [155]



(b) trajectoire d'un ours brun muni d'un GPS [266, 33]

FIGURE 7.6 – Trajectoires d'êtres vivants (voir texte)

résumé de manière non-linéaire". On peut les considérer comme un ensemble de p fonctions ne dépendant que d'une seule variable λ qui induit une relation d'ordre le long de la courbe. La logique est de ne pas considérer qu'il y a parmi les variables une variable dépendante et des variables explicatives, comme c'est le cas pour les lissages par noyau (*kernel smoother*), par voisinage (*nearest neighbours smoother*) ou par spline. Toutes ces techniques cherchent en effet à minimiser de préférence les variations "verticales" (la variable dépendante étant généralement représentée en ordonnée, Figure 7.8). Le lecteur intéressé trouvera l'ensemble des détails mathématiques dans [128]. Les courbes principales sont très utilisées en modélisation de mouvement, mais également dans des problèmes d'ingénierie : la méthode a été utilisée initialement par ses concepteurs pour repositionner au moindre coût technique le mauvais alignement d'aimants dans un accélérateur de particules, ou encore pour retracer l'histoire de l'ingénierie d'un produit à partir d'une analyse de brevets [309], ce qui montre que la notion de trajectoire peut être prise au sens abstrait qui lui est donné dans ce travail. Elles sont également utilisées pour stocker sous forme compacte des tracés de réseaux routier ou hydrographique dans des applications de visualisation de position (cartes interactives, GPS) ou en écologie pour le traitement de données d'abondance faunistique ou floristique en vue

d'ordonner les stations selon un gradient [72].

Domaines

Forme, surface et orientation sont des attributs des domaines qu'il est possible de délimiter sur une carte. Sur les premières cartes tracées [COL13], deux types de domaines sont apparus dès 2006 :

- des "régions" qui rassemblent des matériaux d'une même famille (les métaux opposés aux polymères...)
- des "agglomérations" qui rassemblent des mesures effectuées sur un même matériau et possèdent une forme générique (les pigments interférentiels borosilicatés opposés aux pigments interférentiels micacés...)

L'étude des paramètres caractéristiques de ces domaines n'a pas été entreprise tant que la méthodologie d'obtention des cartes n'est pas totalement figée et que leurs autres propriétés ne sont pas totalement explorées. Les techniques privilégiées seront issues de la morphologie mathématique et de l'analyse de forme (voir en particulier [254] pour l'appartenance de deux formes à une même famille)

7.2 Exemples d'utilisation de la métaphore cartographique

A l'heure actuelle, les disciplines concernées par chacun des niveaux que nous avons décrits au chapitre 2 utilisent toutes la métaphore cartographique pour représenter des données. Les quelques exemples qui suivent ont un triple objectif :

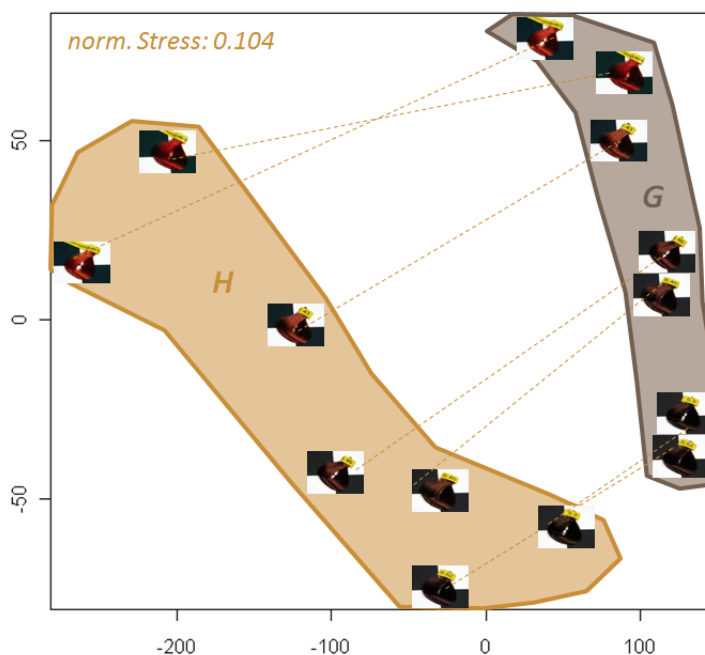


FIGURE 7.7 – Pour chacun des deux domaines colorés, les vignettes sont-elles situées sur une trajectoire? [COL16]

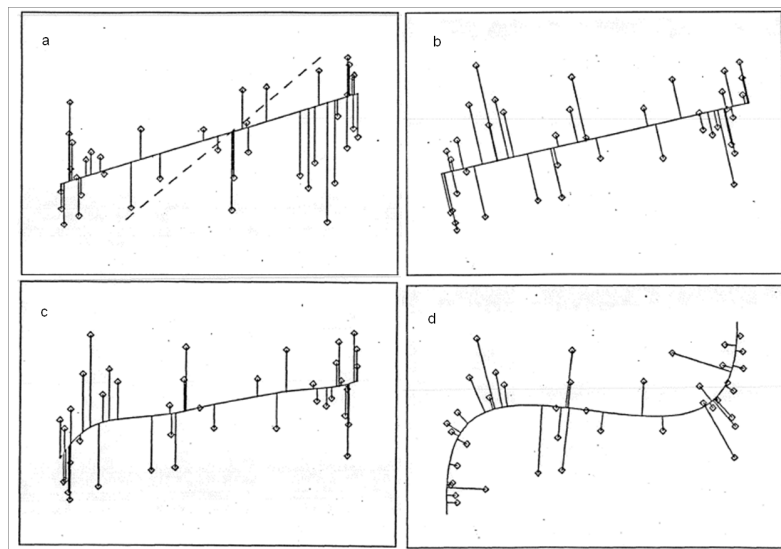


FIGURE 7.8 – Différentes techniques de lissage d'un même ensemble de points : régression linéaire (a), composante principale (b), spline (c), courbe principale (d) [128]

- fonder la démarche de notre recherche sur l'existant
- en tirer des enseignements sur la méthodologie à utiliser dans le domaine des matériaux
- en dégager les points communs dans le but de les mettre graphiquement en relation

Cartes cognitives

Les cartes cognitives ont été principalement développées pour organiser de l'information de manière structurée. C'est l'apparition des nouvelles technologies de l'information qui a promu la cartographie d'espaces virtuels comme le "TVLand" de Gansner et al. déjà cité (Figure 7.2b), ou la représentation de graphes relationnels sous forme de cartes. Au-delà de leur apparence ludique, les divers travaux de Gansner insistent au passage sur plusieurs points techniques de la représentation spatiale des connaissances qui concernent notre approche :

1. il existe diverses manières de recueillir l'information à représenter : interroger des sujets sur la similarité entre documents et constituer une matrice des fréquences de leurs réponses (approche psychophysique), comptabiliser le nombre de liens entre les objets considérés comme autant de nœuds d'un réseau (approche par graphes), exploiter des méta-données attachées aux "échantillons" (entrées d'un thésaurus choisies par des experts, incluses dans un "en-tête" de fichier) ou calculer un indice de similarité à partir de textes bruts (textes issus de magazines TV) ce qui s'apparente à une approche sémantique
2. il existe de nombreuses manières de transformer cette information en cartes. Toutes reposent sur des techniques apparentées à la réduction dimensionnelle, dont certaines sont focalisées sur la dispersion des données (Analyse en Composantes Principales), d'autres sur la préservation des

relations de distances entre données (Multidimensional Scaling (MDS), Force Directed Algorithms (FDA)...)

- il existe diverses techniques pour délimiter sur les cartes des domaines s'apparentant à des catégories et il est important d'apparier l'algorithme de catégorisation et l'algorithme de calcul des coordonnées : k-means et MDS ; "modularity based clustering" [219] et FDA.

La Figure 7.9 [59] est issue d'un outil de construction de programmes musicaux (*playlists*) à l'usage des programmeurs (de radio ou *disc-jockeys*). Elle montre une des représentations pouvant être construite de manière interactive en fonction de requêtes émises par l'utilisateur. L'environnement de développement utilise un thesaurus et des listes de propriétés établis manuellement, et repose sur un algorithme de la famille des FDA, dit *Spring Embedding* [152, 38] qui utilise lui-même une métaphore physique : la position de chaque point découle de l'équilibre des forces de traction qu'exercent sur lui des ressorts correspondant à ses diverses propriétés.

Ce type de carte ne doit pas être confondu avec ce qu'on dénomme parfois *concept mapping* dont la forme est plutôt celle de graphes relationnels que de cartes (Figure 7.10) [55, 67, 217].

Cartes et sémantique

Les cartes sémantiques sont un produit du développement des techniques de fouille de données textuelles. Ces techniques ont pour but soit la recherche de documents de contenus proches, soit la mise en évidence d'un vocabulaire spécifique à un sujet, soit l'établissement de similitudes d'emploi entre termes de langues différentes. Une démonstration particulièrement intéressante est donnée par les travaux de Bécue et al. [16]. Les auteurs analysent les réponses de 4 groupes de 1000 à 2000 personnes (britanniques, français, italiens et japonais) à deux questions ouvertes :

- "What is the most important thing to you in life?"
- "Anything else?"

Les réponses sont organisées en 18 "documents-catégories" en croisant genre, âge et niveau d'éducation des sujets, puis le corpus est constitué en ne conservant que les mots les plus fréquents. La carte est obtenue par la méthode MFACT (Multiple Factor Analysis for Contingency Tables [16]). L'analyse est conduite de manière à traduire par des profils la manière dont chaque mot est utilisé par chaque catégorie de locuteurs. La comparaison des profils conduit à établir la Figure 7.11.

Cette figure illustre 3 des principaux intérêts de la cartographie sémantique :

- faire apparaître des proximités entre termes des différentes langues (*child, enfant, kodomo, figli*)
- faire apparaître des clusters de mots reliés au sein d'un concept (*relation, travail, satisfaction, emploi*)
- permettre de visualiser des dimensions, des directions ou des organisations indépendamment des axes conventionnels du graphique (*want, get, do* orthogonaux à *be*). Ces dimensions peuvent ne pas être pertinentes

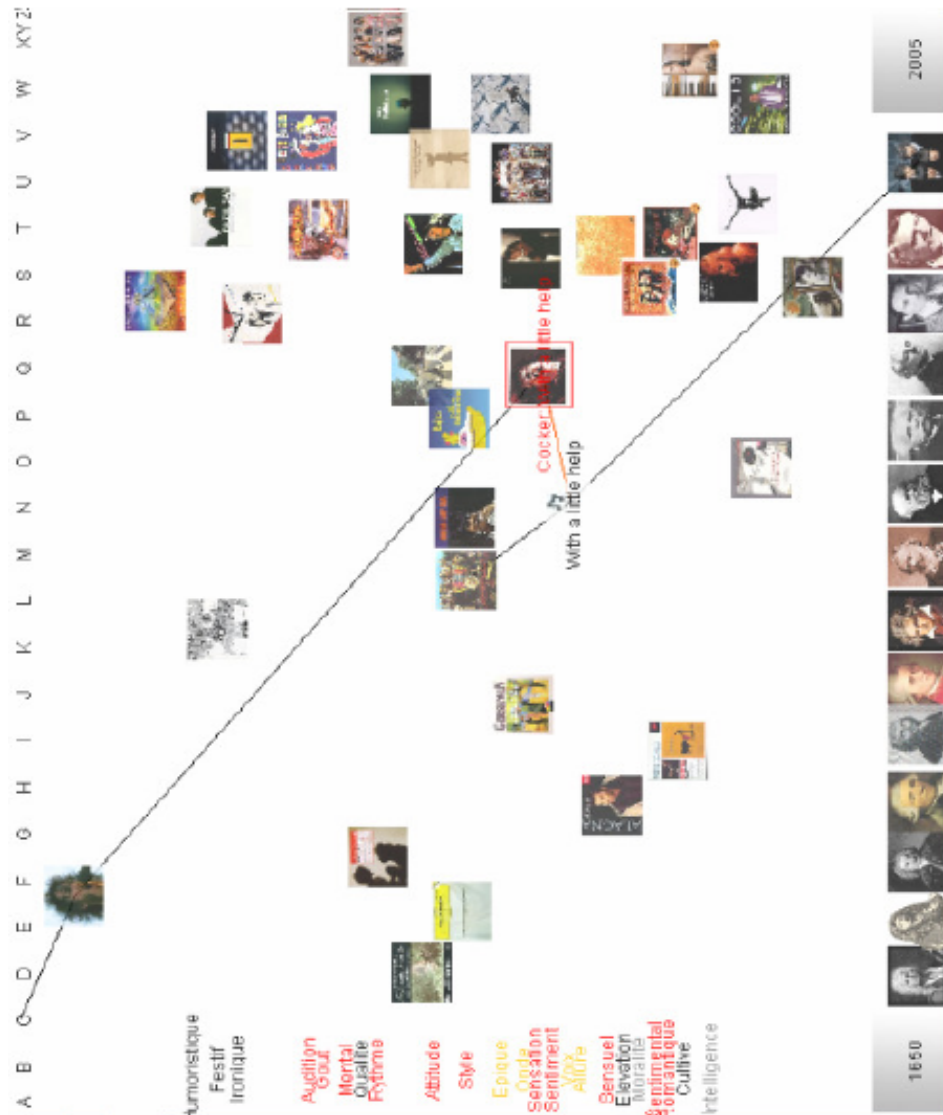


FIGURE 7.9 – Une carte de connaissance basée sur la méthode Domaine-Vue-Contrôles et l’environnement MolAge. *With a little help from my friends* (label noir) est une chanson des Beatles (ligne de temps, en bas) figurant sur l’album *Sgt Pepper’s...* (lien noir vers la pochette du disque) qui a été réinterprétée par Joe Cocker (lien rouge) [59].

pour tout observateur d'une telle carte, mais tout utilisateur pour qui elles le seraient peut les visualiser.

Cartes et psychophysique

Dans le domaine de la psychophysique on trouve deux grands types de cartes : celles qui représentent les distances perceptuelles évaluées lors de tests et celles qui calculent des distances à partir de données issues d'investigations en Imagerie de Résonance Magnétique fonctionnelle. Edelman [91] présente un exemple de cartes (Figure 7.12) établies à partir de ces deux types de données :

1. le tri effectif de 32 objets par un groupe de sujets, qui résulte en une matrice de dissimilarité obtenue expérimentalement conformément aux méthodes des tests psychophysiques (Figure 7.12a)
2. les coordonnées des voxels (unités de volume) activés dans le cortex occipital latéral (une région-clé de la reconnaissance de la forme chez l'être humain) obtenues en fMRI. Ces coordonnées conduisent à déterminer ce que Haushofer et al. [129] appellent une similarité neurologique (Figure 7.12b).

La Figure 7.12b fait clairement apparaître la dominance de la forme sur le sens dans les données de fMRI. En particulier les personnages aux bras écartés, les poissons à grandes nageoires et les avions y sont regroupés. Dans les données issues du tri on note à la fois la similitude établie et les différences reconnues : les 3 catégories se situent dans un même quadrant, mais à bonnes distances les unes des autres (les distances inter-catégories sont sensiblement plus grandes que les dispersions internes des catégories).

Cartes et Analyse sensorielle

L'analyse sensorielle étant attachée au départ à apparaître comme un recours en l'absence de métrologie instrumentale, elle a d'abord produit des représentations graphiques plutôt que cartographiques. La comparaison de

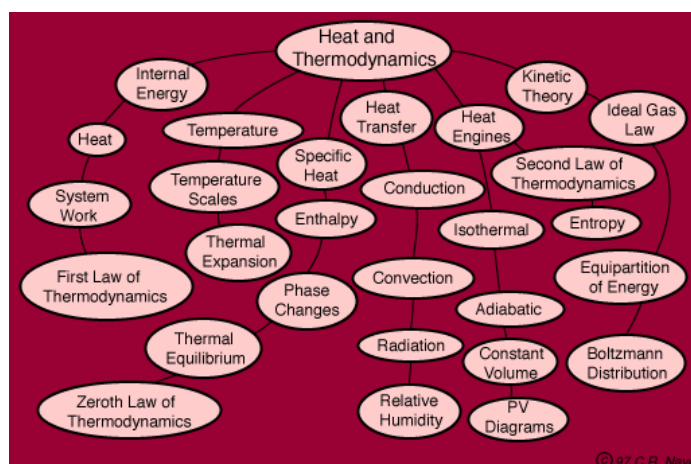


FIGURE 7.10 – L'interface utilisateur du projet *HyperPhysics* pour le thème "chaleur et thermodynamique" [217]

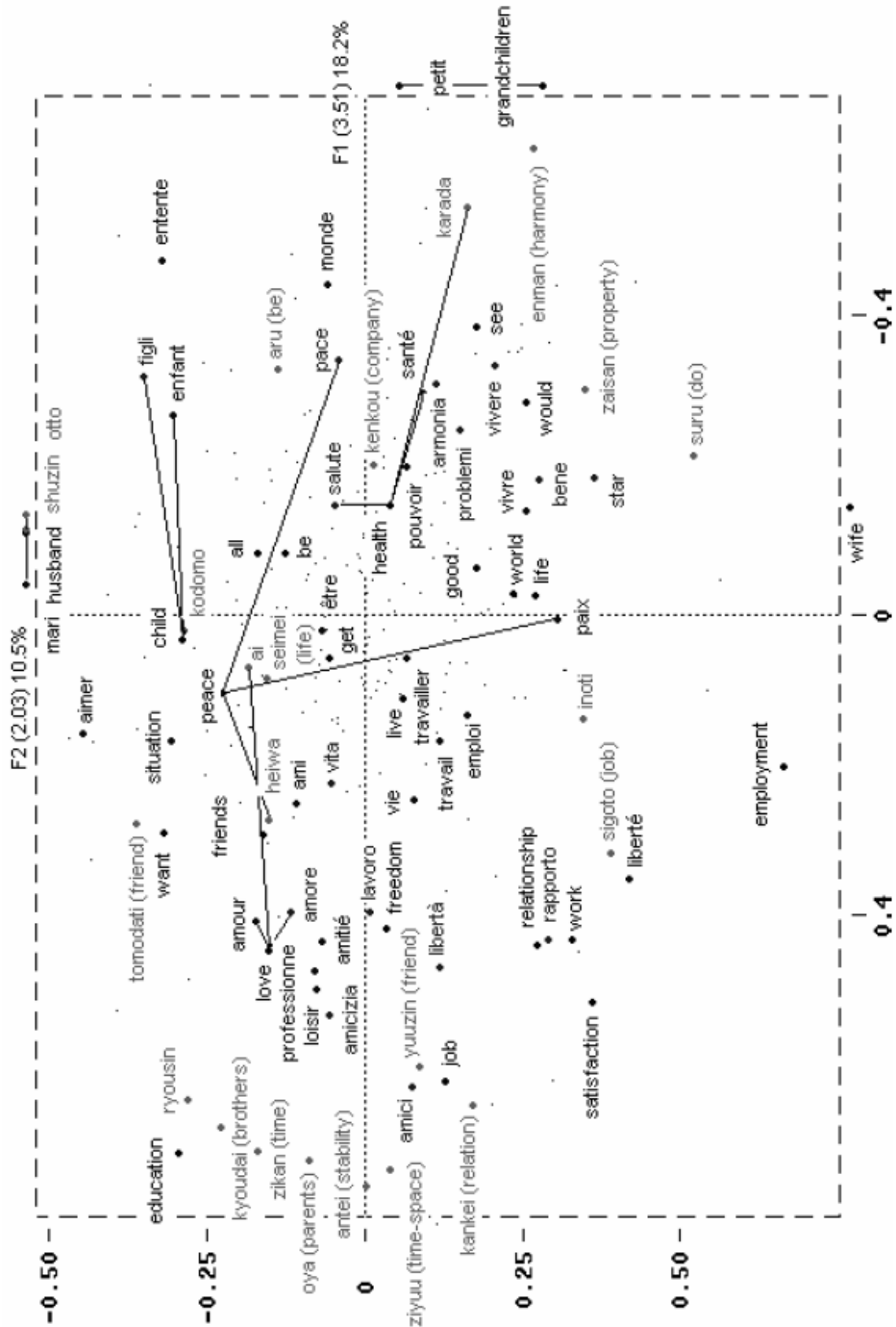
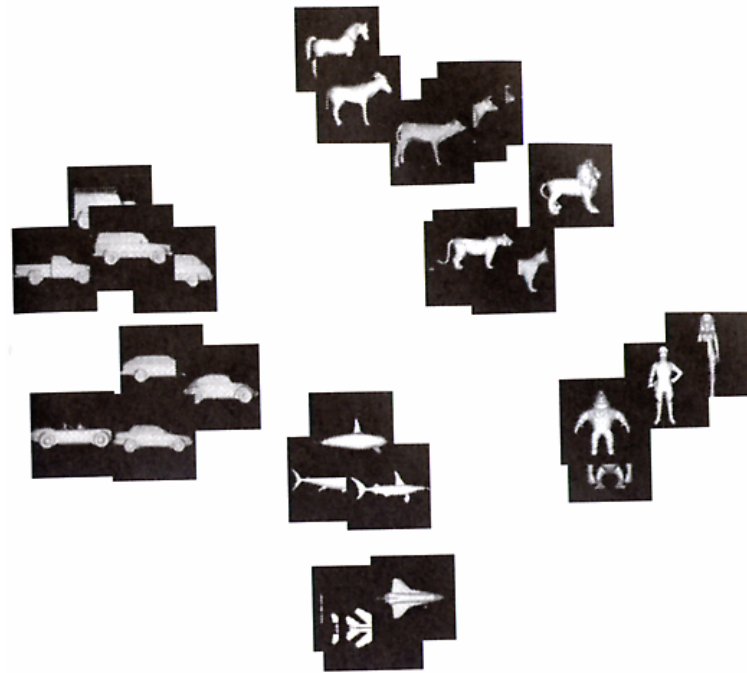
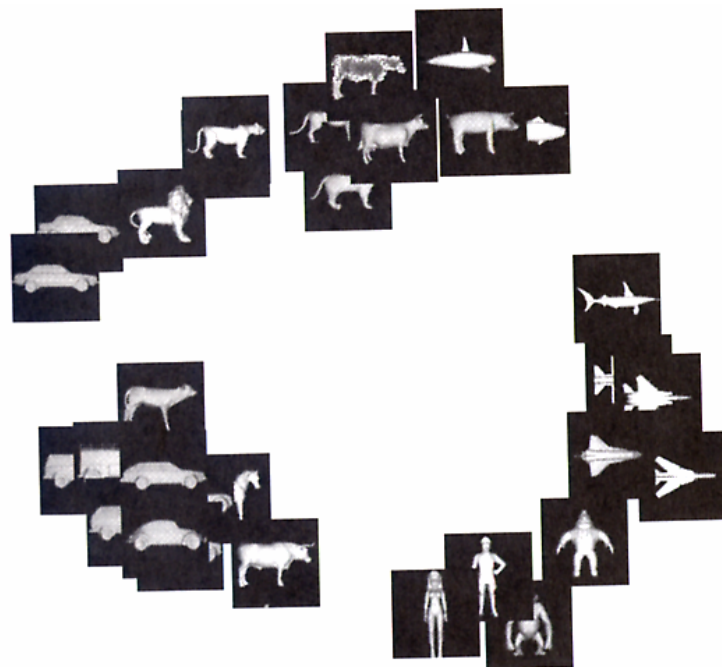


FIGURE 7.11 – Cartographie d'un corpus multilingue (voir texte) [16]



(a) traitement des résultats de tri



(b) traitement des images de fMRI

FIGURE 7.12 – Une des expériences de catégorisation d'Edelman [91]. Voir texte

données quantitatives pour un certain nombre de dimensions (descripteurs) se prête particulièrement bien à la représentation de profils, sous forme de graphes rectangulaires ou de "radars". Les cartes sont apparues avec la notion de "cartographie des préférences", qui se décline en cartographie "interne" et "externe". La première exprime la différence entre produits dans l'espace des préférences des consommateurs (par essence "naïfs" au sens de l'analyse sensorielle, c'est à dire non entraînés) et tente de la mettre en relation avec des caractéristiques sensorielles (déterminées par un jury d'experts) ou physico-chimiques, alors que la seconde utilise le cheminement inverse. Cette différence de démarche se traduit par une différence méthodologique : la cartographie interne fait appel à l'Analyse en Composantes Principales (ACP) des préférences avec projection des autres données considérées comme des variables supplémentaires, alors que l'analyse externe commence par l'ACP des données sensorielles ou physico-chimiques et effectue la régression des préférences sur les composantes principales obtenues. La Figure 7.13 montre la carte externe obtenue (dans le cadre du projet européen EUSOL) en testant les qualités organoleptiques de 16 variétés de tomates sur un panel français [39]. L'intensité de la préférence est quantifiée par le pourcentage de panelistes ayant attribué un score supérieur à la moyenne, et cartographiée au moyen d'une métaphore d'altitude (le blanc des neiges éternelles pour la valeur maximale, le vert des plaines cultivées pour les valeurs faibles!) avec superposition d'isolignes par intervalles de 10%. Une des difficultés de cette cartographie est la nécessité de bien segmenter le panel consommateur si celui-ci rassemble des individus ayant des modèles de préférence très différents (Figure 7.14). Un autre type de carte est apparu plus récemment avec le développement du *profil flash* et des approches projectives sur lesquelles nous reviendrons dans la section consacrée au *napping*. Dans tous les cas, ces cartes ne peuvent être obtenues sous cette forme que pour des produits disponibles en même temps, ce qui en réduit l'intérêt dans notre démarche d'ingénierie des matériaux.

7.3 Distances

A chaque niveau conceptuel, le type de données et la signification de la notion de distance varient. Avant d'examiner les manières possibles de transformer les distances en cartes, il nous faut examiner la manière dont les distances sont définies sur les différents niveaux.

distances symboliques, lexicales et sémantiques

Lorsque nous nous intéressons aux descriptions verbales ou textuelles collectées lors d'entretiens, nous sommes confrontés à des chaînes de caractères transcrivant éventuellement des séries de sons (niveau textuel), à des mots dotés d'une signification (niveau lexical) et à des textes véhiculant un sens complexe dans une intension précise (niveau sémantique). Chacun des niveaux possède ses propres notions de distance.

distances entre chaînes

Il est évident que dans notre travail la notion de distance entre chaînes de caractères (ensembles finis de symboles graphiques assemblés) n'est pas per-

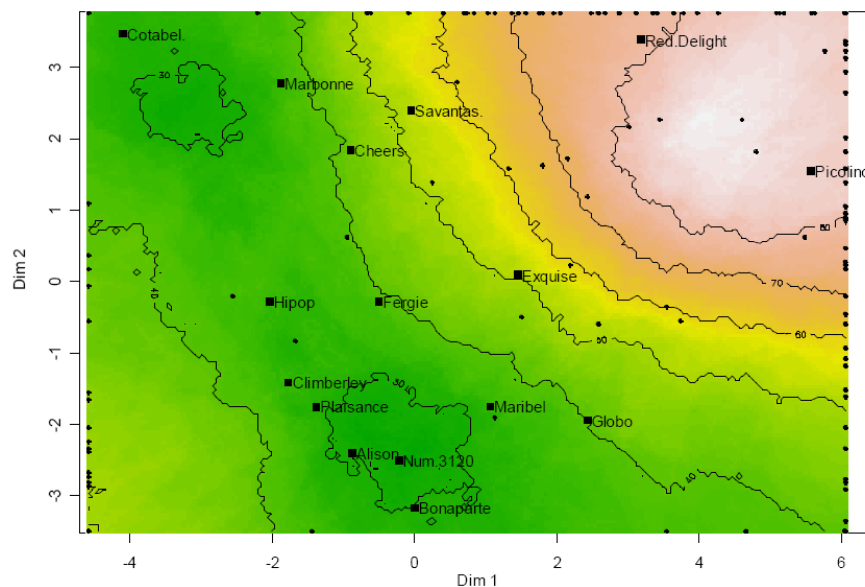


FIGURE 7.13 – Cartographie externe des préférences en France pour 16 variétés de tomates. Projection des moyennes des préférences de chaque variété sur le plan construit à partir des profils sensoriels [39].

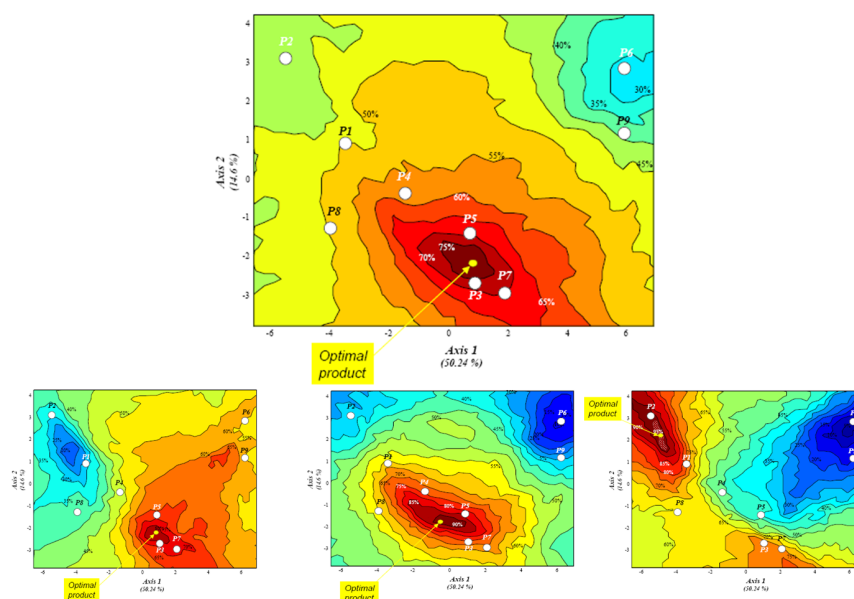


FIGURE 7.14 – Cartographie des préférences d'un panel complet (en haut) et cartographie par sous-groupes de consommateurs (en bas) faisant apparaître plusieurs "niches" [66].

tinente. Elle nous est toutefois utile pour détecter des fautes de transcription ou des duplications. C'est du reste dans le domaine de l'informatique (chaînes binaires), des bases de données et dans celui de la génétique (alignement de séquences) qu'elles sont les plus utilisées. Le lecteur intéressé pourra se reporter à la synthèse publiée par Kukich [174]. On peut toutefois noter au passage que parmi ces méthodes qui toutes utilisent le nombre d'opérations de substitution, insertion, suppression et transposition de caractères, certaines sont des métriques (distance de Hamming) et d'autres pas (distance de Jaro-Winkler). D'autres enfin autorisent plusieurs modalités qui en font ou pas des métriques, comme la distance de Damerau-Levenshtein.

distance lexicale

Avec les distances lexicales, on commence à introduire des phases de prétraitement des sources qui portent sur les termes, mais pas sur leur sens. Chaque texte est transformé en une liste de termes dont sont supprimés les termes non significatifs (articles, prépositions, nombres). Les termes restant sont éventuellement réduits à leurs radicaux (*blanc*, *blanche*, *blanches*, *blancheur*, *blanchie* se réduiraient à *blanc*). On évalue ensuite la proportion de l'information totale contenue dans le document qui est véhiculée par chaque terme, au moyen de processus statistiques : entropie (le plus grand poids étant attribué aux mots rares au total mais fréquents dans quelques documents seulement), χ^2 , fréquence d'apparition ou son inverse. L'utilisation de la fréquence d'apparition repose sur l'idée que l'importance d'un mot est proportionnelle au nombre de ses occurrences. La fréquence du mot i dans le document j vaut

$$tf_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_k n_{kj}} \quad (7.6)$$

que l'on peut pondérer pour tenir compte du fait qu'une fréquence d'apparition 10 fois supérieure ne rend pas un document 10 fois plus pertinent.

$$w = 1 + \log tf_{ij} \quad (7.7)$$

Mais il peut exister (et c'est fréquemment le cas dans le vocabulaire technique) des termes très spécifiques, employés rarement mais d'autant plus informatifs ou discriminants. Pour accentuer l'importance de ces termes on calcule le poids idf_i , qui mesure l'*informativité* du terme t_i , en divisant le nombre total de documents D par le nombre de documents dans lesquels on trouve le terme t_i

$$idf_i = \log\left(\frac{D}{|\{d_j : t_i \in d_j\}|}\right) \quad (7.8)$$

On s'intéresse également au produit des deux : $tfidf_i = tf_i \times idf_i$

Au terme d'un tel processus, un corpus de n documents, comparés sur la base d'un lexique de m mots sélectionnés, est traduit par une matrice $M_{n \times m}$ (documents \times termes) qui possède trois caractéristiques :

1. elle contient des fréquences
2. elle est de grandes dimensions

3. elle est très "clairsemée" (*sparse*, le terme anglo-saxon *sparsity* étant difficile à traduire), c'est à dire que la matrice contient d'autant plus de 0 que les documents sont sémantiquement dispersés et font appel à des vocabulaires différents. Le traitement de cette matrice brute est le domaine de l'analyse sémantique latente (LSA). Le terme "latente" rend compte de la vocation de la technique à révéler des dimensions sous-jacentes plutôt qu'à simplement illustrer les relations de co-occurrence ou proximité d'emploi entre termes. La base de la technique est la décomposition de la matrice en valeurs singulières. On obtient 3 nouvelles matrices dont le produit reconstitue la matrice initiale :
 - une matrice D décrivant les lignes (documents) comme des vecteurs dans une base de facteurs orthogonaux
 - une matrice T décrivant les colonnes (termes) de la même manière
 - une matrice diagonale S de coefficients de proportionnalité assurant la reconstruction de la matrice initiale lors du produit :

$$M_{n \times m} = TSD^T \text{ ou } D^T \text{ désigne la transposée de } D \quad (7.9)$$

La reconstruction d'un espace partiel au moyen des k premières valeurs singulières s'obtient de la même manière. Les produits $T_k S_k$ et $D_k S_k$ constituent directement une cartographie.

distance sémantique

La distance sémantique ajoute une phase d'interprétation supplémentaire du fait d'un pré-traitement qui ne se limite plus à la recherche de radicaux communs mais qui s'étend à la recherche de sens. Pour cela on ne s'intéresse plus seulement aux lexèmes mais aux unités structurales (expressions, phrases) et à l'organisation du discours à travers sa segmentation, les fonctions de ses différents composants et blocs et les moyens qu'ils mettent en oeuvre [23]. On est ici dans l'analyse de contenu et les pré-traitements peuvent être orientés en fonction d'un but précis comme par exemple la recherche de la connotation affective d'une description [99, 22]. Ainsi *ville* et *village* pourraient être différenciés malgré leurs radicaux identiques, alors qu'inversement *citron* et *orange* pourraient être rapprochés comme appartenant à une même catégorie malgré leurs radicaux différents. Par ailleurs, une attention particulière est portée aux formes grammaticales utilisées. Ainsi Dubois [86] mentionne que le verbe *pouvoir* ("une odeur qui peut être agréable ou non") et les formes pronominales ("les odeurs de mon entourage") sont très fréquemment utilisés par des sujets confrontés à la description d'odeurs, alors qu'ils ne le sont jamais dans des tests du même type portant sur des images. L'auteur en déduit que pour les sujets les images ont une réalité par elles-mêmes alors que les odeurs n'existent qu'en relation à une expérience vécue.

Le calcul des distances sémantiques va donc substituer aux termes eux-même un descriptif reflétant l'appartenance à une catégories de mots :

1. verbes : factifs (actions), statifs (possession ou état), déclaratifs (affirmation), performatifs (actes en langage)
2. connecteurs : de condition (si), de causalité (puisque), d'objectif (afin que), de disjonction (soit...soit), d'opposition (mais), de comparaison (comme), de temporalité (quand), de localisation (jusqu'où)

3. pronoms : en genre et en nombre
4. modalisations permettant l'implication du sujet : de temps (hier), de lieu (ici), de manière (ensemble), d'affirmation (certainement), de doute (probablement), de négation (jamais), d'intensité (beaucoup)
5. adjectifs : objectifs (indépendants du point de vue), subjectifs (appréciation personnelle), numériques (nombres et adjectifs ordinaux ou cardinaux)
6. substantifs : regroupés en classes d'équivalents au travers d'un dictionnaire sémantique (*aluminium* et *acier* regroupés dans une classe "métal" par exemple)

Les analyses statistiques portent cette fois sur la fréquence d'apparition des catégories et sous-catégories, sur la cooccurrence des classes d'équivalents ou des catégories de mots, sur les variations de fréquence d'un mot à l'intérieur d'un document (rafales, épisodes). Des logiciels spécialisés, utilisés pour l'analyse discursive et basés sur la constitution d'univers de référence et de scénarios, permettent de tester par exemple la manière dont une description évolue lors de la prise de contact avec un matériau [211].

Les distances sont calculées comme pour l'analyse lexicale, mais sur les vecteurs issus de l'analyse sémantique.

distances psychophysiques

Comme nous l'avons signalé au chapitre 2, les données psychophysiques à traduire en termes de distance peuvent être de plusieurs types. Nous ne nous étendrons pas sur les données issues de méthodologies neurophysiologiques, le problème se ramenant au calcul de distance entre images ou entre vecteurs, deux cas qui seront détaillés plus loin. Les données issues de trois types de procédures retiennent plus particulièrement notre attention : tests de similarité par paire (*pairwise similarity*), méthodes de catégorisation et expériences de tri, telle le *napping* [226].

similarité par paire

La similarité par paire s'appuie sur le recueil de probabilités de jugement "stimuli identiques - stimuli différents". Elle diffère en cela des tests psychophysiques les plus classiques, qui sont souvent basés sur des jugements d'intensité de type "plus grand - plus petit". Ce type de tests par paires suppose que les objets présentés ne peuvent être reconnus par des critères secondaires (forme, défauts) et que la discrimination ne peut être faite que de manière holistique ou par une modalité \mathcal{P} que l'on veut étudier. On présente à plusieurs sujets des paires de stimuli (x, y) et on synthétise leurs résultats sous la forme d'une probabilité $\psi(x, y)$ telle que :

$$\psi(x, y) = \Pr[x \text{ et } y \text{ sont jugés différents selon la modalité } \mathcal{P}] \quad (7.10)$$

Parce que le positionnement des objets n'est jamais symétrique (le sujet a deux yeux, les deux objets sont forcément en deux "lieux", la lumière incidente n'est pas strictement diffuse, la stratégie de traitement du signal peut varier selon le stimulus considéré comme référence...) on considère par hypothèse

qu'il y a non pas un champ unique d'observation \mathcal{O} , mais deux champs \mathcal{O}_1 et \mathcal{O}_2 et que $(x, y) \neq (y, x)$. On teste également l'autosimilarité en présentant les paires (x, x) pour tout x . Le lecteur intéressé trouvera dans l'ouvrage édité sous la direction de Dzhafarov et Colonius [88] le fondement théorique associé à de tels dispositifs expérimentaux et en particulier la comparaison avec les modèles probabilistes thurstoniens (recourant à des distributions de probabilité standards et des règles de décision fondées sur des catégories ou des ellipses de confusion prédéterminées, voir par exemple [96]) et la discussion des propriétés qu'ils dénomment "Médialité conforme" (*regular mediality* : réciprocité des jugements de similarité de x et y lorsqu'on échange \mathcal{O}_1 et \mathcal{O}_2), "Minimalité conforme" (*regular minimality* : si il existe une fonction \mathbf{h} telle que pour tout x dans \mathcal{O}_1 $y \rightarrow \psi(x, y)$ atteint son minimum en $y = \mathbf{h}(x)$ dans \mathcal{O}_2 et une fonction \mathbf{g} définie de la même manière en remplaçant x par y et \mathcal{O}_1 par \mathcal{O}_2 , alors $\mathbf{g} \equiv \mathbf{h}^{-1}$) et "Autodissimilarité variable" (*nonconstant self-dissimilarity* : les minima de $\psi(x, y)$ pour les paires (x, y) telles que $(y = \mathbf{h}(x), x = \mathbf{g}(y))$ n'ont pas tous la même valeur. A titre d'exemple on peut citer les données de Rothkopf sur des paires de code Morse [259], dont la table 7.1 donne un extrait. Les données de cette table possèdent les caractéristiques de minimalité (les probabilités de la première diagonale sont toujours le minimum de leur ligne et de leur colonne) et d'autodissimilarité variable (les probabilités de la première diagonale sont variables). Le trait le plus notoire est cependant que la matrice n'est pas symétrique.

TABLE 7.1 – Probabilités de discrimination de paires de signaux Morse d'après Rothkopf [259] cité par Dzhafarov et al. [88]

$\psi(x, y)$	D	H	K	S	W
D	.12	.64	.19	.71	.82
H	.75	.13	.91	.63	.91
K	.27	.89	.09	.98	.67
S	.70	.41	.87	.04	.88
W	.78	.85	.71	.88	.14

La construction à partir de ces probabilités d'une distance utilisable en cartographie est problématique. La solution, dénommée métrique fechnerienne, passe par l'établissement de deux grandeurs intermédiaires \mathcal{G}_1 et \mathcal{G}_2 qui sont les plus petits arcs possibles joignant x à y et y à x dans l'espace des probabilités de similarité par paire. On peut montrer que :

$$\mathcal{G}_1(a, b) + \mathcal{G}_1(b, a) = \mathcal{G}_2(b, a) + \mathcal{G}_2(a, b) = \mathcal{G}(a, b) \quad (7.11)$$

$\mathcal{G}(a, b)$ satisfait toutes les caractéristiques d'une métrique et peut être représentée spatialement par une métaphore cartographique.

tri ou catégorisation

Quand le nombre de produits devient grand, ou que les objets peuvent être identifiés par des propriétés secondaires, il n'est pas possible de mettre en

œuvre des tests par paires. On peut alors étudier la similarité au moyens de procédures de catégorisation conduisant à un tableau de valeurs binaires. La consigne passée à t sujets est de classer N produits en constituant K groupes, $1 < K < N$. On obtient pour chaque sujet une matrice $L[t]$ de dimensions $N \times K$ ne comportant que des 1 (produit n appartient au groupe k) et des 0 (cas contraire). $L[t]$ est transformée en matrice de cooccurrence $R[t]$

$$R[t] = L[t]L[t]^T \quad (7.12)$$

$R[t]$ est une matrice $N \times N$ ne comportant que des 1 si les produits n et m appartiennent au même groupe et des 0 dans le cas contraire. On peut synthétiser les résultats des t sujets sous forme de nombre d'associations (depuis Miller [?] on sait que le nombre de fois où deux objets n'ont *pas* été groupés constitue une métrique), on transforme les données en distances en soustrayant $R[t]$ d'une matrice unité

$$D[t] = 1 - R[t] \quad (7.13)$$

napping

Le *napping* [226], antérieurement dénommée cartographie par projection (*projective mapping* [251, 252]), est une des méthodes récentes de catégorisation holistique, à rapprocher en termes d'objectifs du profil flash [62]. Elle consiste à demander à t sujets de positionner les N objets d'une collection sur un plan de dimensions finies, rectangulaire (une *nappe*) au moyen d'une consigne ouverte de type : "évaluez les ressemblances (ou dissemblances) entre plusieurs produits selon vos propres critères (ceux importants pour vous). Il n'y a ni bonnes ni mauvaises réponses". Le travail s'effectue donc en deux dimensions, contraignant les sujets à des arbitrages pour parvenir à représenter dans un plan leur modèle d'organisation. Pour archivage, la position de chaque objet est marquée sur la nappe à la fin du classement, et les coordonnées sont relevées par mesure directe dans le repère rectangulaire constitué par deux côtés perpendiculaires. On obtient donc t tableaux de taille $N \times 2$ représentant les configurations des sujets. Des coordonnées découlent directement des distances euclidiennes (alors que dans le profil flash les distances sont calculées de manière euclidienne entre *rangs*). On peut collecter en même temps des listes d'attributs (que les sujets notent sur la nappe également). Nous y ajoutons la collecte de commentaires libres sur les choix faits par les sujets [234, 31]. Les configurations consensuelles sont obtenues par la succession de deux opérations statistiques :

1. une analyse factorielle multiple (AFM) [97, 17] non normée, utilisée pour déterminer la configuration moyenne
2. une analyse procustéenne pour superposer autant que possible chaque configuration à la configuration moyenne. Celle-ci est nécessaire du fait que l'utilisation de la nappe par les sujets est libre, il n'y a donc pas nécessairement d'orientations communes, ni d'échelles communes. La méthodologie procustéenne permet de quantifier par un coefficient dénommé *RV* la distance entre configurations.

$$RV(X, Y) = \frac{tr(XX^TYY^T)}{\sqrt{tr(XX^T)tr(YY^T)}} \quad (7.14)$$

où $tr(X)$ désigne la trace de la matrice X et X^T sa transposée. Les matrices X et Y doivent être centrées par colonnes.

Une alternative est offerte par la méthode DISTATIS [2], qui conduit à des résultats équivalents.

distances entre lignes de tableaux expérimentaux

L'expérimentation conduit en général à des tableaux de données dont les lignes correspondent à des individus (échantillons, panelistes) et les colonnes des variables instrumentales (reliées ou non à la notion d'aspect) ou sensorielles. Chaque ligne ou extrait de ligne de tels tableaux peut être envisagé comme un profil ou comme un vecteur. Ces tableaux possèdent deux particularités auxquelles se heurte notre paradigme cartographique :

1. les données peuvent être de types très différents : quantitatives (mesures), catégorielles (codage numérique de la couleur des cheveux...), ordinales (rangs, niveaux, échelles d'appréciation...), binaires (vrai/faux, bon/mauvais, présent/absent), symboliques (ensembles finis de symboles ou modalités)
2. les données brutes peuvent présenter des ordres de grandeur très différents (par exemple une effusivité thermique de l'ordre de $0.07 W \cdot s^{0.5} \cdot cm^{-2} \cdot K^{-1}$, une densité de l'ordre de $1500 kg/m^3$, une teinte H exprimée sur l'intervalle $[0, 360]$, une clarté exprimée sur l'intervalle $[0, 100]$...)

On trouvera en annexe B plusieurs tableaux récapitulatifs des formules de dissimilarité applicables aux divers types de données, empruntés *in extenso* à la thèse de doctorat de Pekalska [229].

Lorsque les données sont mixtes les deux problèmes sont résolus à la fois par le recours à la distance de Gower [115] (la publication originale de Gower est basée sur un calcul de similarité) :

$$d_G(i, j) = \frac{\sum_{1 \leq k \leq v} (\delta_k(i, j) \times d_k(i, j))}{\sum_{1 \leq k \leq v} \delta_k(i, j)} \quad (7.15)$$

où $d_k(i, j)$ dépend de la nature de la variable V_k :

- si V_k est une variable logique : $d_k(i, j) = 0$ si $V_k(i) = V_k(j) = \text{VRAI}$ (ou 1), 1 sinon
- si V_k est catégorielle (possédant un nombre fini de niveaux discrets non ordonnés) : $d_k(i, j) = 0$ si $V_k(i) = V_k(j)$, 1 sinon
- si V_k est numérique : $d_k(i, j) = |V_k(i) - V_k(j)|/R_k$, où R_k est l'étendue de la variable V_k . La spécification de l'étendue est laissée à l'appréciation de l'expérimentateur par Gower : calculée sur les données ou imposée car connue par ailleurs.
- si V_k est ordinale (facteur ordonné) : Gower suggère de remplacer $V_k(i)$ par le rang $r_k(i)$ qu'elle occupe dans l'échelle du facteur (et non le rang

réel, puisqu'il y a par définition de nombreuses égalités) et de traiter la nouvelle variable comme une donnée numérique. Plus récemment Kaufman et Rousseeuw [156] préconisent de transformer les rangs r_k de Gower en $z_k(i) = (r_k(i) - 1) / (\max(r_k) - 1)$ et où les poids $\delta_k(i, j)$ prennent les valeurs suivantes :

- $\delta_k(i, j) = 0$ si au moins l'une des variables $V_k(i)$ ou $V_k(j)$ manque
- $\delta_k(i, j) = 0$ pour les variables binaires avec $V_k(i) = V_k(j) = 0$ ou FAUX
- $\delta_k(i, j) = 1$ dans tous les autres cas

Le lecteur intéressé trouvera dans [117] la preuve que la distance de Gower constitue une métrique non-euclidienne. Cette expression de la distance n'est cependant pas la seule, et on trouvera dans [229] une présentation de formulations alternatives par Cox [56] et Tversky [302].

Lorsque les données sont toutes numériques les mesures de distance les plus courantes appartiennent à la famille dite l_p dont l'écriture générale est :

$$d_p(x, y) = \|x - y\|_p = \left\{ \sum_1^m (x_i - y_i)^p \right\}^{1/p} \text{ avec } p \geq 1 \quad (7.16)$$

Une liste de ces expressions de distance est donnée en annexe B.

distances entre images

Nous avons vu au cours des chapitres précédents que les images possèdent plusieurs statuts dans le domaine de l'aspect :

1. elles peuvent être le stimulus, comme dans les travaux du type de ceux de Ferwerda [230, 103, 102],
2. elles peuvent contenir l'information, comme dans nos travaux sur la transparence (Figure 3.19). Dans ce cas le calcul de distances entre images peut nous dispenser d'extraire l'information chiffrée qu'elles contiennent
3. elles peuvent représenter l'information au moyen d'une sémantique propre. C'est le cas des dômes, blasons et boussoles comme de tout autre graphique

A chacun de ces statuts correspond une "qualité" particulière (Figure 7.14, respectivement images de synthèse, photographies, graphiques) mais toutes possèdent la même structure : il s'agit d'un assemblage de pixels définis par leurs deux coordonnées rectangulaires (indices de ligne et de colonne) et un certain nombre p de propriétés, p pouvant prendre la valeur 1 (niveaux de gris, couleurs indexées), la valeur 3 (triplets colorimétriques) ou une valeur n quelconque (images satellites multibandes, imagerie spectrale). Les images sont donc des tableaux multidimensionnels.

Le cas des images de synthèse n'entre pas dans le cadre de ce travail. L'utilisation d'images de synthèse en psychophysique est un domaine de recherche en soi et pose de nombreux problèmes méthodologiques et théoriques. Il semble que ce type d'approche tende à se généraliser, ce qui est compréhensible du fait de la facilité (en temps et coût) qu'il y a à produire les stimuli.

Mais en remplaçant les phénomènes réels par des représentations considérées comme acceptables *a priori* par les chercheurs, on ne reformule pas forcément les questions : en utilisant des images de billes brillantes on prétend étudier la perception du brillant et non celle d'images représentant le brillant.

Le cas des images normalisées destinées à l'archivage ramène à la problématique de la "fouille d'images" qui génère une littérature très abondante, en particulier sur le thème de la détection automatique de contenu sans recours à des métadonnées associées. Le problème de la notion de distance y est central, mais compliqué par le fait que les images sont de dimensions différentes, de plus acquises dans des conditions différentes et la plupart du temps inconnues. Le lecteur intéressé pourra se reporter par exemple à [261]. Le problème se simplifie pour des images appartenant à une même catégorie car les attributs à détecter sont moins nombreux et des pratiques photographiques plus ou moins conventionnelles sont associées au type de sujet photographié. C'est par exemple le cas en reconnaissance ou classification de visages. D'une manière générale, ces travaux utilisent l'Analyse en Composantes Principales pour extraire des vecteurs propres et des valeurs propres reliées aux caractéristiques du visage, et calculent ensuite des distances entre vecteurs propres dans l'espace obtenu (voir par exemple [120, 233]). Les performances des diverses formules de distance sont largement discutées dans une abondante bibliographie.

Le cas de la distance entre représentations graphiques standardisées est encore plus simple : la géométrie, l'échelle et la charte graphique sont fixées et parfaitement reproductibles d'une image à l'autre. Le problème se ramène donc au calcul de la distance entre deux matrices puisque tout pixel d'une image possède un strict homologue spatial dans toutes les autres images du même type. Les formules de distance les plus aisées à mettre en œuvre sont la distance de Frobenius d_F , son évolution dite distance de Yang d_Y et la distance dite AMD (pour *Assembled Matrix Distance*) qui représente une tentative de généralisation et de paramétrisation :

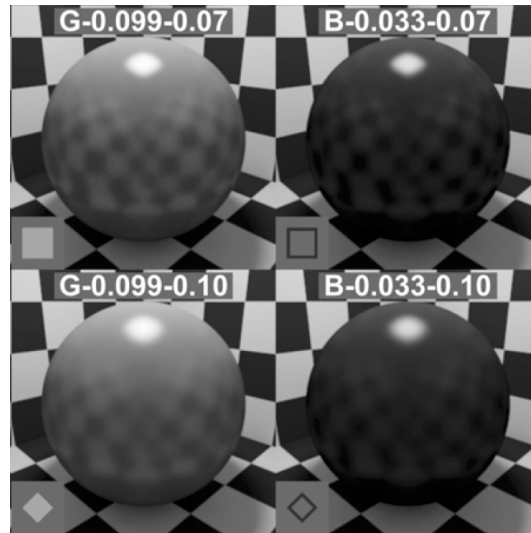
$$A = (a_{ij})_{m \times d}; B = (b_{ij})_{m \times d}$$

$$d_F(A, B) = \left(\sum_{1 \leq i \leq m} \sum_{1 \leq j \leq d} (a_{ij} - b_{ij})^2 \right)^{1/2} \quad (7.17)$$

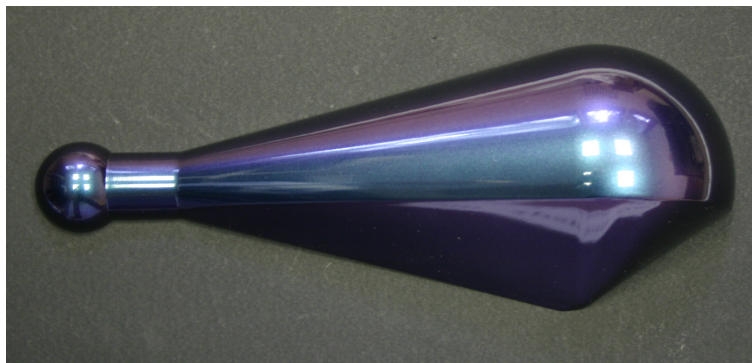
$$d_Y(A, B) = \sum_{1 \leq j \leq d} \left(\sum_{1 \leq i \leq m} (a_{ij} - b_{ij})^2 \right)^{1/2} \quad (7.18)$$

$$d_{AMD}(A, B) = \left(\sum_{1 \leq j \leq d} \left(\sum_{1 \leq i \leq m} (a_{ij} - b_{ij})^2 \right)^{1/2p} \right)^{1/p} \quad (7.19)$$

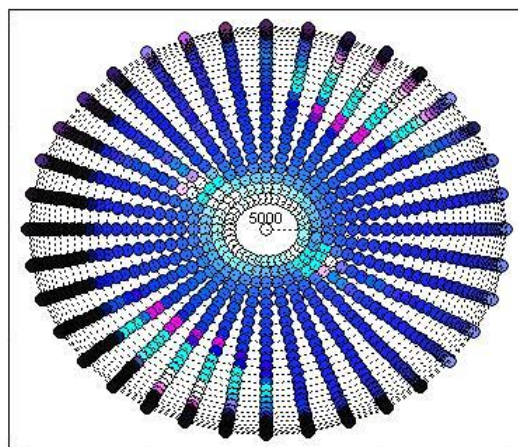
Etudiant les notions de distance et de dissimilarité entre pavages d'un espace à 2 dimensions par des cellules (domaines) dans le cadre des techniques de segmentation d'images, Gavet et Pinoli [110] proposent 11 critères de dissimilarité qu'ils répartissent en trois catégories selon qu'il sont basés sur le calcul de distance entre pixels, sur la différence ensembliste ou sur des opérations entre voisinages de pixels.



(a) image de synthèse : stimulus pour l'évaluation du brillant [230]



(b) pièce de référence de la matériauthèque 2PSM



(c) graphique : dôme colorimétrique (chapitre 6.3)

FIGURE 7.15 – Trois types d'images véhiculant une information sur l'aspect visuel

7.4 Des distances aux cartes

Une fois les distances ou dissimilarités établies entre profils de données, il s'agit d'incorporer ces données dans une représentation (ce que les anglosaxons désignent par *embedding of distances in maps*). Cette tâche est moins triviale qu'il y paraît car les méthodes pour y parvenir sont nombreuses, n'utilisent pas les mêmes données et ne les traduisent pas de la même manière. Elles ne conduisent donc pas au même résultat visuel, mais ceci n'est finalement pas plus troublant que l'existence de multiples représentations de la surface du globe terrestre...

L'incorporation d'informations de disparité dans une représentation en deux ou trois dimensions est possible au moyen d'un grand nombre de méthodes qui diffèrent par :

- le choix d'un critère de similitude ou de disparité : distance, similarité, dissimilarité ou co-occurrence
- le choix d'une fonction objectif
- le choix d'une stratégie (minimisation ou majorisation) et d'un algorithme d'optimisation

Parmi les méthodes les plus répandues, celles qui ont retenu notre attention sont :

- le positionnement multidimensionnel (*Multidimensional scaling*, en abrégé "MDS") qui est la plus largement utilisée sous diverses formes, et une de ses variations dite "cartographie de Sammon" (*Sammon's mapping*)
- la visualisation des similarités (*Visualisation Of Similarities*, en abrégé "VOS")
- la méthode dite *Student-t distribution Stochastic Neighbor Embedding* (en abrégé "t-SNE")

Récemment adaptée au traitement d'informations de proximité alors qu'elle était habituellement appliquée à des données brutes, la méthode dite des cartes auto-adaptatives (*Self-Organizing Maps*, ou "SOM") est intéressante car elle constitue un pont avec les modèles de réseaux de neurones.

relations entre distances, similarité et dissimilarité

Les notions de distance et de dissimilarité sont en général reliées. Elles possèdent pourtant des propriétés différentes, dont la plus importante est leur intervalle de variation. Les dissimilarités varient sur l'intervalle fini $[0, 1]$, alors que les distances sont définies sur l'intervalle $[0, \infty[$. Le passage d'un indice de similarité S à un indice de dissimilarité D_i , et réciproquement, ne pose pas de problème en apparence dans la mesure où en théorie toute formule transformant l'accroissement de l'une en décroissance de l'autre est recevable. Ainsi, on peut utiliser par exemple

$$\begin{aligned} D_1 &= 1 - S \\ D_2 &= \sqrt{1 - S} \\ D_3 &= \sqrt{1 - S^2} \end{aligned}$$

Mais les dissimilarités ainsi obtenues ne présentent pas toujours les propriétés attendues pour des distances. Ainsi (voir les tableaux de l'annexe B), si une

similarité S a été calculée entre données binaires au moyen de la formule de Jaccard, D_3 est métrique ET euclidienne alors que D_1 n'est pas euclidienne. Calculées sur la base de la similarité de Yule, D_1 et D_3 ne sont ni métriques, ni euclidiennes. Il en va de même pour des données quantitatives.

MDS

Le positionnement multidimensionnel repose sur un ensemble de méthodes dont les prémices les plus anciennes datent de la fin des années 30. Il s'applique au traitement des dissimilarités δ_{ij} . Malgré de nombreux défauts (égale importance accordée aux grandes et aux faibles disparités, difficulté à rendre compte de l'ordre à grande distance, incapacité à détecter les effets non-linéaires, sensibilité à la présence de minima locaux...), il est très largement utilisé sous des formes diverses, et la littérature abonde en références (voir par exemple les synthèses proposées par [106, 1, 29, 294]).

Si l'on désigne par \mathbf{x}_i la position (x_i, y_i) d'un point i dans l'espace de représentation, on recherche la répartition X dans laquelle les distances $d_{X_{ij}} = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|$ respectent le plus possible l'ensemble des disparités $\hat{\delta}_{ij} = f(\delta_{ij})$ où f désigne une fonction monotone et continue. On peut considérer que la fonction f (dont la forme dépend du type de données traitées) est en quelque sorte une fonction psychophysique qui relie les δ_{ij} observées et les $\hat{\delta}_{ij}$ modélisées. Le point de savoir s'il est nécessaire pour cela que des dimensions de l'espace géométrique soient clairement reliées à des caractéristiques des stimuli sera discuté au chapitre 8. Il est à noter que la distance à incorporer n'est pas nécessairement la distance euclidienne. La méthode Isomap par exemple [289] préserve la distance géodésique, c'est à dire la plus courte courbe à la surface du nuage de points.

Pour mesurer l'adéquation de la représentation aux données, il faut disposer d'un paradigme : les plus traditionnels en MDS sont la logique des "moindres carrés" (minimisation de la somme des écarts entre "prédiction" et réalisation) et la logique probabiliste (quelle est la probabilité d'observer les disparités réelles comme une réalisation d'une fonction de X , sous l'hypothèse d'une loi de distribution des disparités). Seule l'approche des "moindres carrés" est présentée ici. Les fonctions objectif normées S_{norm} à minimiser dans ce cas ont pour forme générale

$$S_{norm} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\hat{\delta}_{ij} - d_{X_{ij}})^2}{F}} \quad (7.20)$$

ou F est un facteur d'échelle destiné à obtenir $S_{norm} \in [0, 1]$. La forme la plus simple est $F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{X_{ij}}^2$ (connue sous le nom de *Kruskall stress*).

S_{norm} vaudrait donc 0 si l'espace de représentation respectait exactement les disparités expérimentales, ce qui est un cas idéal ne se produisant qu'en utilisant $n - 1$ dimensions pour représenter n points. En pratique, on constate que $S_{norm} \leq 0.1$ peut-être considéré comme très bon, et que $S_{norm} \geq 0.15$ est inacceptable. De nombreuses publications font appel à des formules pondérées du type

$$S = \sum_{i < j}^n w_{ij} (\hat{\delta}_{ij} - d_{X_{ij}})^2 \quad (7.21)$$

dans lesquelles apparaît un poids $w_{ij} = d_{X_{ij}}^{-\alpha}$, α pouvant prendre les valeurs 0, 1 ou 2. $\alpha = 0$ correspond à la définition originale du MDS. On trouve également la forme normée de l'équation 7.21.

$$Sw_{norm} = \frac{1}{n} \sum_{i < j}^n d_{X_{ij}}^t (\hat{\delta}_{ij} - d_{X_{ij}})^2, t \in \{\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots\} \quad (7.22)$$

Mais toutes les méthodes de positionnement multidimensionnel ne recourent pas à une minimisation. La majorisation de la fonction objectif est souvent décrite comme une méthode plus robuste offrant une décroissance strictement monotone, une meilleure résistance à l'apparition de minima locaux et accessoirement des temps de calcul plus courts. Le lecteur intéressé trouvera par exemple dans [109] le détail du processus de majorisation.

Comme le signale Platt [242], le croisement de tous ces degrés de libertés (auxquels s'ajoutent le cas des matrices à 3 dimensions, celui des matrices rectangulaires, etc. . .) conduit à une prolifération d'algorithmes dont il est difficile d'évaluer les ressemblances et les performances. Le premier niveau de segmentation, seul présenté ici, concerne la typologie des données traitées :

MDS classique, ou métrique Le MDS classique est un cas particulier d'analyse en composante principale : à partir d'un espace expérimental Y entre les éléments duquel il existe un ensemble de relations de distances $d_{Y_{ij}}$, on recherche un ensemble réduit de vecteurs X pour lesquels la matrice des distances $d_{X_{ij}}$ minimise la fonction objectif $\rho(Y, X)$ telle que

$$\rho(X, Y) = \|J^T(D_X^2 - D_Y^2)J\|_F^2 \quad (7.23)$$

où J désigne une matrice destinée à centrer l'analyse ($J^T Y J$ retranche la moyenne de chaque vecteur à chaque composant de Y) et

$$\|A_{n \times m}\|_F = \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |a_{ij}|^2 \right]^{1/2} \quad (7.24)$$

est la norme de Frobenius de la matrice A .

MDS non métrique Dans le cas de données non quantitatives, comme par exemple les données ordinales, on ne s'intéresse pas aux valeurs des disparités, mais à leur ordre. On a alors recours à un algorithme itératif pour minimiser la fonction objectif qui prend la forme normée de l'équation 7.25. Cette approche non métrique est particulièrement utilisée dans le cas des espaces de perception.

$$S_{NM} = \frac{1}{\sum_{i \neq j} d_{X_{ij}}^2} \sum_{i \neq j} (\hat{\delta}_{ij} - d_{X_{ij}})^2 \quad (7.25)$$

MDS de matrices de disparité non symétriques Le cas des matrices non symétriques où $\delta_{ij} \neq \delta_{ji}$ ramène à l'approche de Dzhafarov et Colonius [88]. Si l'on ne peut pas avoir recours à la notion de distance fechnérienne (par exemple si les données ne sont pas psychophysiques, comme dans le cas de la fouille de données textuelles), la solution généralement adoptée pour pouvoir utiliser les algorithmes précédents est de moyennner les disparités réciproques (remplacer δ_{ij} par $\frac{\delta_{ij} + \delta_{ji}}{2}$). Mais l'information véhiculée par l'asymétrie est alors perdue. Des solutions itératives conservant l'asymétrie ont été formulées sur la base du *spring embedding* [171] et le lecteur intéressé en trouvera les développements dans [215, 69, 45, 46] et une synthèse dans [44].

Une autre solution est de décomposer la matrice asymétrique en une matrice symétrique Z et une matrice dite "asymétrique" L [52, 47, 98]. Z est traitée par les méthodes classiques et L fait l'objet d'un traitement spécifique.

cartes de Sammon Les cartes de Sammon [264] sont une variante de MDS métrique. La seule différence est que la normalisation se fait par rapport à la distance calculée dans l'espace des valeurs expérimentales.

VOS

Le but de la visualisation des similarités [306] est le même que celui du MDS. La méthode a été conçue pour traiter des disparités entre données non numériques et s'applique à des similarités s_{ij} dérivées d'une matrice de co-occurrence C . Si on note c_{ij} les éléments de C représentant le nombre de co-occurrences des éléments i et j , et $c_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n c_{ij}$ le nombre d'occurrences de l'élément i , on exprime la similarité comme étant la force d'association des éléments i et j (pour la discussion de ce choix voir [305]) :

$$s_{ij} = \frac{c_{ij}}{c_i c_j} \quad (7.26)$$

Si on désigne par \mathbf{x}_i la position (x_i, y_i) du point i dans l'espace de représentation, la fonction objectif à minimiser s'écrit

$$V(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n) = \sum_{i < j} s_{ij} \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|^2 \text{ avec } \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i < j} \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| = 1 \quad (7.27)$$

La contrainte d'une distance moyenne de 1 entre les points est destinée à éviter des solutions dans lesquelles tous les éléments se retrouveraient en un seul point \mathbf{x} , et ne se justifie que pour des raisons de lisibilité.

t-SNE

La méthode dite SNE a été proposée en 2002 par Hinton et Roweis [133]. Contrairement aux techniques de réduction dimensionnelle déjà citées, qui cherchent à conserver distants les points dissemblables, la méthode SNE tente de conserver proches les points semblables. Les auteurs expliquent que cela est particulièrement important quand les données sont initialement très proches d'un espace de faible dimensionnalité. Elle repose sur une approche probabiliste : la similarité entre deux points (x_i, x_j) est définie comme la probabilité conditionnelle $p_{j|i}$ que x_j soit voisin de x_i lorsque la notion de voisinage est

définie par la densité de probabilité d'une gaussienne centrée en x_i . On définit de même une probabilité conditionnelle $q_{j|i}$ dans l'espace réduit. La fonction objectif minimisée par la technique SNE prend alors la forme

$$C = \sum_i \sum_j p_{j|i} \log \frac{p_{j|i}}{q_{j|i}} \quad (7.28)$$

Mais la littérature considère que cette fonction objectif présente deux défauts : elle est difficile à optimiser et elle conduit à des représentations trop compactes. Pour remédier à ces deux défauts, Vandermaarten et Hinton [304] proposent le remplacement des probabilités conditionnelles par des probabilités conjointes dans la fonction objectif et le recours à une distribution t de Student pour la définition du voisinage. Pour un exposé détaillé de leur démarche et une approche mathématique voir [304]. Les résultats présentés par ces auteurs montrent des performances accrues par rapport à la cartographie de Sammon et à la méthode Isomap, en matière de segmentation.

le cas particulier des cartes auto-adaptatives

Mises au point par T. Kohonen [169], les cartes auto-adaptatives (SOM) représentent un type particulier de réseau de neurones dans lequel les cellules voisines entrent en compétition en interagissant latéralement et évoluent en se spécialisant dans la détection de divers signaux. Il s'agit donc principalement d'un outil de classification non-supervisée acceptant en entrée des données brutes, et à ce titre les SOM ne devraient pas être examinées ici. Mais depuis une dizaine d'année plusieurs méthodes d'adaptation des SOM au traitement de données de dissimilarité ont été proposées, sous le nom générique de DSOM (*dissimilarity-SOM*). Une présentation détaillée tant de l'algorithme initial que de son adaptation aux dissimilarités, est donnée par Tien Ho Phuoc et al [136]. Un des intérêts de ce type de représentation pour notre travail est la construction d'un espace entièrement pavé par les neurones selon une grille régulière. La difficulté principale, relatée par exemple dans [93], est le choix d'une expression de dissimilarité adaptée à la description du phénomène étudié. L'exemple donné présente de nombreux points communs avec les problèmes que nous rencontrons. Il concerne des données de spectrométrie infrarouge acquises sur des échantillons de viande hachée (qui est bien un matériau au sens du chapitre 2), représentés par 215 spectres de 100 absorbances et leur contenu (%) en graisses totales. Dans un premier temps l'auteur présente ce jeu de données à un réseau destiné à former une carte de 2×8 neurones en exprimant la dissimilarité entre spectres bruts au moyen de la norme euclidienne, et constate que la structure de la carte qu'il obtient ne correspond pas à l'ordre réel (Figure 7.16a). Il reformule alors la dissimilarité en utilisant la dérivée seconde des spectres (on utilise couramment cette méthode en spectrométrie pour révéler les caractéristiques des spectres "mous"), et obtient la carte de la Figure 7.16b.

7.5 Conclusion

A partir d'un état de l'art concernant la cartographie d'espaces non géographiques, nous avons retenu une méthodologie fondée sur la constitution de trois cartes basées sur trois collections de données :



(a) cartographie du contenu moyen en graisses pour chaque classe, basée sur les spectres bruts (noir : faible / blanc : fort)



(b) la même carte, basée sur les dérivées secondes des spectres (même codage)

FIGURE 7.16 – Utilisation d'un algorithme DSOM pour la détermination automatique d'un taux de graisse à partir de spectres d'absorption dans l'infrarouge [93]

1. une carte d'espace conceptuel basée sur le recueil d'information verbale ou écrite concernant des matériaux réels ou virtuels. Les distances sont issues d'une analyse sémantique latente, ou d'une analyse discursive. l'utilisation de données comportementales est à l'étude.
2. une carte d'espace fonctionnel, modal, liée à l'accomplissement de tâches de comparaison, de catégorisation ou de tri. les distances sont soit calculées à partir des valeurs de dissimilarité, soient mesurées empiriquement lors d'une tâche de *napping*
3. uen carte d'espace physique constituée par l'analyse d'un tableau de données instrumentales

Au stade actuel de notre travail, nous avons utilisé principalement le positionnement multidimensionnel (MDS) comme technique de traduction des distances en carte. Pour cette étape de faisabilité, ce choix a été motivé par la simplicité de l'approche et la familiarité avec cette technique dans de nombreux domaines. Nous avons étudié en parallèle plusieurs autres techniques, dont certaines sont en cours de test et d'autres seront testées dans un avenir proche.

Pour transformer ce groupe de 3 cartes en "carte d'aspect", nous devons les relier aux données de l'analyse sensorielle, hédonique ou émotionnelle.

Calibration, superposition et exemples

La pifométrie est une science très ancienne et universelle. La preuve en est que chacun vient au monde avec son propre pifomètre incorporé. Cette particularité, appelée pifogénèse, relève de la transmissibilité des acquis, et explique pourquoi le système pifométrique, au-delà de son universalité, reste sensible aux influences sociales, corporatives, voire raciales.

anonyme, Système d'Unités Pifométrique, 1^{er} (?) avril 1996

Nous nous intéressons ici aux *cartes physiques* bâties en incorporant dans un espace \mathcal{E} de dimension 2 les distances entre vecteurs-lignes d'un tableau de données instrumentales multivariées. Elles sont destinées à révéler des structures sous-jacentes de l'organisation des données instrumentales, et parmi elles des trajectoires reliant des échantillons selon une eprogression monotone. Une fois ces structures identifiées, la transformation des cartes en *cartes d'aspect* requiert de les graduer en utilisant les résultats de l'évaluation sensorielle, hédonique ou émotionnelle des matériaux. Le caractère explicatif n'est pas recherché *per se*, l'accent étant mis sur le caractère prédictif.

Ceci repose sur l'hypothèse, développée en détail par exemple dans [298], que l'espace conceptuel est relié d'une part à l'espace des stimuli \mathcal{S} par une relation X et d'autre part à l'espace psychophysique \mathcal{E} par une relation Y . L'existence de ces deux relations induit une troisième relation, $Z = Y^{-1}(X)$ entre \mathcal{S} et \mathcal{E} , qui est celle que nous souhaitons exploiter.

La troisième section de ce chapitre présente des exemples obtenus dans le cadre de notre travail sur des matériaux et des stimuli variés.

8.1 Calibration

La Figure 8.1, adaptée de [88], résume le principe que nous utilisons pour la calibration des cartes, dans le cas le moins favorable d'une trajectoire tortueuse. Nous faisons l'hypothèse que les valeurs t_i attribuées sur l'échelle $[\alpha, \beta]$ d'un descripteur sont reliées par une fonction f aux longueurs mesurées sur $x(t)$ dans \mathcal{E} .

Ceci apparaît conforme à la méthode suivie par les membres des jurys :

- lors de la phase d'apprentissage, les jurés apprennent à attribuer une valeur sensorielle à un stimulus qui leur est présenté. Ils calibrent donc leur représentation interne du descripteur considéré. Que cette représentation soit linéaire ou non n'entre pas en ligne de compte
- lors de la phase de notation, les jurés encadrent un stimulus par ses deux plus proches voisins appris, ce qui détermine un ordre de grandeur, puis doivent estimer la position du stimulus à l'intérieur de l'intervalle choisi. Peu d'information est disponible sur la manière dont la peréquation est réellement réalisée.

Le recours aux courbes principales permet la modélisation des trajectoires, le long desquelles les écarts physiques sont mesurés. Lorsque ces trajectoires sont monotones, l'utilisation des coordonnées de la carte au lieu des longueurs est une simplification acceptable.

8.2 Aspect prospectif : superposition de cartes

La tentation est grande de superposer les espaces, à la manière des "couches" dans les systèmes d'information géographique, ou de la Figure 8.2 [296]. Mais parce que chaque espace possède son propre repère, il est évident que les cartes ne sont pas superposables telles quelles. Nous explorons une voie de superposition de structures via l'utilisation d'échantillons-balises formant un polygone convexe. Les techniques d'analyse de forme peuvent être utilisées pour tenter de superposer ces polygones, entraînant du même coup la déformation des espaces.

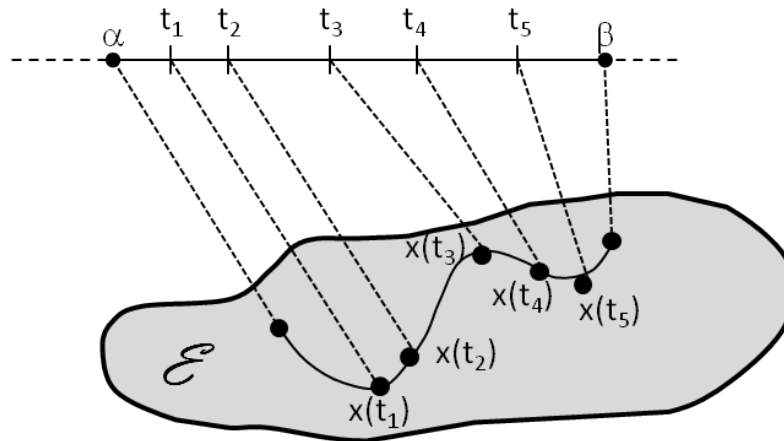


FIGURE 8.1 – Mise en relation de l'échelle psychophysique $[\alpha, \beta]$ avec l'espace physique \mathcal{E} . Représentation adaptée de [88], qui l'utilise à l'intérieur de l'espace psychophysique seulement.

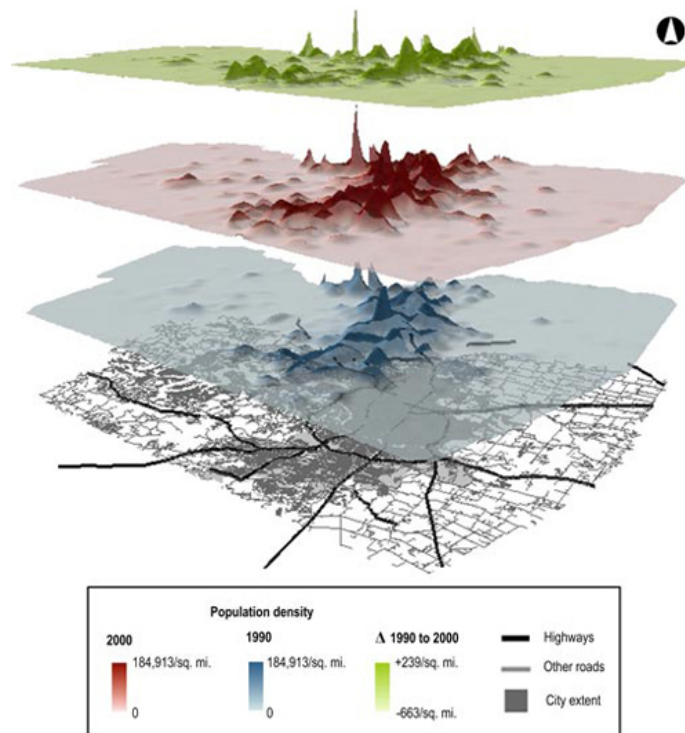


FIGURE 8.2 – Représentation multicouche de l'évolution d'une densité de population [296].

échantillons-balises

L'idée d'utiliser un sous-ensemble des lignes d'un tableau comme balises pour procéder à une transformation du tableau complet n'est pas nouvelle, mais récente [71, 242]. La technique est en particulier utilisée pour repositionner des images ou mettre en correspondances des vues prises sous des angles différents. Appliquée à notre travail, elle se justifie par la volonté :

- d'alléger les tests pour les jurés
- de trouver une transformation stable lors de l'ajout d'échantillons supplémentaires

Pour ce faire, lors de l'étude d'une collection \mathcal{C} d'échantillons, un sous-ensemble \mathcal{B} est constitué tel que :

- tous les échantillons de \mathcal{B} seront vus par l'ensemble des jurés lors de l'ensemble des tests, et mesurés par l'ensemble des techniques de caractérisation physique
- les échantillons de \mathcal{B} présentent des aspects extrêmes selon un ensemble de descripteurs, pour maximiser la probabilité qu'ils délimitent un polygone incluant tous les autres échantillons
- les échantillons de \mathcal{B} sont facilement différenciables entre eux

Une fois les trois cartes obtenues, le sous-ensemble \mathcal{B} apparaît comme trois polygones \mathcal{P}_1 , \mathcal{P}_2 et \mathcal{P}_3 . On procède à une analyse procustéenne avec trois objectifs :

- déterminer la forme moyenne $\bar{\mathcal{P}}$ et quantifier les écarts à celle-ci
- déterminer les coefficients des 3 transformations permettant de superposer \mathcal{P}_1 , \mathcal{P}_2 et \mathcal{P}_3 à $\bar{\mathcal{P}}$
- appliquer la transformation à l'ensemble des points représentant \mathcal{C} , ce qui repose sur l'hypothèse non encore vérifiée que l'ensemble du domaine contenu à l'intérieur du polygone convexe formé par les balises se déforme effectivement selon une règle unique

L'algorithme correspondant (LMDS, *Landmark MDS*) est décrit dans [71]. L'application d'un MDS classique aux échantillons-balises caractérisés par une matrice de distances D_n donne une matrice $B_n = -H_n \Delta_n H_n / 2$ (où Δ_n désigne la matrice du carré des distances et H_n la matrice de centrage telle que $(H_n)_{ij} = \delta_{ij} - 1/n$). On calcule les valeurs propres λ et les vecteurs propres \vec{v} correspondants, et ne retient que les couples correspondants aux $\lambda_i \geq 0$: $\{\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p\}$ et $\{\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_p\}$. La matrice d'incorporation des distances dans un espace à l dimensions s'écrit :

$$L = \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_1} \cdot \vec{v}_1^T \\ \sqrt{\lambda_2} \cdot \vec{v}_2^T \\ \vdots \\ \sqrt{\lambda_l} \cdot \vec{v}_l^T \end{bmatrix} \quad (8.1)$$

Tout point x peut alors être implanté sur la carte à partir de la matrice Δ_x des carrés des distances aux balises au moyen du vecteur \vec{x} :

$$\vec{x} = \frac{1}{2} L^\# (\bar{\Delta}_n - \Delta_x) \quad (8.2)$$

où $\bar{\Delta}_n$ désigne la moyenne (colonnes) de Δ_n et $L^\#$ la matrice pseudoinverse transposée de L :

$$L^\# = \begin{bmatrix} \bar{v}_1^T / \sqrt{\lambda_1} \\ \bar{v}_2^T / \sqrt{\lambda_2} \\ \vdots \\ \bar{v}_l^T / \sqrt{\lambda_l} \end{bmatrix} \quad (8.3)$$

analyse procustéenne

Etant données deux configurations \mathcal{P}_1 et \mathcal{P}_2 formées par les coordonnées de p échantillons (ou stimuli, ou résultats d'un positionnement multidimensionnel...), l'analyse procustéenne généralisée (acronyme anglo-saxon : *GPA*) consiste à rechercher les transformations qui permettent de superposer les p sommets des polygones \mathcal{P}_1 et \mathcal{P}_2 tout en conservant les distances relatives entre points de \mathcal{P}_1 et entre points \mathcal{P}_2 . Quatre types d'opérations seulement sont possibles du fait de cette contrainte : translation, réflexion, homothétie et rotation (Figure 8.12 [232]).

Le problème se ramène à minimiser les distances entre points homologues des deux configurations. On recherche s le facteur d'homothétie, T la matrice responsable de la rotation et de la réflexion et t le vecteur de translation qui permettent de superposer \mathcal{P}_2 à \mathcal{P}_1 :

$$\mathcal{P}_2 = s\mathcal{P}_1T + \mathbf{1}t' \quad \text{où } \mathbf{1} \text{ désigne un vecteur unité} \quad (8.4)$$

Le lecteur intéressé trouvera par exemple dans Commandeur [50], Perez-Nieto et al. [232] et bien sûr Gower [116] les fondements mathématiques de la méthode et les divers algorithmes associés.

8.3 Exemples de cartes physiques et de cartes d'aspect

les exemples qui suivent illustrent quelques résultats obtenus entre 2006 et 2010 sur des données variées et dans des buts divers :

- effusivités thermiques et évaluation de confort thermique
- blasons et boussoles et tri de familles de matériaux
- coordonnées trichromatiques et évaluation de vieillissement d'aspect
- coordonnées trichromatiques de mèches de cheveux et quantification des dimensions émotionnelles
- superposition d'un espace sémantique et d'un espace fonctionnel de matériaux à aspect métallique

Ils seront complétés au chapitre 9 par un dernier exemple concernant l'évaluation de deux descripteurs du *toucher soft*.

Casques cyclistes [*POSTL4*]

L'inconfort thermique est rapporté comme étant le principal facteur limitant l'utilisation des casques cyclistes. Dans une étude menée par le mensuel spécialisé *TOP Velo*, 17 casques du marché ont été testés et notés par des experts choisis par le magazine en termes de qualité de ventilation, de confort global et de satisfaction. Parallèlement, l'entreprise NeoTIM a réalisé une cartographie des échanges thermiques entre un mannequin de tête et les casques.

La cartographie des résultats est intervenue comme un démonstrateur, après l'étude et sans que celle-ci ait été dimensionnée en vue de l'application de la méthode.

matériel et méthode Chaque casque était installé successivement sur une tête en plastique installée dans une soufflerie. Ni les cheveux, ni la peau du crâne, ni le phénomène de sudation n'étaient modélisés. Les paramètres réglables étaient l'inclinaison de la tête (finalement fixée à 10°), le débit de la soufflerie (finalement fixé à $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) et la température ambiante. La température du crâne et la convection entre tête et casque étaient étudiées.

Mesures thermiques Le dispositif étant symétrique, seule la moitié de la tête était équipée de capteurs conçus par NeoTIM, au nombre de 23 et inclus légèrement en dessous de la surface de la tête pour ne pas perturber la circulation de l'air. Chaque capteur était constitué d'un palet de Kapton[®] de 30 mm de diamètre et 0.3 mm d'épaisseur comportant un élément résistif gravé en constantan et un thermocouple soudé cuivre-constantan. Le résultat final est un tableau à 17 lignes (casques) et 23 colonnes (palets) de coefficients d'échange thermiques (table 8.1, la table complète figure en Annexe C, poster numéro 2). A des fins de représentation graphique dans la revue, une interpolation biharmonique était réalisée par NeoTIM à partir des données.

TABLE 8.1 – Extrait de la table des coefficients d'échange thermique mesurés ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$). Table complète en Annexe C

	P1	P2	P3	P4	P5	...	P22	P23
A	91.5	78.1	78.5	57.8	23.7	...	125	45.7
B	36.2	80.4	66.9	64.9	57.9	...	118	183
C	92.7	78.8	73.2	72.6	64	...	111	78.9
D	113	78.6	80.9	67.1	75.1	...	131	142
E	89.3	81.2	39.1	30.3	31.4	...	117	151
F	94.2	83.3	74	78.2	26.8	...	107	78.9
G	101	27.4	46.8	54.6	26.4	...	33.6	31
H	96.5	53.3	72.3	64.5	67.3	...	99.9	41.8
I	87	82.2	79.7	103	31.8	...	138	136
J	96.2	75.3	72.6	34.6	42.8	...	87.5	67.6
K	98.5	67.5	72.1	69.2	68.1	...	118	112
L	91.6	34.1	49.7	71.4	67.9	...	107	50.9
M	96.2	93.7	72.7	68.6	76.7	...	106	124
N	91.5	76.3	58.7	32.2	30.4	...	105	48.6
O	96	71.6	72	77.5	68.6	...	109	170
P	93.5	78.4	79.6	69	71.2	...	127	149
Q	96.1	97.6	77.1	79.1	64.5	...	80.2	133

Carte thermique Le tableau des résultats bruts a fait l'objet d'un MDS métrique, toutes les données étant numériques et de plus de même nature. La Figure 8.3 présente la carte obtenue. On note une disposition triangulaire entre trois prototypes bien identifiés : en bas à droite une configuration presque uniformément "chaude", en haut au centre une configuration dans laquelle le

8.3. EXEMPLES DE CARTES PHYSIQUES ET DE CARTES D'ASPECT

front, les tempes et le sommet du crâne peinent à se refroidir et à gauche une configuration "tempes froides". Globalement, les échanges sont d'autant meilleurs qu'un casque est situé vers la gauche. Les trois "côtés" du triangle dessinent trois trajectoires d'amélioration différentes.

Calibration La Figure 8.4 présente deux calibrations différentes. A gauche, une calibration doublement globale est réalisée en rapportant pour l'ensemble des casques une des coordonnées de la carte (en abscisse) à une appréciation de satisfaction globale (en ordonnée). Elle permet de délimiter grossièrement 4 zones d'appréciation. A droite, la trajectoire correspondant à l'évolution des notes de confort thermique pour la famille de casques "tempes chaudes".

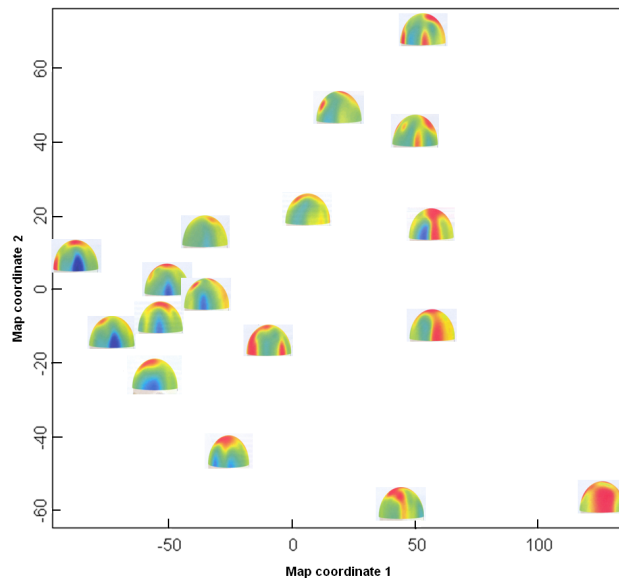
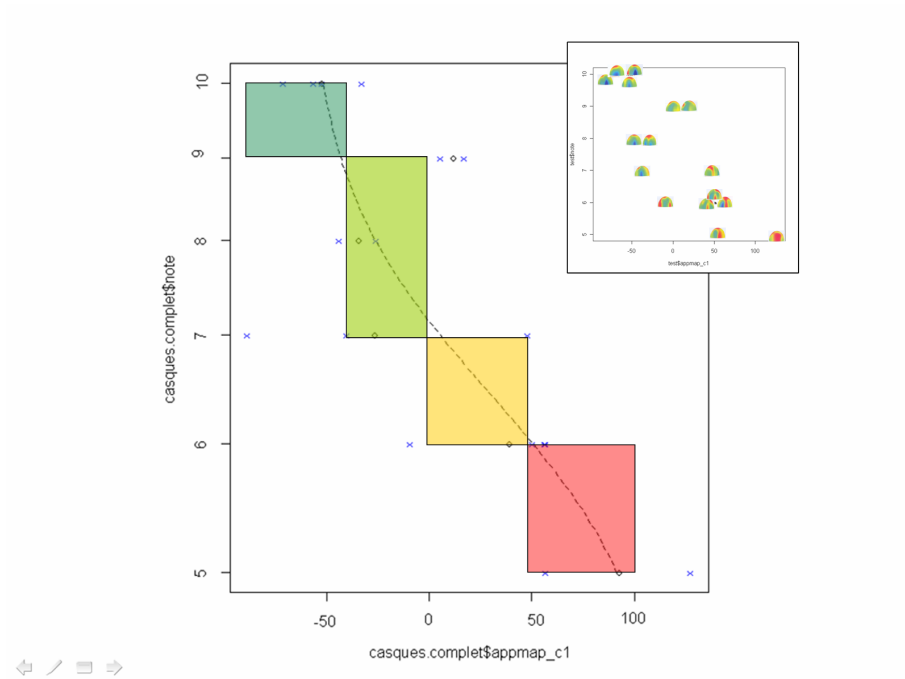


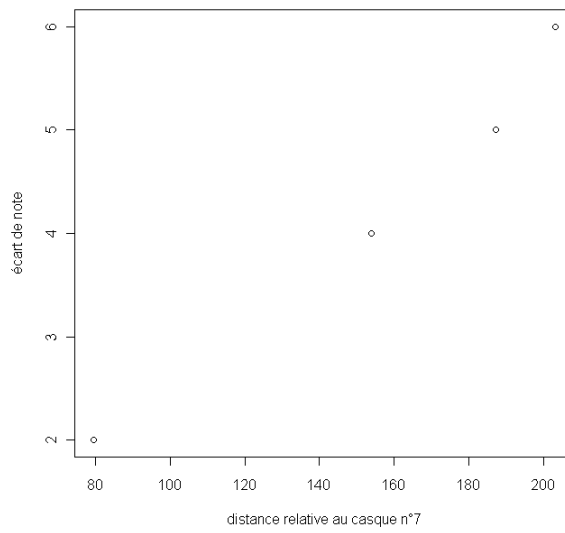
FIGURE 8.3 – Similarité thermique des 17 casques. Les images obtenues par interpolation biharmonique sont positionnées au point calculé par MDS métrique à partir des 23 coefficients mesurés

Similarité entre graphiques

Les figures 8.5 et 8.6 présentent deux exemples de cartes de similarité établies à partir des distances de Frobenius (voir chapitre 7.3) calculées entre blasons et entre boussoles. La première montre la discrimination entre blasons d'échantillons de peinture satinée (à droite), de métaux, de pigments à aspect métallique (en bas à gauche) et de pigments interférents (en haut à gauche). Dans la seconde, les 4 boussoles de gauche ont été éloignées manuellement afin d'améliorer la lisibilité (les 4 points étant quasiment confondus).



(a) Appréciation globale en fonction d'une des coordonnées de la carte thermique



(b) Ecart de note de confort thermique en fonction de la distance à l'échantillon numéro 7

FIGURE 8.4 – Calibration de la carte à l'aide de deux notes attribuées aux casques : appréciation générale et confort thermique

8.3. EXEMPLES DE CARTES PHYSIQUES ET DE CARTES D'ASPECT

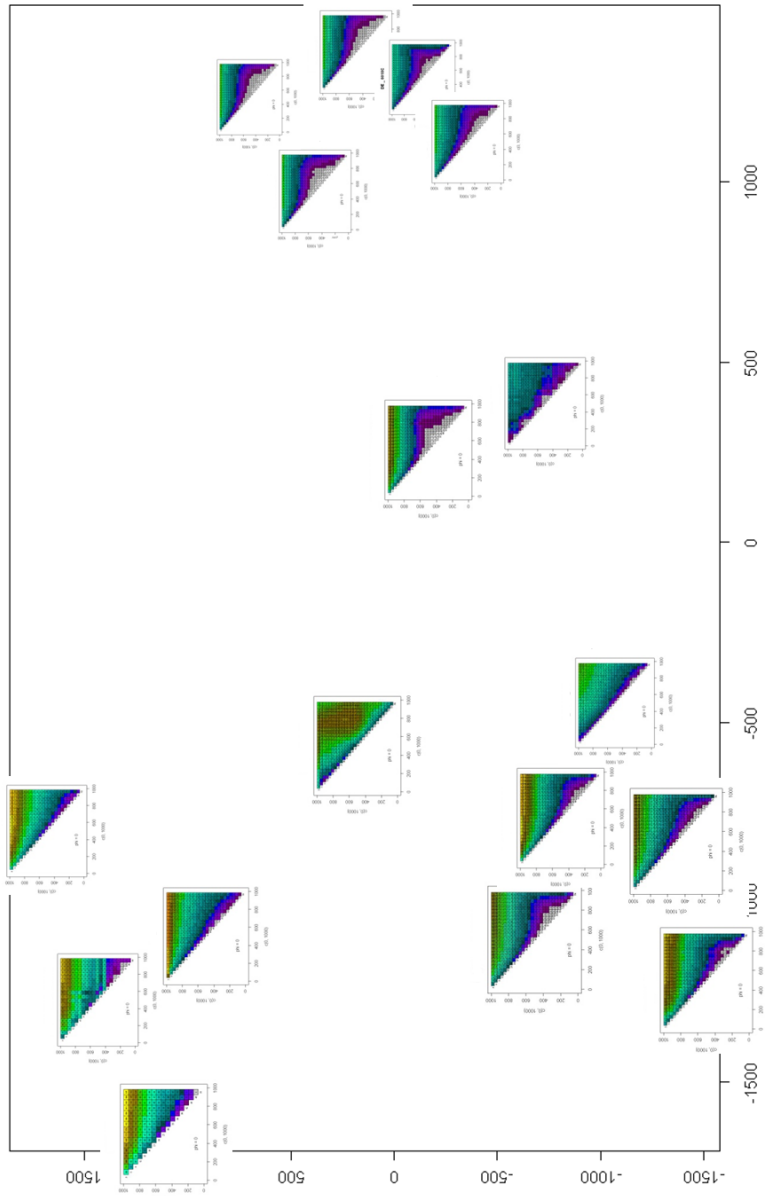


FIGURE 8.5 – Similarité entre graphiques : blasons

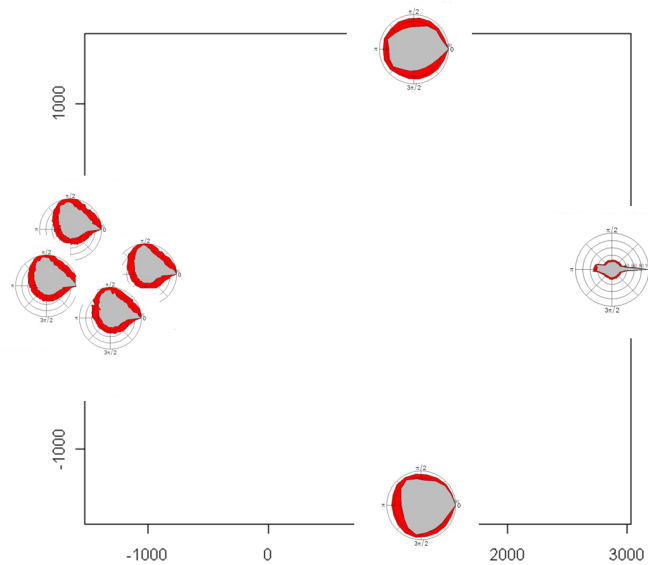


FIGURE 8.6 – Similarité entre graphiques : boussoles

Vieillessement de polymères automobiles [R31]

27 échantillons carrés (6×6 cm) de polymères d'habitacles, certains étant vieillis au moyen d'un processus artificiel accéléré et d'autres naturellement en stations d'ensoleillement, ont été analysés colorimétriquement au moyen du goniospectrocolorimètre présenté au chapitre 6 selon une méthode stratifiée à deux niveaux : en chaque point d'une grille bidimensionnelle lâche, les triplets colorimétriques ont été acquis sur un échantillon en rotation. Au final chaque point représenté sur la carte est une synthèse de 420 triplets. A l'échelle de l'échantillon, la cartographie met en évidence des différences nettes de forme, de surface et d'orientation des nuages de points obtenus (Figure 8.7, représentation simplifiée). Si on représente chaque échantillon par le centre de gravité de son aire d'extension, on obtient la carte de la Figure 8.8, sur laquelle des flèches correspondant à la couleur des échantillons relient ceux-ci par âge croissant. Il a été aisé ici de trouver une interprétation physique ou psychophysiological aux dimensions de la carte et aux trajectoires de vieillissement, mais la figure ne peut être commentée en détail pour cause de confidentialité. La Figure 8.9 présente trois calibrations de la carte physique par les notes attribuées par un jury expert en termes de satisfaction (critère hédonique), d'acceptabilité (critère de qualité) et d'intensité d'un descripteur sensoriel.

Nuancier de teintures capillaires [COL16]

Pour une étude de cas [COL16] sur la liaison entre propriétés et émotions, une collection de 7 mèches (Figure 8.10) extraites du nuancier de teintures capillaires *Crescendo* (L'Oréal) dans la gamme des châtains-roux à rouges a fait l'objet de mesures gonioscolorimétriques et d'une évaluation émotionnelle par 5 sujets masculins âgés de 25 à 50 ans. Les mesures colorimétriques ont été réalisées au moyen d'un goniomètre GON360 et d'un spectromètre MAS40 Instrument Systems, selon deux orientations perpendiculaires des mèches et

8.3. EXEMPLES DE CARTES PHYSIQUES ET DE CARTES D'ASPECT

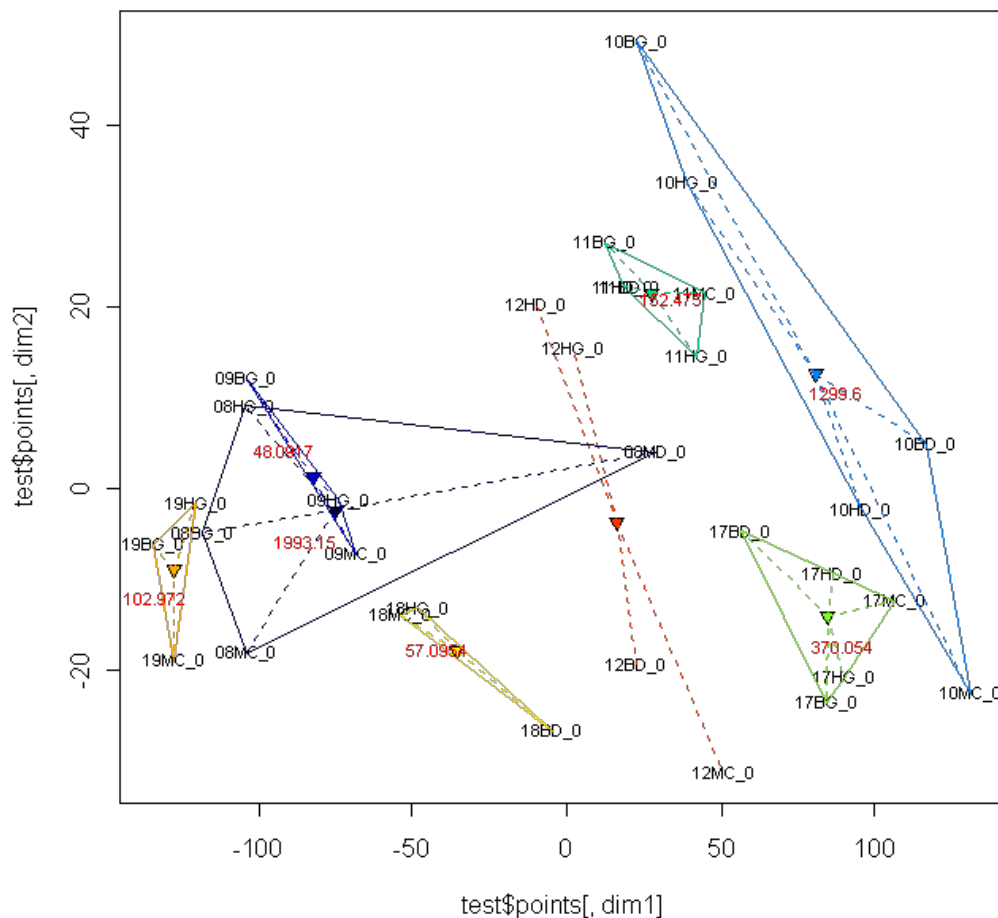


FIGURE 8.7 – Echantillons vieillis de polymères d’habitable automobile : représentation simplifiée des aires d’extension de 420 triplets colorimétriques par échantillon. Les polygones correspondent aux polygones convexes incluant l’ensemble des mesures faites sur un même échantillon. Malgré l’unicité du processus de vieillissement, on peut noter les surfaces, les formes et les allongements très différents des différents polygones

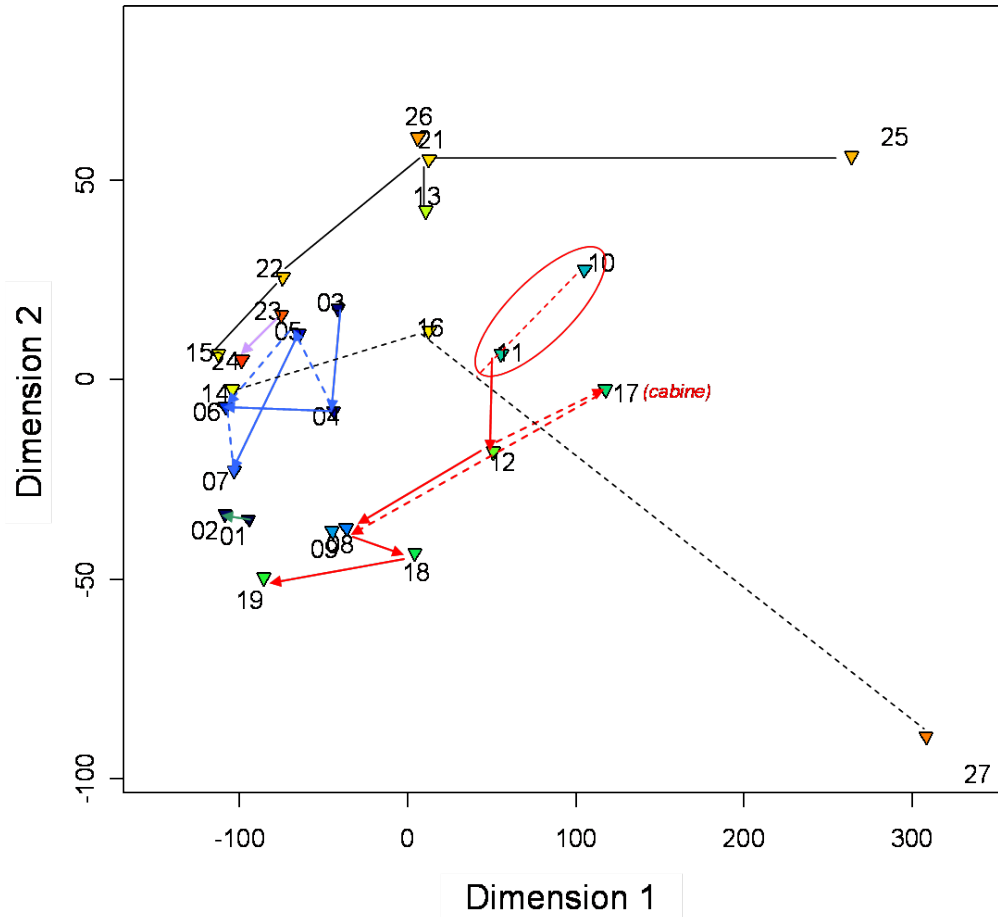


FIGURE 8.8 – Carte physique des centres de gravité des aires d'extension au sens de la Figure 8.7. La couleur des flèches indique la catégorie de couleur des échantillons, leur sens indique un âge croissant. Les lignes dépourvues de pointe joignent des échantillons dont on ignore la relation d'âge.

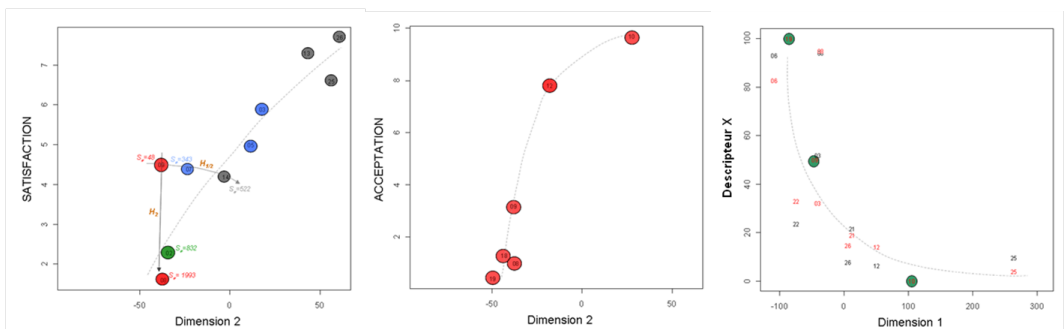


FIGURE 8.9 – Trois calibrations de l'espace physique du vieillissement. De gauche à droite : par la note de satisfaction pour un ensemble de couleurs, par la note d'acceptabilité pour une couleur, et par l'intensité d'un descripteur sensoriel dans deux situations de test (étiquettes rouges ou noires) avec pour le descripteur une référence à l'échelle d'apprentissage (en vert)

8.3. EXEMPLES DE CARTES PHYSIQUES ET DE CARTES D'ASPECTS

pour des angles d'observation dans le plan d'illumination compris entre 3 et 84° au pas de 3°. La carte physique obtenue (Figure 7.7) met en évidence avec une valeur de stress normalisé acceptable (0.104) une disposition des mèches le long d'une trajectoire allant d'une couleur de fond chatain à reflets roux à une couleur de fond rouge ne présentant presque plus aucun reflet. Cette trajectoire est particulièrement nette pour les mesures réalisées dans l'orientation dite "G" (sens longitudinal).

L'évaluation émotionnelle (tableau 8.2) a été obtenue au moyen des échelles visuelles SAM (Figure 2.3) et complétée par une phase d'expression libre destinée au recueil de vocabulaire.



FIGURE 8.10 – Les 7 mèches teintées retenues pour l'étude

TABLE 8.2 – Evaluation émotionnelle par 5 jurés masculins [COL16]

	Valence	Activation	Dominance
CU	-3.2±0.8	3.6±0.5	5.0±0.0
RG	-4.6±0.5	4.0±0.0	5.0±0.0
H645	1.6±1.1	2.0±1.0	2.4±0.5
H652	3.2±0.4	1.6±0.5	1.6±0.5
H646	-1.2±1.6	2.2±0.4	2.8±0.4
H743	-1.2±0.4	3.2±0.8	3.8±0.4
H53	3.2±0.8	0.8±0.7	1.0±0.0

La trajectoire reliant les échantillons dans le champ "G" de la Figure 7.7 ne possède pas de zéro, ni de graduation connue. Nous pouvons seulement relier les longueurs mesurées depuis l'un des points extrêmes à l'écart d'évaluation par rapport à ce point, ou la longueur mesurée entre deux points quelconques à leur écart de notation. La Figure 8.11 présente les résultats obtenus pour les trois dimensions émotionnelles. On vérifie au passage la similitude entre activation et dominance conformément à l'hypothèse avancée au chapitre 2.

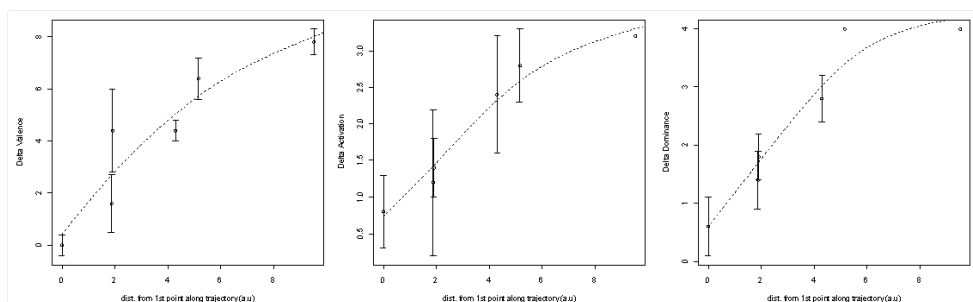


FIGURE 8.11 – Relation stimulus-réponse émotionnelle moyenne pour les 7 mèches. En abscisse : distance à un des échantillons extrêmes ; en ordonnée : à gauche écart de valence, au centre écart d'activation, à droite écart de dominance

superposition d'espaces de représentation de l'aspect métallique [PDC5, PL13]

A l'occasion d'une étude sur l'aspect métallique menée dans le cadre du groupe Sensomines [PL13], nous avons constitué dans l'esprit des études Kansei une collection de 50 échantillons d'aspect plus ou moins métallique (Figure 8.13) : feuilles et mousses de métaux traités ou non, pièces polymères décorées par métallisation, peinture ou *Insert Molding*, pièces injectées chargées dans la masse, etc. . . Ces pièces ont fait l'objet de 3 séries de tests relatifs aux 3 niveaux de représentation que nous étudions. 15 sujets âgés de 23 à 50 ans ont participé à l'étude.

Pour approcher le niveau sémantique, des descriptions libres ont été recueillies lors d'une découverte en aveugle (10 produits présentés de façon monadique séquentielle à chaque sujet dans une boîte noire), d'une tâche non dirigée de tri selon des modalités visio-tactiles (20 produits par sujet, dont les balises, aucune consigne sur les critères de tri n'étant donnée aux sujets), enfin d'une tâche de tri dirigée (20 produits également, les sujets recevant pour consigne de s'intéresser à l'aspect métallique). Ces deux tâches étaient basées sur la technique du *napping*, et utilisées également pour approcher l'organisation du niveau fonctionnel. L'étude d'un tableau de données instrumentales est en cours pour explorer le niveau physique.

La Figure 8.14 présente la superposition des espaces sémantique (en haut) et fonctionnel (en bas) après transformation procustéenne. Le polygone rouge correspond au polygone convexe formé par les échantillons-balises, la ligne verte joint, dans chaque espace, les échantillons de la collection désignés par les sujets comme prototypes de l'aspect métallique. Le choix des balises ne se révèle pas judicieux, un grand nombre de points se situant à l'extérieur de ce polygone. Le couple de balises (P12,P15) présente de plus une relation différente dans les deux espaces, signe de son statut d'intrus dans le sous-ensemble \mathcal{B} : ces deux balises sont les seules à être non planes (il s'agit de deux éléments de poignées de portières automobiles). Ceci dit, on remarque également la similitude du semis de points dans les parties "antérieure" et "postérieure" des deux niveaux, loin de la zone déformée par la mobilité des balises P12 et P15.

8.3. EXEMPLES DE CARTES PHYSIQUES ET DE CARTES D'ASPECT

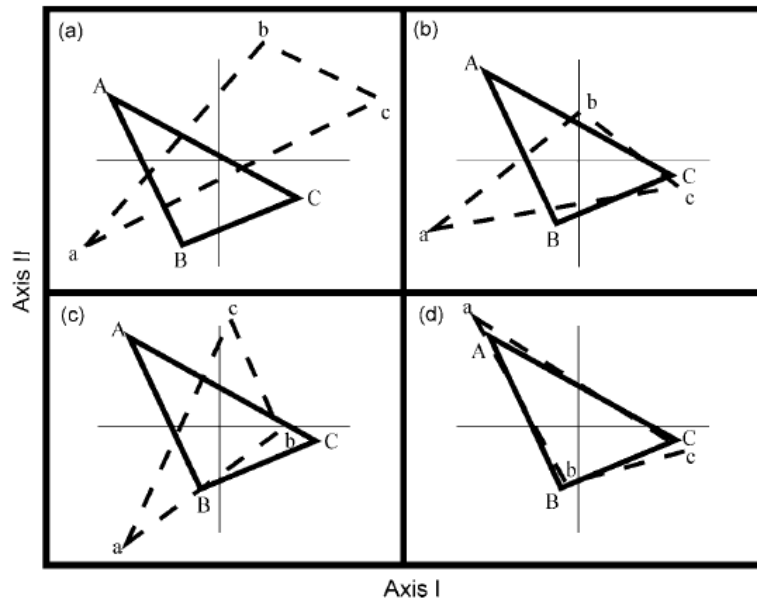


FIGURE 8.12 – Les étapes d'une transformation procustéenne superposant \widehat{abc} à \widehat{ABC} : (a) configuration de départ, (b) centrage et mise à échelle commune, (c) réflexion, (d) rotation et homothétie [232]



FIGURE 8.13 – Collection d'échantillons à aspect métallique. Références des balises indiquées en rouge (Programme "Etalons" du groupe Sensominer [PL13])

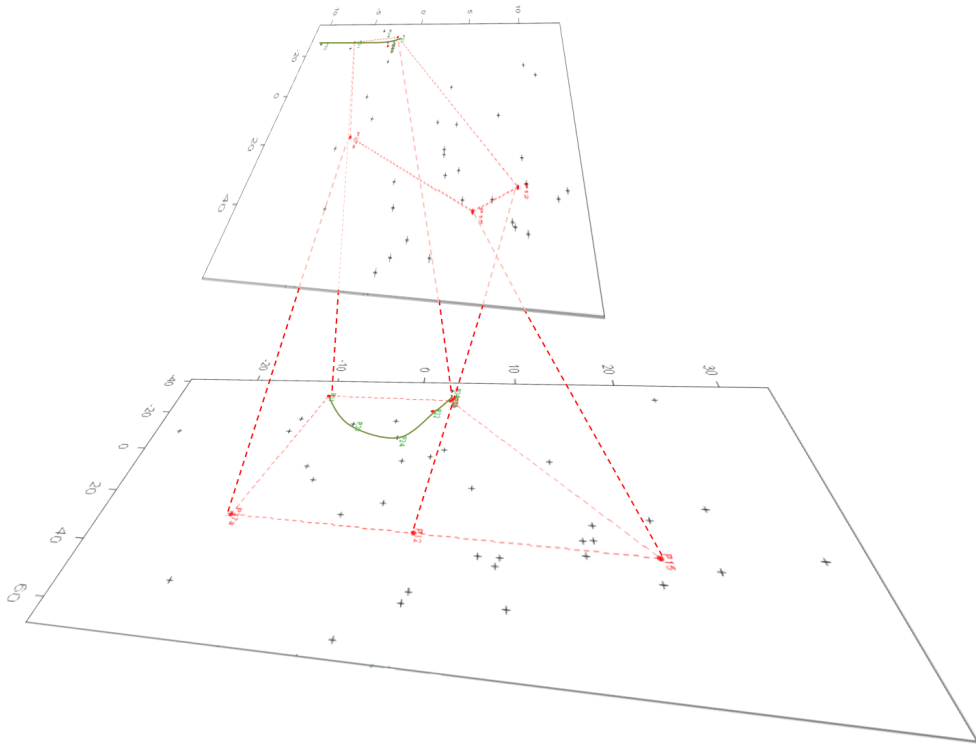


FIGURE 8.14 – Espace sémantique (en haut) et fonctionnel (en bas) de l’aspect métallique approché par une collection de 50 échantillons dont 6 balises. La ligne verte relie les échantillons désignés comme prototypes de l’aspect métallique.

Cartographier l'aspect tactile ?

On our skin are produced major electrical storms in the electricity of love.

Sandra L. Blanton, citant Manuel L. da Silva (1989)

En 2004, avant d'avoir entrepris ce travail sur la cartographie d'aspect, nous envisagions un parallèle entre colorimétrie et métrologie du toucher [COL8]. La démarche engagée depuis pour la construction de cartes d'aspect visuel semble suffisamment générale pour pouvoir être appliquée à d'autres sens. Rappelons-en les présupposés :

1. disposer de capteurs délivrant des informations structurées, c'est à dire entre lesquelles on peut établir des relations spatiales et/ou temporelles
2. être capable de produire des stimuli synthétiques
3. être capable de décrire l'observateur standard
4. être capable de décrire l'espace conceptuel et les dimensions de la perception

Nous allons examiner ici quelques éléments qui plaident en faveur de cette démarche dans le domaine du toucher digital exclusivement. C'est en effet dans ce champ tactile que se concentre l'essentiel des travaux. Les informations transmises par les capteurs cutanés sont diverses : chaud/froid, douleur, pressions diverses correspondant à des sensations statiques (poinçonnement, densité, courbure...) ou dynamiques (vibration, glissement, vitesse...). Le thème de la douleur se situe hors du champ de notre travail et ne sera pas abordé ici.

9.1 Éléments favorables

L'examen des données bibliographiques disponibles révèle plusieurs facteurs favorables : la littérature regorge de données sur les capteurs humains et artificels, sur la neurophysique et la psychophysique du toucher ainsi que sur les approches sensorielles menées dans l'industrie. Le lecteur intéressé par les aspects neurophysiques pourra se reporter à l'article de Bensmaia et Hollins [18] ou à l'ouvrage de Jones et Lederman [149]. Entre autres, des initiatives européennes (projets [297, 125] ou consortium [95]) ont fait progresser rapidement les connaissances depuis la première moitié des années 2000.

Capteurs humains

On considère actuellement que les structures dédiées à la prise d'information tactile au niveau de la peau sont au nombre de 4 et qu'elles contribuent soit isolément soit en interaction à la détection de phénomènes de pression et de vibration. La localisation (Figure 9.1 sur laquelle ne figurent ni les terminaisons nerveuses "libres" qui constituent un "chevelu" à l'interface entre derme et épiderme, ni les récepteurs liés au système pileux) et les caractéristiques fonctionnelles (tableaux 9.1 et 9.2) des 4 principaux types de récepteurs sont désormais bien connues. Le mélange de résolution locale et d'interconnexions permettant de moyennner l'information rappelle de loin l'organisation rétinienne. Comme le fait remarquer Fritschi [297], "la superposition des gammes de fréquences laisse penser que les perceptions sont causées par la corrélation des informations fournies par les différents récepteurs". Les travaux menés depuis la deuxième moitié des années 2000 par Vallbo, Olausson et leurs collaborateurs de l'Université de Göteborg ont montré que des afférents répondant beaucoup plus lentement, dénommés "afférents CT", constituent un second canal tactile associé aux zones

de la peau comportant une pilosité. L'hypothèse de ces auteurs était que ce système parallèle est impliqué dans les aspects émotionnels beaucoup plus que dans les aspects cognitifs ou moteurs [303, 222]. Cette hypothèse s'est trouvée confirmée par les travaux de McCabe et al. [200]

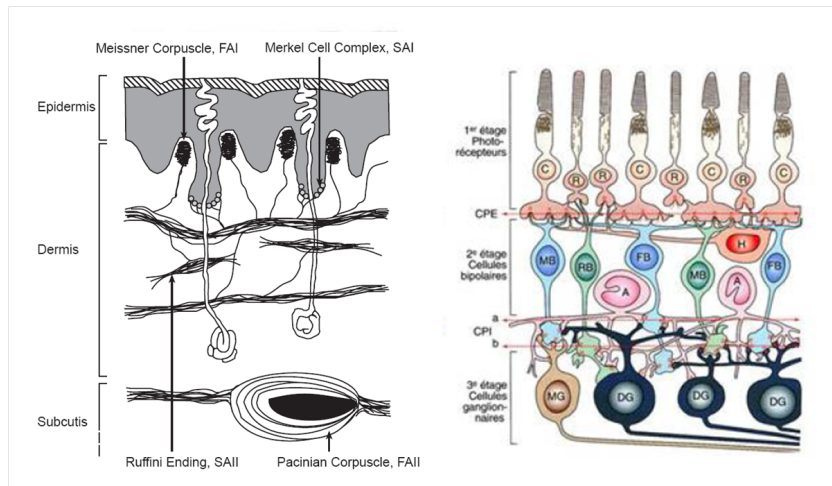


FIGURE 9.1 – Organisation des récepteurs tactiles (à gauche) et visuels (à droite)

Signaux

Signaux transmis par les afférents Les neurones sensoriels émettent deux types de signaux : certains libèrent des neurotransmetteurs, d'autres donnent naissance à un potentiel d'action (dépolérisation brutale et réversible de leur membrane cellulaire). Dans le cas du toucher, cette deuxième forme de signal a été largement étudiée depuis les années 80 et particulièrement dans la dernière décennie (Figure 9.3) [24, 25, 303, 316, 148]. Deux aspects de ces signaux retiennent l'attention des chercheurs : l'évolution du taux de décharge (le nombre d'évènements par unité de temps) et le délai (la phase) entre signaux successifs (Figure 9.2) [36].

Caract.	Corp. de Meissner	Corp. de Pacini
Localisation	Derme (surface)	Derme et sous-cutanée
Adaptation	Rapide (RA-I)	Rapide (RA-II)
Résolution spatiale	Faible	Très faible
Aire moyenne	13 mm ²	101 mm ²
Densité (extrémité du doigt)	140/cm ²	20/cm ²
Proportion	43	13
Réponse fréquentielle	10 - 200 Hz	70 - 1000 Hz
Seuil fréquentiel	40 Hz	200 - 250 Hz
Seuil de pression	0.58 mN	0.54 mN
Dimensions détectées	\vec{V} , courbure, gliss ^t	vibr., acceler., gliss ^t

TABLE 9.1 – Caractéristiques fonctionnelles des afférents à adaptation rapide

Caract.	Disques de Merkel	Terminaisons de Ruffini
Localisation	Base de l'épiderme	Derme et sous-cutanée
Adaptation	Lente (SA-I)	Lente (SA-II)
Résolution spatiale	Bonne	Assez bonne
Aire moyenne	11 mm^2	59 mm^2
Densité (extrémité du doigt)	70/ cm^2	?
Proportion	25	19
Réponse fréquentielle	0.4 - 100 Hz	0.4 - 100 Hz
Seuil fréquentiel	env. 50 Hz	env. 50 Hz
Seuil de pression	1.3 mN	7.5 mN
Dimensions détectées	courbure, pression	élongation, force

TABLE 9.2 – Caractéristiques fonctionnelles des afférents à adaptation lente. La présence de terminaisons de Ruffini à l'extrémité du doigt n'est pas certaine [228]

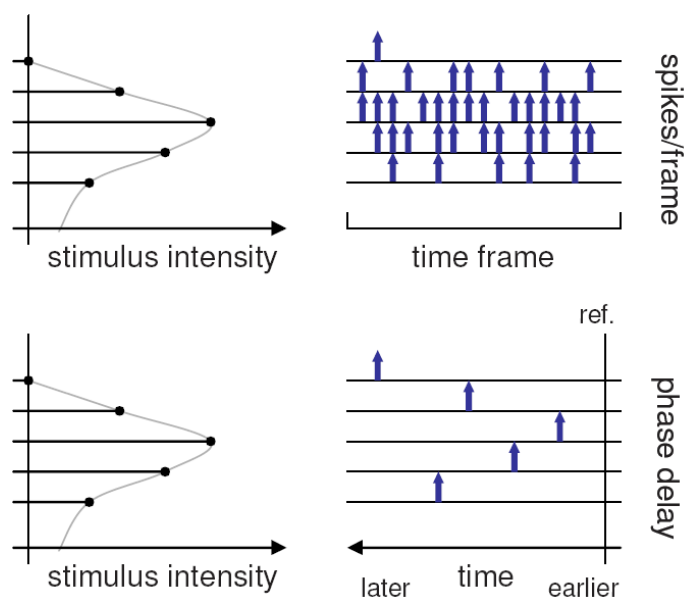


FIGURE 9.2 – Codage par le taux de décharge (en haut) et la phase (en bas) [36]

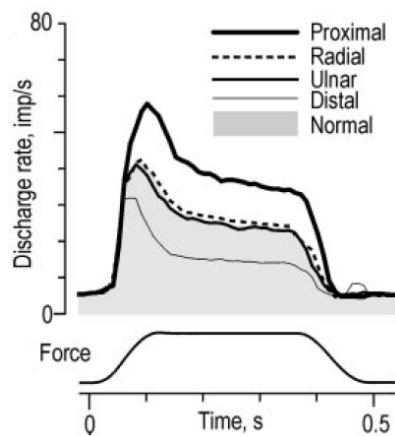


FIGURE 9.3 – Réponse moyenne de 15 afférents SA-II à l'application d'une force ayant une composante tangentielle de direction variable (convention : proximal = vers la main ; distal = vers l'extrémité ; ulnar = en direction de l'auriculaire ; radial = en direction du pouce) [25]

Signaux émis par les matériaux Par hypothèse, nous considérons les matériaux comme des "générateurs de sensations". Les signaux interprétés de manière tactile sont :

1. des signaux thermiques : la température d'un matériau n'est pas en soi une information tactile : on apprécie différemment la température d'un métal et d'un polystyrène expansé tous deux à une température de $60^{\circ}C$. . . C'est l'effusivité des matériaux qui est le paramètre pertinent, et celle-ci se traduit par un flux de chaleur à l'interface doigt-objet.
2. des signaux "mécaniques" : les matériaux en contact avec le doigt déforment plus ou moins la peau, de manière statique (force moyenne, poinçonnement local) et dynamique (spectre vibratoire).

Ces signaux peuvent-ils être modélisés sur des bases physico-réalistes ? En ce qui concerne la température, on dispose de deux types de modèles : éléments finis [75, 137] et approches numériques [134]. Les approches aux éléments finis mettent généralement l'accent sur les propriétés du doigt et les conditions environnementales lors du contact, les matériaux étant considérés comme ayant des propriétés uniquement thermiques (conductivité thermique, chaleur spécifique et densité, donc effusivité). Les approches numériques se concentrent sur l'interface et ses propriétés topographiques et mécaniques à travers la notion de *thermal contact resistance*. En termes d'ingénierie des matériaux, ceci permet de prendre en compte rugosité, dureté, humidité et présence de couches intermédiaires (sebum, gras. . .), pour prédire la dynamique de l'évolution des températures à l'interface doigt-matériau (Figure 9.4)

La modélisation des aspects mécaniques est plus complexe. Une analogie avec la colorimétrie nous inciterait à étudier le bilan énergétique du contact : force appliquée au matériau via le doigt (équivalent de l'illuminant), force restituée au doigt par le matériau (équivalent de la réflectance), phénomènes de dissipation d'énergie dans le doigt (équivalent des phénomènes d'absorption et de diffusion). En pratique, la capacité d'un matériau à indenter un doigt et la réponse des afférents sont obtenues par des modèles aux éléments finis

(Figure 9.5) [64].

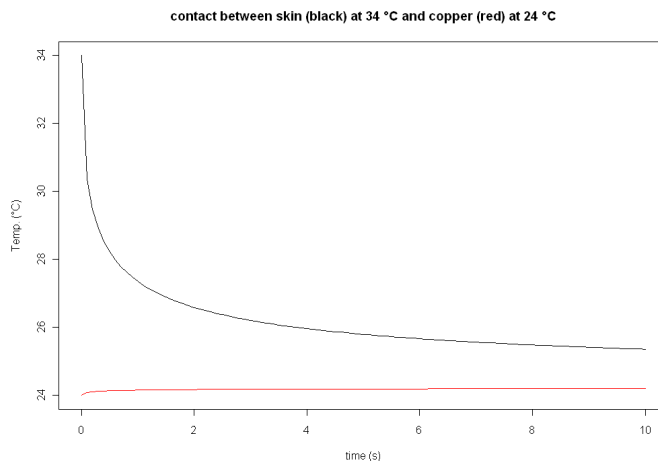


FIGURE 9.4 – Modélisation de l'évolution des températures de la peau (température initiale 34°C , en noir) et d'un métal (cuivre, $R_q = 1$, $R_{dq} = 0.125$, température initiale 24°C , en rouge). Force de contact 2N. Modèle de Ho et Jones [134]

Capteurs artificiels

De nombreux travaux ont conduit ces dernières années à la construction de capteurs artificiels. Ils sont en général développés dans le but d'instrumenter des mains artificielles, et non à des fins de caractérisation de matériaux. Leur résolution latérale et leur intégration ont rapidement augmenté dans les dernières années, pour atteindre des matrices de 4096 détecteurs et des résolutions latérales de l'ordre de quelques microns à la fin des années 90 (Figure 9.6 pour les capteurs 2D, Figure 9.7 pour les capteurs triaxiaux) ou des films continus potentiellement infinis mais de résolution moindre (quelques millimètres [278, 277]). Le lecteur intéressé pourra se reporter aux synthèses de Castellanos-Ramos et al. [37] pour les capteurs basés sur des polymères conducteurs, à celle de Kumar et al. [175] pour les utilisations des *Smart Polymers* comme capteurs ou stimulateurs. L'utilisation des OFETs (*Organic-Field Effect Transistors*) est détaillée par Manunza et Bonfiglio [196]. La Figure 9.8 présente quelques-uns des dispositifs les plus caractéristiques réalisés récemment :

- en haut à gauche : un capteur réalisé avec la technologie PCB (circuits imprimés souples). Les électrodes sont en cuivre doré, le substrat est un polyimide de 0.2 mm d'épaisseur [37].
- en haut à droite : coupes transversales schématisées dans deux cellules sensibles sur transistors organiques. A gauche une cellule détectant la pression, à droite une cellule détectant la température. Le film de base (polyimide ou poly(éthylène-naphthalate)) a une épaisseur de 75 microns, les différents dépôts ont des épaisseurs variant entre 50 et 750 nanomètres. Ces cellules sont des éléments de matrices tactiles comprenant 144 ou 256 OFETs. [277]

- en bas à droite : une coupe longitudinale dans un capteur "biomimétique" constitué d'un circuit intégré (en brun) connecté à des électrodes (en rouge) en contact avec un fluide faiblement conducteur contenu dans une "peau" viscoélastique (en bleu). Les viscosités basses conduisent à une meilleure sensibilité (de même que les faibles conductivités) et une meilleure réponse en fréquence [317]
- en bas à gauche : géométrie du capteur tri-axes "clou" du CEA-LETI, composé d'une tige, d'une membrane et de 8 jauges de contraintes piézorésistives toutes réalisées dans un monocristal de silicium [68]

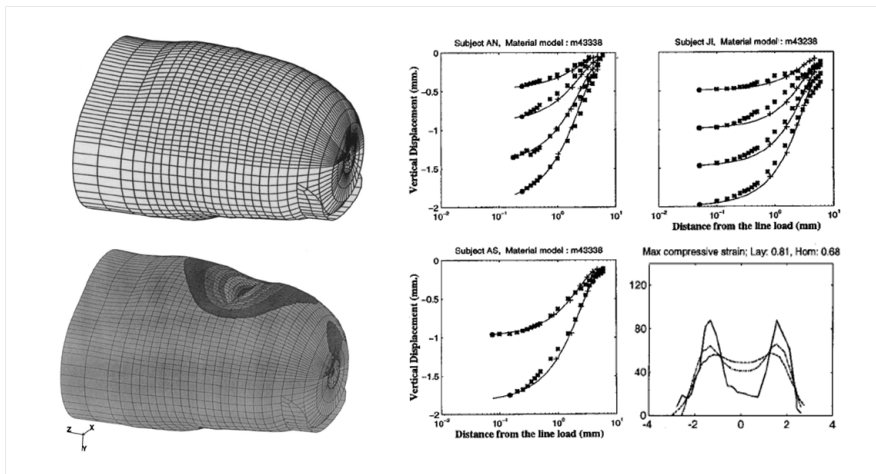


FIGURE 9.5 – Prédiction des déformations et des réponses sensorielles par un modèle aux éléments finis [64] : à gauche, maillage du doigt humain au repos (en haut) et indenté (en bas) ; à droite : déformation mesurée (points) et prédite (lignes) pour trois niveaux d'indentation (en abscisse : distance du point d'indentation, en ordonnée : déplacement vertical) ; en bas à droite : prédiction de la réponse des afférents SA-I à l'indentation par une barre de 3mm de large centrée à l'abscisse 0 (trait plein : réponse mesurée, pointillés : réponses prédites par deux modèles différents)

Modèles de transduction

Pour proposer des modèles de transduction dans le domaine tactile, les chercheurs utilisent trois paradigmes : le réalisme physiologique qui consiste à modéliser le déclenchement de l'influx nerveux par une sommation d'intensités électriques (voir par exemple [145]), l'approche psychophysiological où l'on recherche des primaires de la sensation et des fonctions de mélange [6], et le traitement du signal pour lequel il existe un filtre qui transforme le signal d'entrée en signal de sortie (par exemple [143]).

Température On connaît les courbes de transduction de la température depuis les travaux de Chen (Figure 9.9 [41]). Les modélisations plus récentes aux éléments finis [75, 137] sont venues confirmer ces résultats expérimentaux.

Indentation Les modèles de transduction de l'indentation transforment l'énergie totale transmise au matériau (*SED : Strain Energy Density*) en intensité

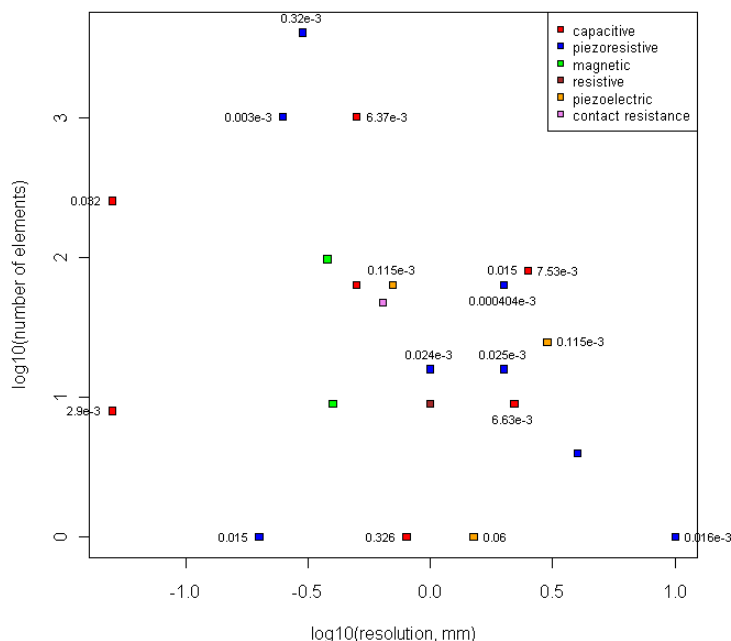


FIGURE 9.6 – Résolution et intégration des capteurs tactiles microlithographiés pour la période 1982-1997. En abscisse logarithme décimal de la résolution (mm), en ordonnée logarithme décimal du nombre d'unités sensibles par capteur, les couleurs légendées indiquent les technologies, les étiquettes donnent la sensibilité à la pression (en kPa^{-1}). Figure réalisée d'après les données de [153].

électrique. La littérature propose des ajustements de fonctions sigmoïdes [184], de filtres gaussiens [143] ou de plusieurs fonctions linéaires combinées [253].

Vibration Les projets HapSys et HAPTEX, déjà cités, ont proposé une approche par des courbes standard inspirées de celles de la colorimétrie. Se basant sur des tests psychophysiques, les auteurs [6] concluent à la possibilité de combiner deux fonctions dénommées H_{40} et H_{320} , telles que pour un spectre de fréquence $F(\omega)$ on puisse calculer deux amplitudes a_{40} et a_{320} comme :

$$\begin{aligned} a_{40} &= \int H_{40}(\omega) \cdot F(\omega) d\omega \\ a_{320} &= \int H_{320}(\omega) \cdot F(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (9.1)$$

ce qui les conduit à l'obtention des deux fonctions "de mélange" de la Figure 9.10. Se basant sur le paradigme du mélange de primaires, ils délivrent via des stimulateurs tactiles des stimuli "métamères" des spectres de fréquence complets.

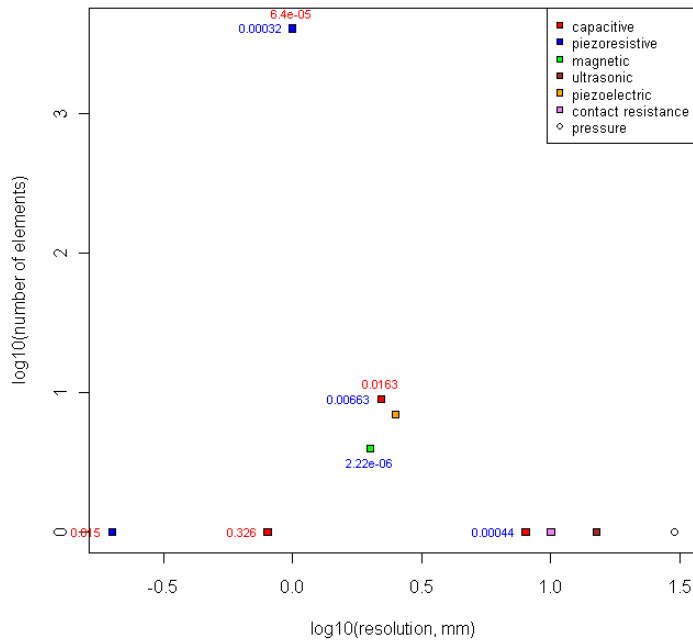


FIGURE 9.7 – Résolution et intégration des capteurs tactiles triaxiaux, même source [153], même période et même légende que Figure 9.6, excepté pour les étiquettes de sensibilité : en rouge contrainte de cisaillement, en bleu contrainte normale.

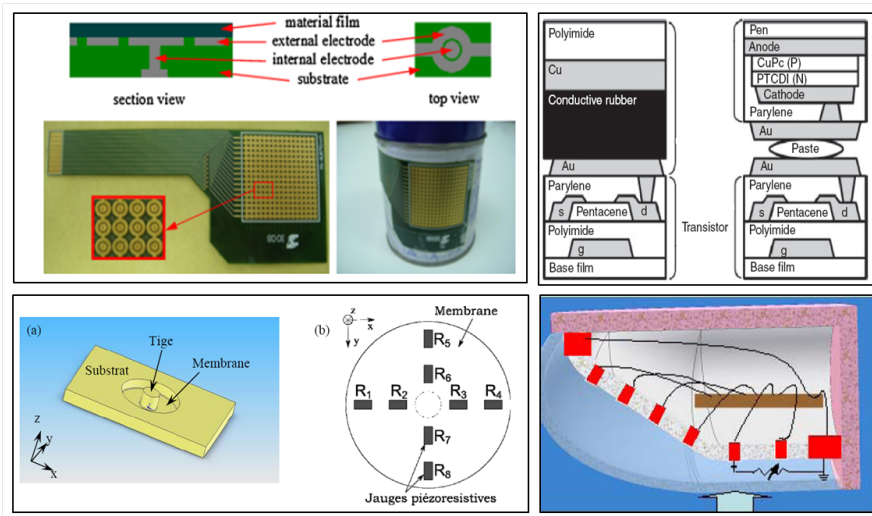


FIGURE 9.8 – Diverses configurations de capteurs tactiles récents (2005 à 2010) [37, 277, 317, 68]. Descriptions dans le texte.

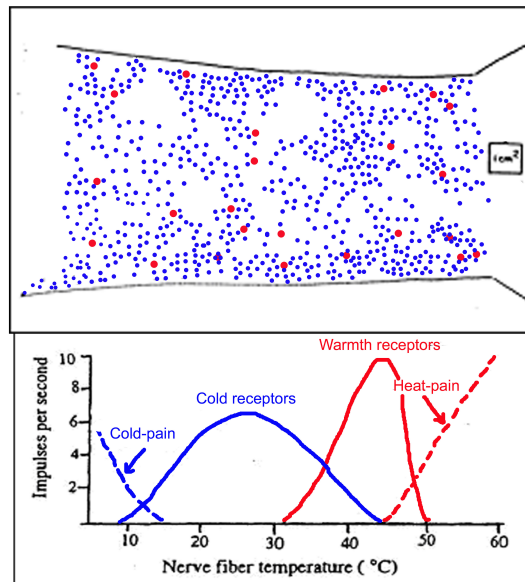


FIGURE 9.9 – Transduction de la température, d'après [41]. En haut : localisation des récepteurs sur la face intérieure du bras (bleu : sensibles au froid, rouge : sensibles au chaud)

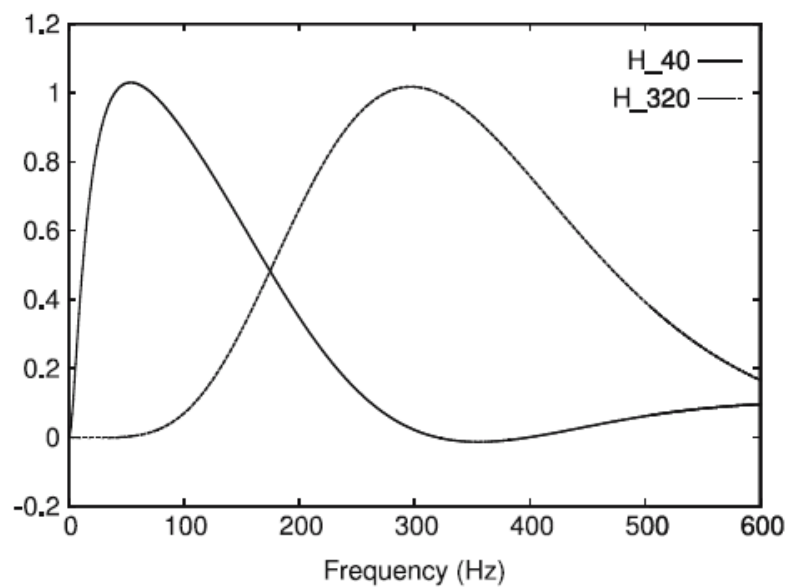


FIGURE 9.10 – Les fonctions standards proposées par le projet HAPTEX pour la transduction de la vibration [6]

Descripteurs sensoriels

Parce que les descripteurs sensoriels sont générés avec un objectif de pertinence dans un domaine d'application précis, la littérature regorge de listes de descripteurs et de travaux sur les dimensions du toucher. Leur lecture peut laisser perplexe : les approches industrielles semblent démontrer que le nombre de descripteurs utilisés pour catégoriser des matériaux avec précision est grand (le Sensotact[®] [248] mis au point par Renault pour les matériaux de l'habitacle automobile comporte 10 descripteurs (Figure 9.11) tout comme celui obtenu par Lefebvre [87] dans le cas des emballages en verre, Dillon et al. [84] en utilisent 17 pour qualifier le toucher d'une souris d'ordinateur, Pelletier et al. [231] montrent qu'il est possible de subdiviser encore plus finement la notion de relief. . .) alors que des travaux académiques menés par des chercheurs extérieurs aux sciences des matériaux restreignent le nombre de dimensions à 2, 3 ou 4 (par exemple [19]). Ceci provient principalement d'une différence de méthode et de point de vue : dans le cas des premiers on a bien une démarche fondée sur la génération libre de vocabulaire et la recherche d'un lexique consensuel, la réduction des données n'est pas primordiale. Dans le second cas il semble qu'une idée préconçue des dimensions physiques sous-jacentes soit surimposée au vocabulaire. Elle est traduite dès l'organisation des tests par la fourniture d'échelles antagonistes de notation ou *a posteriori* par l'utilisation de techniques statistiques destinées à trouver des dimensions principales. Il semble qu'une volonté de discerner des dimensions antagonistes à la manière de l'espace colorimétrique CIELAB soit à l'oeuvre : *rough/smooth-hard/soft* [19], *thickness/thinness-softness/stiffness-roughness/smoothness* [282]. Dans le cas de génération libre de vocabulaire sans phase de consensus, les vocabulaires sont très étendus malgré le recours à des experts : 45 termes différents générés dans le cas de textiles [61], 42 pour le *Soft Touch* des élastomères thermoplastiques [236]. . . La position de Picard et al. [239], qui concluent à l'importance de l'étude de l'espace sémantique, est plus nuancée et proche de la méthodologie que nous avons adoptée pour la cartographie d'aspect : génération de vocabulaire, détermination de dimensions intégrales et séparables, et traduction de groupes de propriétés physiques en propriétés perçues.

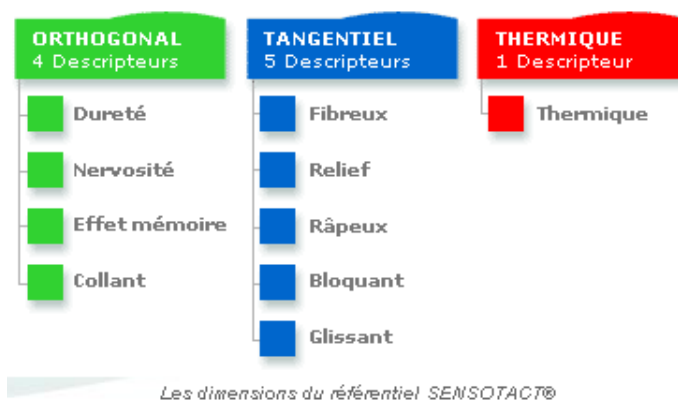


FIGURE 9.11 – Les dix descripteurs du référentiel Sensotact[®] pour les matériaux d'habitacle automobile [248].

Approches instrumentales

L'approche instrumentale du toucher ne bénéficie pas, pour l'instant, d'acquis comparables à ceux de la colorimétrie. On trouve plutôt 3 grandes tendances : une approche biomimétique qui consiste à construire des capteurs mettant en oeuvre un certain physico-réalisme, une approche mécanicienne qui tente la collecte de mesures physiques à corrélérer aux grandeurs psychophysiques, et une approche "déplacée" (au sens de "perception déplacée") qui se fonde sur la collecte de données sans rapport avec la perception mais sensées dépendre en partie des mêmes propriétés physiques.

Approche biomimétique L'ensemble des capteurs qui ont été décrits à la section "Capteurs artificiels" s'apparentent à cette approche, et nous ne revenons donc pas sur leur principe. Leur intérêt est d'être basés sur un arrangement matriciel, ce qui satisfait notre besoin de données structurées dans l'espace. Une seule publication [36] mentionne le traitement des données sur la base d'une logique asynchrone, indépendante du modèle de capteur. Mais la diffusion industrielle demeure confidentielle (les TactoPads de la société Tactologic [166, 167, 284] semblent être les seuls capteurs tri-axes disponibles sur le marché, avec des "taxels" carrés de 0.3 mm de côté espacés de 0.7 mm). Il faut également citer l'existence d'un "doigt thermique" dédié à la détermination des échanges thermiques à l'interface doigt-matériau [83], dont les résultats (Figure 9.12, à gauche) sont à comparer à ceux du modèle de la Figure 9.4.

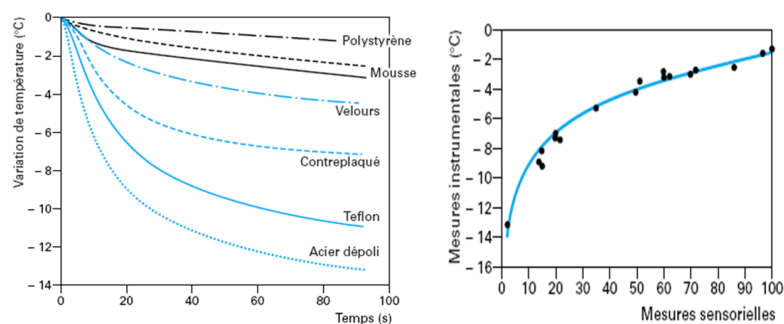


FIGURE 9.12 – Performances du "doigt thermique" [83], selon [60]. A gauche, évolution de la température à l'interface doigt-matériaux ; A droite, relation mesure instrumentale (ordonnées) - évaluation sensorielle (abscisses)

Approche mécanicienne Sans être la seule, la plus célèbre des approches mécaniciennes du toucher est sans conteste celle de la caractérisation des textiles par Kawabata [159, 157, 158]. Le *KES-F* (Kawabata Evaluation System for Fabrics) repose sur la mesure de 16 paramètres groupés en 4 classes de comportement (traction, cisaillement, flexion, compression), caractéristiques de surface (frottement, rugosité) et caractéristiques de volume (densité et épaisseur). Ces mesures sont effectuées par 4 "modules".

D'autres approches ont été tentées depuis dans le même esprit [263], allant parfois plus loin dans la délivrance de données perceptuelles à partir de la mesure de propriétés physiques (PhabrOmeter[®][227, 221]).

Approche "déplacée" Je dénomme ainsi une manière d'approcher les propriétés par analogie avec la notion de perception déplacée. Un exemple bien connu de ce type de perception est la réaction d'une personne qui se pèse : elle perçoit un chiffre s'affichant sur un cadran, mais elle réagit à ce que le chiffre représente, et non au stimulus. . .

Les approches instrumentales déplacées consistent à mesurer une propriété elle-même complexe que l'on conçoit comme dépendante des mêmes grandeurs que la propriété tactile que l'on cherche à évaluer. Il en va ainsi de la méthode triboacoustique de Zahouani et al. [319] et de la méthode spectrale de Bueno et al. [32]. Dans les deux cas le traitement d'un spectre de fréquences (capté par un tribomètre ou un micro) est mis en relation avec les propriétés tactiles activées par des phénomènes vibratoires. On réalise ainsi une mesure empirique, éventuellement corrélée mais pas nécessairement explicative. Le capteur "clou" du CEA-LETI [68] entre également dans cette catégorie d'approche et en possède pour l'instant les limites.

9.2 Démarche UPPA-EMA

Dans le cadre de la collaboration du CMGD avec l'IPREM (UMR 5254 - Institut des Sciences Analytiques et de Physico-chimie pour l'Environnement et les Matériaux) de l'Université de Pau, nous avons entrepris la conception de "TactCARD", un capteur basé sur les travaux de Thévenot et al. [291, 292].

Capteur TactCARD

On observe, lorsqu'on comprime un empilement de deux couches d'hydrogels (polyacrylamide + polyelectrolyte : PAA) dont l'une est chargée de nanoparticules sphériques de polystyrène, un effet mécanoélectrique générant une tension de l'ordre de 10 mV [COL14, COL15]. Les propriétés mécaniques et rhéologiques de gels de ce type sont par exemple discutées (dans un cadre thérapeutique) dans [307]. Ce dispositif est associé à une platine VersaTest assurant la compression, un capteur de pression AFG et un dispositif de mesure de tension National Instrument (NI-DAQ), le tout piloté par le logiciel LabView. On note que les variations de tension enregistrées présentent un profil (Figure 9.13) du type de celui de la Figure 9.3, mais avec une réponse plus lente et une relaxation plus longue.

L'idée de départ est d'étudier les signaux délivrés par ce capteur pour l'instant rudimentaire lorsqu'il est mis en contact par sa surface inférieure avec un matériau, et de comparer ces signaux avec les valeurs sensorielles attribuées aux étalons du référentiel SensoTact[®]. L'étape la plus simple à mettre en œuvre est l'étude des descripteurs statiques (orthogonaux). L'étape suivante, en cours [PDC6], est l'étude des séries de signaux délivrées par plusieurs "noeuds" d'un réseau de capteurs lors de déplacements tangentiels à la surface. Nous avons présenté en 2008 [COL15] les résultats concernant les descripteurs "dureté" et "nervosité" :

Dureté La valeur absolue de la force appliquée ne nous paraît pas une variable indépendante pertinente. Nous avons choisi de mettre en rapport l'aire

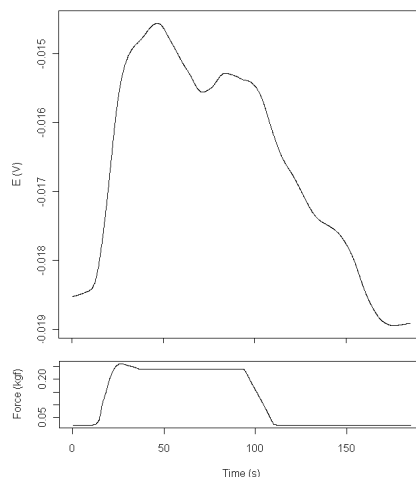


FIGURE 9.13 – Profil de tension enregistré par TactCARD sous sollicitation. En bas : profil de pression, en haut : évolution de la tension. A comparer à la Figure 9.3

du pic de tension avec celle du stimulus de pression. Nous associons à la sensation de dureté le paramètre D tel que :

$$E_a = \int U dt; W = \int F dt; D = \frac{E_a}{W} \quad (9.2)$$

Pour les étalons de dureté du Sensotact[®], on obtient la Figure 9.14. De manière reproductible, l'étalon correspondant à la dureté Sensotact 100 ne se place pas là où on l'attendrait (sur le palier supérieur de la courbe sigmoïde).

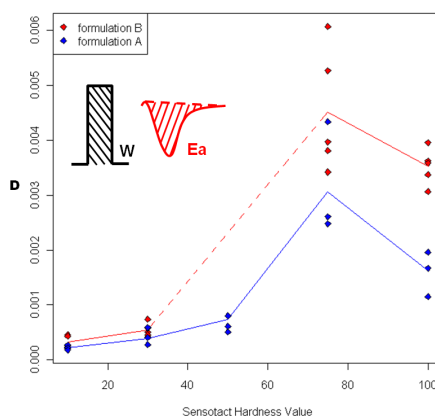


FIGURE 9.14 – Relation entre paramètre D (en ordonnée, défini par 9.2) et valeur de dureté Sensotact[®] (en abscisse), pour deux formulations d'hydrogels nanochargés

nervosité La nervosité est définie dans le référentiel Sensotact[®] comme l'intensité de la force de réaction qu'un matériau oppose à une compression par l'index. Le protocole associé consiste à presser le matériau avec l'index puis à

stopper la compression sans retirer le doigt afin d'évaluer la poussée exercée par le matériau. Nous utilisons donc le dispositif TactCARD en appliquant une pré-contrainte puis en reculant légèrement le capteur tout en le ramenant à une altitude située sous le niveau initial de la surface du matériau. Dans le cas d'un matériau "repoussant" le capteur, ceci doit conduire à une relaxation moindre que celle constatée sur la Figure 9.13. Nous nous intéressons donc à la grandeur S définie comme :

$$S = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (9.3)$$

La Figure 9.15 illustre le résultat obtenu. La pente négative est liée à la convention de polarité associée au capteur. Dans les deux cas, nous n'attendons pas de linéarité des relations, puisque le capteur mime la détection du stimulus par un organe sensoriel, et pas une perception. Nous attendons par contre une relation de type psychophysique (sigmoïde ou loi de puissance, ce que nous semblons bien obtenir.

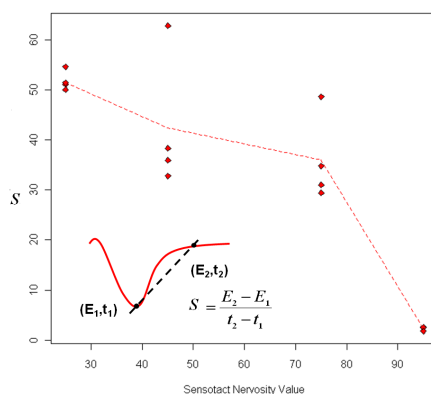


FIGURE 9.15 – Relation entre le paramètre S (en ordonnée, défini par 9.3) et valeur de nervosité Sensotact[®] (en abscisse)

9.3 Trois exemples

Toucher de matériaux à base de bois après ponçage

A l'occasion de la thèse de Ramananantoandro [TD6], nous avons étudié l'aspect tactile de matériaux reconstitués à base de bois (OSB, contreplaqué, MDF, aggloméré) poncés industriellement.

Sémantique du toucher aveugle L'espace sémantique a été exploré *via* une tâche de génération libre de vocabulaire exploitée par Analyse Factorielle des Correspondances Multiples (pour les conditions du test voir [TD6]). La Figure 9.16 illustre l'organisation révélée. Les termes qualitatifs y apparaissent en rouge, les descripteurs analogiques en vert, deux pôles hédoniques en bleu, et les granulométries des bandes de ponçage en noir. On observe deux dimensions principales dont la première, qui impacte le plus fortement le jugement hédonique, dessine une opposition entre un aspect "glacé" (lisse et froid) et une texture détectable. Le second axe organise la perception de cette texture (plus

isotrope pour les coordonnées négatives, plus fibreuse pour les coordonnées positives) au travers de l'opposition entre "sec et rapeux", associés à l'idée de contreplaqué et "piquant" en passant par "pelucheux, peau de pêche, duvet humain" qui reste peu agréable malgré la charge affective convoyée.

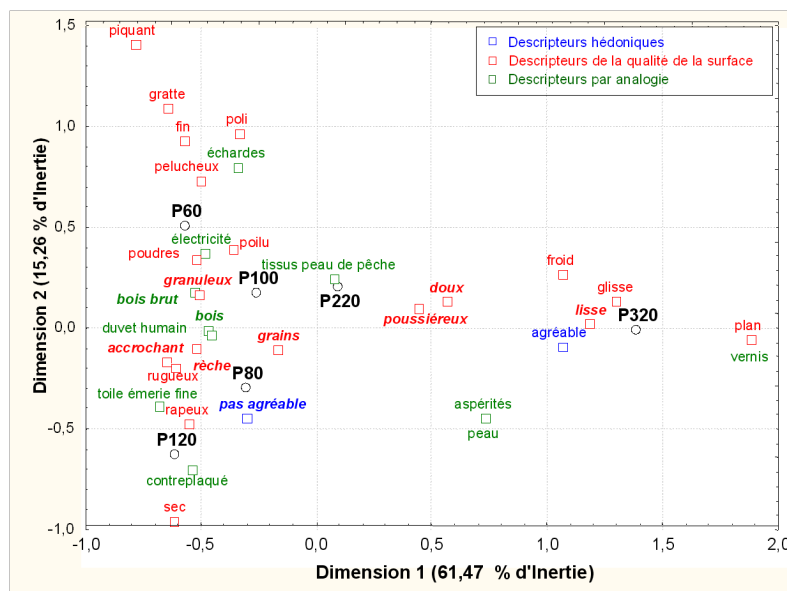


FIGURE 9.16 – Organisation sémantique d'un espace de matériaux ligneux poncés industriellement [TD6]. Commentaire dans le texte.

Interférence visiotactile dans l'évaluation de la rugosité A l'occasion du même travail, l'interférence entre modalités tactiles et visuelles dans l'appréciation de la rugosité a pu être observée au moyen d'un test de classement de la rugosité apparente tactile ou visiotactile. La Figure 9.17 met en évidence le rôle de la texture visuelle dans ce classement, les échantillons CP et OSB étant appréciés identiquement en aveugle et se différenciant lors de la tâche visiotactile. Le résultat est en apparence contre-intuitif : une dispersion colorimétrique intra-échantillon (ΔE) plus faible que celle des autres échantillons conduit à une sur-évaluation de la rugosité tactile (car on l'aurait attendue moindre), et une forte texturation de ces ΔE (veinages, zonages) conduit à la sous-évaluer .

Cécité tactile dans des mélanges de poudres

Une pré-étude exploratoire de la perception de la finesse de mélanges de poudres de quartz a été effectuée dès 2002 à l'occasion d'un stage de maîtrise [IR31]. 6 fractions granulométriques ayant été préparées par tamisage avec pour certaines un fort recouvrement (tableau 9.18), des mélanges ont été composés en associant une masse b égale de 5 des fractions à une masse s plus importante de la sixième. Trois ratio s/b ont été produits ($s/b \in \{1.19, 1.48, 2.01\}$), conduisant à une collection de 26 mélanges. Un jury constitué de 20 personnes naïves a été sollicité pour des tests aveugles portant soit sur 3 échantillons (modification de la proportion d'une seule classe granulométrique, aux 3 ratios s/b) soit sur 8 échantillons (modification de chacune

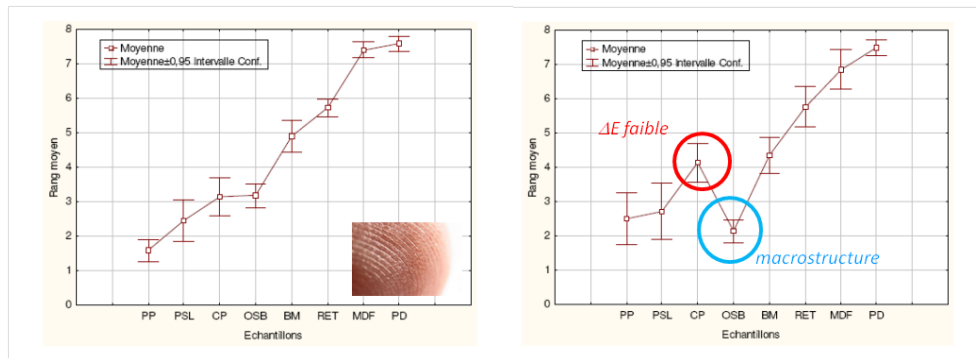


FIGURE 9.17 – Interférence visiotactile (à droite) dans l’estimation d’une rugosité (à gauche évaluation en aveugle). [TD6], voir commentaire dans le texte

des 8 classes granulométriques, au même ratio s/b). Après avoir été interrogés sur leur pratique de loisirs impliquant une sensibilité digitale particulière (musique, poterie...), les jurés ont décrit librement différences ou similarités entre échantillons en exprimant tout type de ressenti, avant de procéder à la tâche de classement pour laquelle on leur fournissait un échantillon de référence comportant une masse égale de toutes les classes granulométriques. Le geste spontanément adopté par l’ensemble des jurés était de faire rouler la poudre entre pouce et index, ce qui combine indentation et friction.

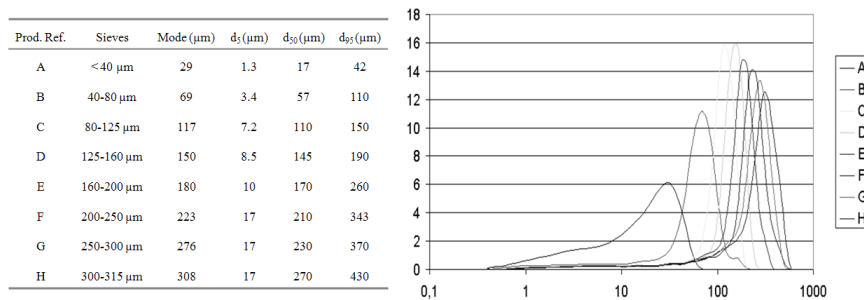


FIGURE 9.18 – Caractéristiques granulométriques des 8 fractions utilisées pour recomposer des mélanges contrôlés

Sémantique Le jury de 20 personnes a utilisé 38 termes pour qualifier les 24 produits. L’espace sémantique obtenu est triangulaire, avec aux trois sommets trois zones bien distinctes correspondant à l’idée de régularité (*compact, homogène, neutre, régulier*), à celle de grossièreté (*lourd, granuleux, épais, gros*) et à celle de finesse (*cacao, lait en poudre, poudre de riz, talc*). Au centre, une zone d’arbitrage hédonique : la *légèreté* est opposée au *collant* pour les mélanges qui ne grattent ni n’accrochent... Ainsi, le côté non agglomérant des associations de taille semble revêtir une grande importance pour nos jurés.

Cécité tactile Pour certaines tailles et ratios s/b , une fraction du jury se montre incapable de toute discrimination (Figure 9.19). Concernant les tailles ce taux atteint 70% pour les ratios les plus faibles, et descend à 15% au ratio

le plus élevé. Dans le cas des tests portant sur les ratios, on constate des variations comprises entre 7 et 40%, avec un maximum situé à proximité d'un d_{50} de 200 μm . Il est toutefois possible que ceci soit un artefact de la méthodologie de préparation utilisée, car les classes granulométriques les plus grossières présentent un assez fort recouvrement pour des tailles proches de cette valeur.

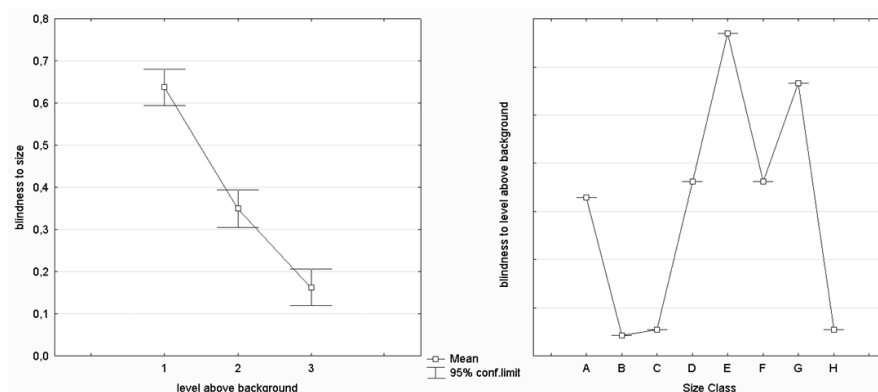


FIGURE 9.19 – Cécité tactile : à gauche à la taille en fonction du ratio s/b ; à droite : au ratio en fonction de la taille

Vernis "soft touch"

Lors d'une pré-étude effectuée à l'occasion d'un stage de DRT en Génie des Matériaux [IR39], la méthodologie des cartes d'aspect a été appliquée à un ensemble de 25 revêtements commerciaux destinés à conférer aux polymères injectés un aspect tactile dit *soft touch*. Il s'agit d'un terme vague pour qualifier une propriété généralement non quantifiée dans les fiches techniques des produits, et approchée par la dureté SHORE des matériaux [236] à l'intérieur d'une même famille de produits. Mais il existe une grande variété de formules (polyesters, acryliques, polyuréthanes et leurs combinaisons...) et d'applications (technique, épaisseur, mode de dépôt, séchage...) qu'il est difficile de les comparer, surtout en l'absence de norme en la matière.

Evaluation sensorielle Un jury de 19 personnes a été entraîné sur la base du référentiel Sensotact[®] à la notation des descripteurs collant, bloquant et glissant, seuls considérés comme pertinents pour les échantillons mis à disposition. Il a ensuite évalué ces 2 descripteurs pour 17 des 25 produits (les autres étant hors spécifications initiales : touchers dits "velours" et "soft métal"), au cours de 2 séances distinctes. On constate tout d'abord que bien que les deux évaluations aient été dissociées dans le temps une relation simple lie collant et glissant pour ces jurés (Figure 9.20), l'ensemble des points se situant à proximité de la droite d'équation Glissant + Collant = 100.

Evaluation instrumentale et calibration L'hypothèse faite à titre exploratoire à l'époque de ce stage était que la notion de "soft" pouvait être approchée par la mise en relation des caractéristiques d'une topographie de surface avec celles d'une vibration résultante (une surface plus rigide étant supposée transmettre les vibrations de façon plus intense et plus "nette"). Pour cette

raison, la carte physique a été tracée par MDS à partir de données extraites d'un spectre de fréquence d'altitude et d'un spectre de fréquence de vibration (Figure 9.21, pour les vernis polyuréthanes seuls). La détermination des longueurs sur la trajectoire principale donne la calibration de la Figure 9.22. Comme défini plus haut, les notes sont exprimées en valeurs relatives par rapport à celle de l'un des points extrêmes de la courbe.

9.4 Conclusion

De premiers résultats encourageants ont été obtenus en matière tactile bien qu'il ne s'agisse que d'une étape de pré-faisabilité. De plus nous ne disposons pas de plateforme technique en la matière.

Comme on pouvait s'y attendre il n'y a pas de différence méthodologique concernant le niveau sémantique.

Au niveau fonctionnel nous n'avons pu nous livrer qu'à trois tests, l'un concernant les seuils de perception pour des matériaux divisés, un second portant sur la perception d'une rugosité et le dernier mettant en oeuvre un jury entraîné au moyen du référentiel SensoTact[®].

Concernant l'instrumentation, le développement d'un capteur à base d'hydrogels nanochargés semble intéressant par le fait qu'il génère directement un signal électrique sans recours à un dispositif mécanique ou électrotechnique, mais les difficultés de mise sous contrôle de la qualité des gels empêchent pour le moment d'obtenir des résultats suffisamment fiables et répétables. Il serait intéressant de pouvoir tester notre approche avec des signaux issus d'autres types de capteurs.

Les résultats obtenus par une approche cartographique appliquée à des informations issues de spectres de fréquence, mises en rapport avec des évaluations sensorielles, ont donné un résultat intéressant dans le cas de vernis soft. Ce résultat confirme la probable validité de l'approche exposée au chapitre 8, assimilant les courbes principales à des trajectoires le long desquelles mesurer des écarts corrélables aux écarts de notes sensorielles.

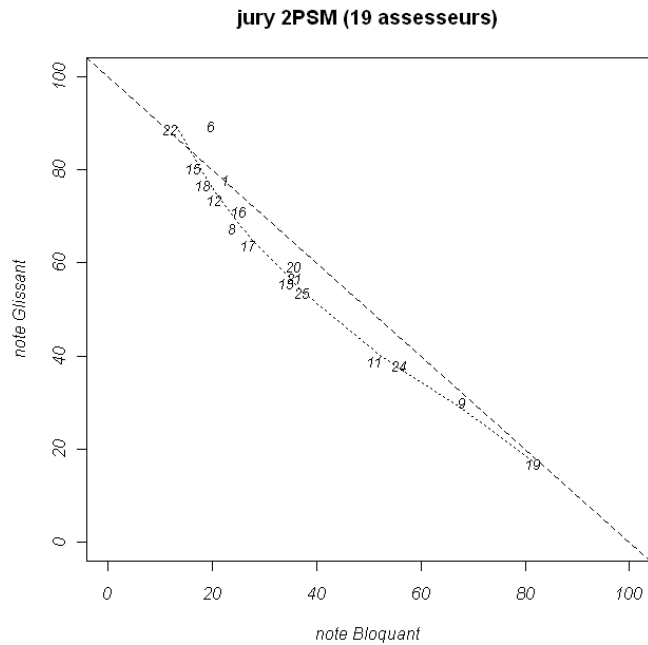


FIGURE 9.20 – Détermination moyenne (19 jurés) des descripteurs "glissant" et "bloquant" de 17 plaques en ABS recouvertes d'un "vernis soft" (selon méthodologie Sensotact®). Tirés : droite Bloquant + Glissant = 100, pointillés : régression [IR39]

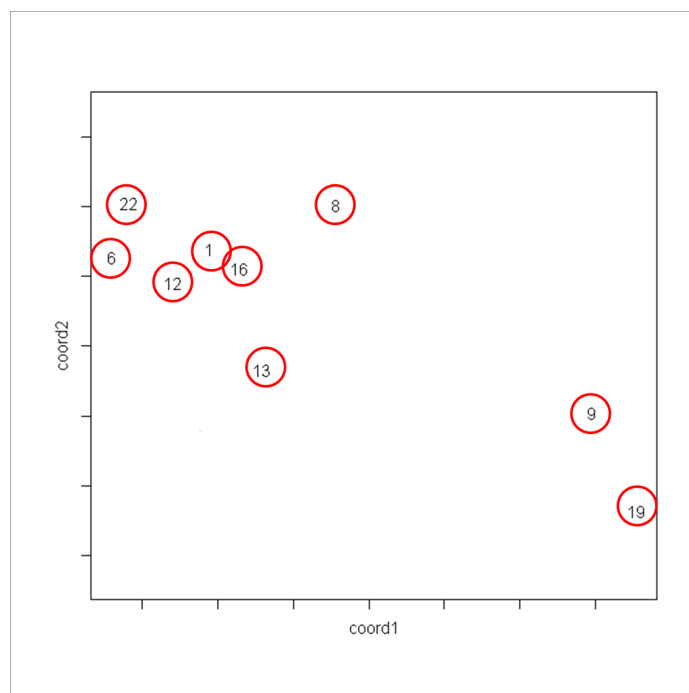


FIGURE 9.21 – Carte physique (espace instrumental) de 9 vernis soft polyuréthanes. Similarité (MDS) dans un espace rugosité-vibration [IR39]

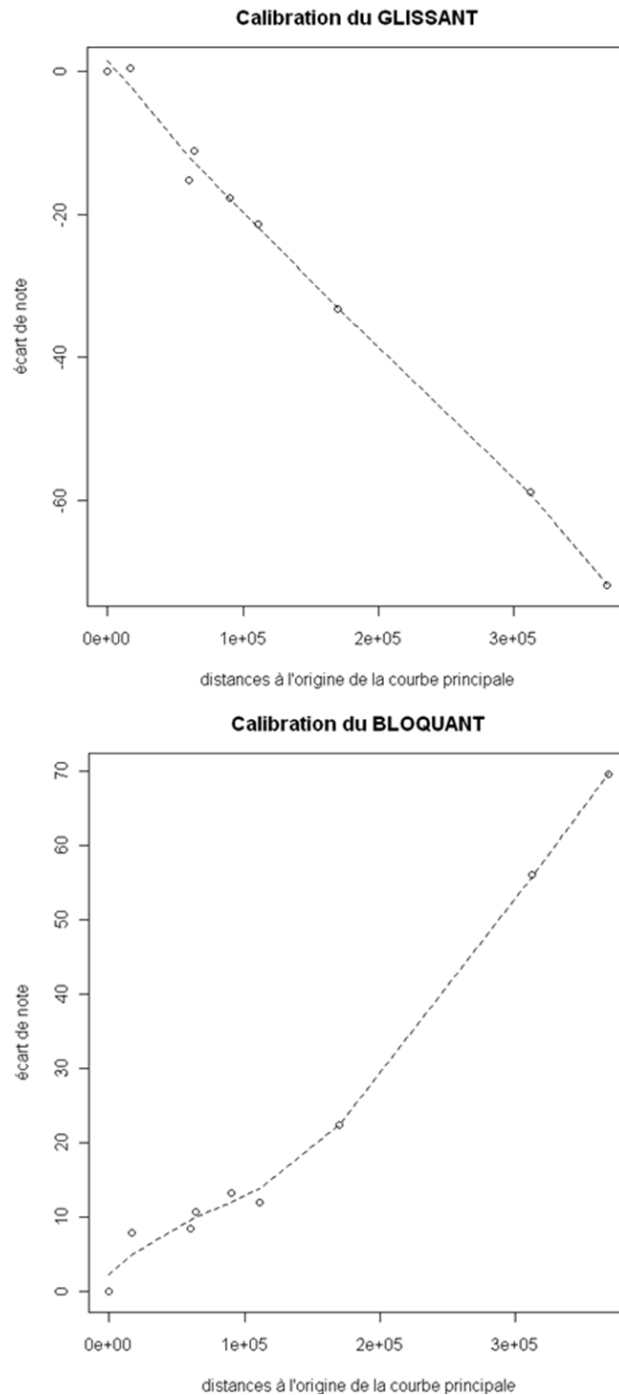


FIGURE 9.22 – Calibration de la carte physique par la méthode de la trajectoire principale. En abscisse : distance à l'un des points extrêmes, en ordonnée : écart de note sensorielle moyenne par rapport à celle attribuée à ce même point extrême.

Conclusion

Si la science ne s'intéresse pas aux choses délirantes, elle risque fort de passer à côté de choses intéressantes.

Antoine Labeyrie, interview à Télérama, 2000

La science de jour met en jeu des raisonnements qui s'articulent comme des engrenages, des résultats qui ont la force de la certitude. On en admire la majestueuse ordonnance comme celle d'un tableau de Vinci ou d'une fugue de Bach. On s'y promène comme dans un jardin à la française. Consciente de sa démarche, fière de son passé, sûre de son avenir, la science de jour avance dans la lumière et la gloire.

La science de nuit, au contraire, erre à l'aveugle. Elle hésite, trébuche, recule, transpire, se réveille en sursaut. Doutant de tout, elle se cherche, s'interroge, se reprend sans cesse. C'est une sorte d'atelier du possible où s'élabore ce qui deviendra le matériau de la science. Où les hypothèses restent sous forme de pressentiments vagues, de sensations brumeuses. Où les phénomènes ne sont encore qu'évènements solitaires sans lien entre eux. Où les projets d'expériences ont à peine pris corps...

François Jacob, discours sur le courage, 2005

J'ai amorcé les premiers travaux sur cette thématique de la cartographie d'aspect entre 2004 et 2006, à un moment où elle rencontrait très peu d'écho dans le domaine des matériaux. Comme le montre la bibliographie les techniques liées à la fouille de données et à l'ingénierie des connaissances font continuellement progresser les outils disponibles, mais leur impact en termes de matériaux est encore très faible. On peut y voir le signe d'un très grand poids des habitudes et des normes en matière de caractérisation de propriétés sensorielles, la couleur en étant un exemple flagrant.

En ingénierie des matériaux, les données qui sont manipulées possèdent en général leur propre métrique et les lois de comportement et de mélange ont des formes simples ou connues. Parce qu'elles ne se comportent pas ainsi, les propriétés sensorielles, perceptuelles ou émotionnelles y apparaissent comme des curiosités. Ce côté étrange est renforcé par la barrière qui sépare l'analyse sensorielle et les logiques de laboratoire : l'analyse sensorielle constate mais n'explique pas, elle intervient *in fine*, elle est lourde et lente alors que les instruments de mesure sont de plus en plus rapides et automatiques. L'espoir d'une corrélation (destinée à aboutir à une substitution) entre les résultats des deux domaines conduit à de nombreux travaux cherchant à établir des régressions plus ou moins complexes entre les données mesurées et les évaluations sensorielles. Curieusement, la notion de similarité n'est pas utilisée.

C'est dans les domaines des sciences cognitives, de l'intelligence artificielle et de l'ingénierie des connaissances que nous avons tenté d'aller chercher des outils permettant peut-être de rapprocher les points de vue, en définissant des similarités sémantiques, fonctionnelles ou métrologiques, et en tentant de corréler ces similarités à l'appréciation sensorielle, hédonique ou émotionnelle.

Il n'est donc pas simple de rédiger la conclusion d'un mémoire portant sur des travaux en cours et plutôt prospectifs dans notre domaine d'application. . . Au stade atteint par ce travail on peut établir les points suivants :

1. Représentations graphiques
 - a) la construction de graphiques et d'indices représentant des relations entre propriétés de matériaux liées à l'aspect est possible
 - b) l'utilisation de ces représentations pour comparer des matériaux réels et virtuels semble possible
 - c) le tri automatique et le classement de ces représentations est possible
 - d) on n'a pas encore procédé au test du caractère intrinsèque de ces outils (identité des classements des objets réels et des représentations)
 - e) on n'a pas encore étudié l'optimisation des représentations elles-mêmes (choix du vocabulaire et de la grammaire graphiques)
2. Cartographie
 - a) représenter des relations de distance entre matériaux simultanément dans un espace sémantique, un espace fonctionnel et un espace physique, en utilisant pour cela des paradigmes externes aux sciences des matériaux semble possible

- b) la corrélation de structures non linéaires identifiées sur ces cartes avec des données sensorielles a été possible dans un nombre non négligeable de cas
- c) les performances de la méthode semblent dépendantes des choix effectués en matière de métrologie et de transformation des distances en carte
- d) à titre de démonstration, on a principalement utilisé la technique du positionnement multidimensionnel (MDS) dans ses versions les plus simples pour représenter les distances
- e) on n'a encore procédé ni à une comparaison minutieuse et systématique des performances des diverses techniques, ni à une analyse mathématique formelle de leur adéquation avec les données
- f) on n'a encore étudié ni la délimitation de domaines sur les cartes ni leurs propriétés de forme, toutes choses relatives à la catégorisation des échantillons

3. Interprétation

- a) un point généralement opposé à la démarche dans son état actuel est la difficulté à "mettre un nom de sensation" sur les trajectoires observées en cartographie
- b) il est probable que l'étude d'espaces simples – constitués de matériaux modèles pour des sensations bien identifiées – serait une bonne manière de procéder pour montrer que quand les dimensions sont séparables et en nombre restreint on peut aisément les identifier. Toutefois il y a fort à parier que ce n'est pas dans ces cas-là que la méthode se révélerait la plus utile
- c) il n'est peut-être pas absolument indispensable de pouvoir nommer une dimension pour la quantifier. Ce point dépasse le cadre des matériaux et devrait être traité en connexion avec les sciences cognitives

4. Domaine tactile

- a) on confirme que les paradigmes sémantique et fonctionnel s'appliquent sans difficulté au domaine tactile
- b) l'espace physique du toucher est problématique du fait du manque d'instruments disponibles
- c) notre expérience de la mesure physique dans le domaine visuel nous incite à penser que la méthode cartographique peut s'appliquer à des données issues de divers instruments, ce point serait à tester
- d) en matière instrumentale, la voie des polymères piezoélectriques paraît intéressante du fait de son caractère "biomimétique"
- e) dans le cas des vernis dits "soft", on a pu imaginer une métrologie simple capable de fournir des données supportant le traitement cartographique. Le résultat reste cependant très limité (2 descripteurs)

Dans les années à venir, plusieurs domaines me semblent pouvoir bénéficier de cette approche en devenant. Tout d'abord, celui lié au développement de matériaux qui sont ou seront exploités pour leurs propriétés holistiques (on a déjà cité *nacré* et *métallique*). L'essor des nanomatériaux pose également

la question du changement de paradigmes physiques lors franchissement de la "barrière nano" : on le sait en matière d'optique (mais à l'échelle de la particule), on l'ignore apparemment en matière tactile. Ensuite celui des "iso-sensations" – qui serait l'équivalent du métamérisme pour des sensations complexes – qui est au cœur des problématiques de remplacement d'une matière par une autre pour des raisons de sécurité sanitaire (par exemple *iso-transparence* ou *iso-dépoli*). Enfin celui de la constitution de banques interactives de données d'aspect (qui touche aux domaines du design et de la conception) car malgré la floraison constatée des matériauthèques il ne semble pas possible à l'avenir de pouvoir rendre compte par un stockage physique de la diversité des matériaux disponibles. Sans entrer dans des détails qui seraient hors du propos de cette conclusion, on entrevoit également des applications évidentes dans les domaines auditif et olfactif, pour lesquels des réflexions sont en cours.

Bibliographie

- [1] H. ABDI, *Metric Multidimensional Scaling (MDS) : Analyzing distance matrices*, in *Encyclopedia of Measurement and Statistics*, N. Salkind, éd., Thousand Oaks (CA) : Sage, 2007.
- [2] H. ABDI, D. VALENTIN ET B. EDELMAN, *Distatis : The analysis of multiple distance matrices*, in *Proceedings of the IEEE Computer Society : International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005, p. 42–47.
- [3] E. H. ADELSON, *On seeing stuff : The perception of materials by humans and machines*, in *Proceedings of the SPIE : Human Vision and Electronic Imaging VI*, B. E. Rogowitz et T. N. Pappas, édés., vol. 4299, 2001, p. 1–12.
- [4] E. H. ADELSON ET P. ANANDAN, *Ordinal characteristics of transparency*. AAAI-90 Workshop on Qualitative Vision, July 20, 1990, Boston, MA, 1990.
- [5] AFNOR, *Base des normes en ligne*, 2011. <http://www.boutique.afnor.org>.
- [6] D. ALLERKAMP, G. BÖTTCHER, F.-E. WOLTER, A. C. BRADY, J. QU ET I. R. SUMMERS, *A vibrotactile approach to tactile rendering*, *Visual Comput.*, 23 (2007), p. 97–108.
- [7] ARISTOTE, *De l'âme*, Flammarion Philosophie, 1999.
- [8] M. F. ASHBY, *Materials Selection in Mechanical Design*, Butterworth Heinemann, Oxford, 1999.
- [9] ASTM, *ASTM Standards and Engineering Digital Library*, 2011. http://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/index.shtml.
- [10] ATOMCAD PROJECT, *Final report of project HPRN-CT-1999 00048 - annexe III : Models and Tools inventory. A compilation of existing software tools relevant to Atomic Scale Simulation and Technology Computer Aided Design*, 2005.
- [11] J. AUBOUIN, R. BROUSSE ET J. P. LEHMAN, *Précis de Pétrologie*, Dunod Université, Paris, 1975.

- [12] G. AULETTA, *Is representation characterized by intrinsicity and causality ?*, *Intellectica*, 35 (2002), p. 83–113.
- [13] S. BADIR, *A quoi servent les graphiques ?*, *Communication et langages*, 143 (2005), p. 49–60.
- [14] S. BAEK, M. CHO ET P. KIM, *Matching colors with Kansei vocabulary using similarity measure based on WordNet*, in *Proceedings of ICCSA 2005, "Computational Science and Its Applications"*, Singapore, May 9-12, 2005, O. Gervasi, M. L. Gavrilova, V. Kumar, A. Laganà, H. P. Lee, Y. Mun, D. Taniar et C. J. K. Tan, édés., *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2005.
- [15] J. D. BAGOT, *Information, sensation et perception*, CURSUS, Paris : Armand Colin, 1999. seconde édition.
- [16] M. BÉCUE, J. PAGÈS ET C.-E. PARDO, *Analysis of multilingual free responses*, in *JADT 2004 : 7^e Journées internationales d'Analyse statistique des Données Textuelles*, 2004.
- [17] M. BEAU-BERTAUD ET J. PAGÈS, *Multiple factor analysis and clustering of a mixture of quantitative, categorical and frequency data*, *Computational Statistics and Data Analysis*, 52 (2008), p. 3255–3268.
- [18] S. BENSMAIA ET M. HOLLINS, *Pacinian representations of fine surface texture*, *Perception and PPsychophysics*, 67 (2005), p. 842–854.
- [19] W. M. BERGMANN TIEST ET A. M. L. KAPPERS, *Analysis of haptic perception of materials by multidimensional scaling and physical measurements of roughness and compressibility*, *Acta Psychologica*, 121 (2006), p. 1–20.
- [20] B. BERLIN ET P. KAY, *Basic Color Terms : Their Universality and Evolution*, Berkeley and Los Angeles. University of California Press, 1969.
- [21] J. BERTIN, *Sémiologie graphique. Les diagrammes - Les réseaux - Les plans*, "Les Réimpressions", Editions de l'EHESS, 4^e édition éd., 2005. première publication en 1967.
- [22] Y. BESTGEN, *Détermination de la valence affective de termes dans de grands corpus de textes*, in *Actes du Colloque International sur la Fouille de Texte 2*, 2002, p. 81–94.
- [23] D. BIBER, U. CONNOR ET T. UPTON, *Discourse on the Move : Using Corpus Analysis to Describe Discourse Structure*, Amsterdam : John Benjamins, 2007.
- [24] I. BIRZNIK, *Tactile Sensory Control of Dexterous Manipulation in Humans*, Thèse doctorat, Department of Integrative Medical Biology, Physiology section, UmeåUniversity, Suède, 2003.
- [25] I. BIRZNIK, P. JENMALM, A. W. GOODWIN ET R. S. JOHANSSON, *Encoding of direction of fingertip forces by human tactile afferents*, *Journal of neurosciences*, 21 (2001), p. 8222–8237.
- [26] P. BOHER ET T. LEROUX, *Optical characterization of E-papers using multispectral Fourier optics instrument*, in *Proceedings of the 2nd CIE Expert Symposium on Appearance*, Gand, Belgique, 2010, p. 63–66.

- [27] G. BONMASSAR ET E. L. SCHWARTZ, *Space-variant fourier analysis : the exponential chirp transform*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 19 (1997), p. 1080–1089.
- [28] BONN UNIVERSITY BTF DATABASE, *ftp ://btf.cs.uni-bonn.de*.
- [29] I. BORG ET P. GROENEN, *Modern Multidimensional scaling : Theory and applications*, New-York : Springer, 1997.
- [30] P. C. F. BORSBOOM, R. R. M. BOS, R. GRAAFF ET B. J. HOENDERS, *A reliable measure of skin colour avoiding edge loss*, in Proceedings of the 2nd CIE Expert Symposium on Appearance, Gand, Belgique, 8-10 Septembre 2010 2010, p. 37–38.
- [31] M. BRUGIDOU ET P. LE QUEAU, *Analysis of non directive interviews with the "bundle" method*, in World Association of Public Opinion Research conference, Paris, 3 septembre 1999, 1999.
- [32] M.-A. BUENO, B. LAMY, M. RENNER ET P. VIALLIER-RAYNARD, *Tribological investigation of textile fabrics*, Wear, 195 (1996), p. 192–200.
- [33] C. CALENGE, *The package adehabitat for the R software : tool for the analysis of space and habitat use by animals*, Ecological Modelling, 197 (2006), p 1035.
- [34] I. CALVINO, *Cosmicomics*, collection Points, Editions du Seuil, 1965.
- [35] ———, *Palomar*, Editions du Seuil, 1983.
- [36] A. CASSIDY ET V. EKANAYAKE, *A biologically inspired tactile sensor array utilizing phase-based computation*, in Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS 2006), Londres 29 nov. - 1er dec. 2006, 2006, p. 45–48.
- [37] J. CASTELLANOS-RAMOS, R. NAVAS-GONZÁLEZ, H. MACICIOR, T. SIKORA, E. OCHOTECO ET F. VIDAL-VERDÚ, *Tactile sensors based on conductive polymers*, Microsyst. Technol., 16 (2010), p. 765–776.
- [38] I. CASTILLO ET T. SIM, *A spring-embedding approach for the facility layout problem*, Journal of the Operational Research Society, 55 (2004), p. 73–81.
- [39] M. CAUSSE, C. FRIGUET, C. COIRET, M. LÉPICIER, B. NAVEZ, M. LEE, N. HOLTHUYSEN, F. SINESIO, E. MONETA ET S. GRANDILLO, *Consumer preferences for fresh tomato at the european scale : a common segmentation on taste and firmness*, Journal of Food Science, 75 (2010), p. 531–541.
- [40] C. CAUVIN ET H. REYMOND, *Nouvelles méthodes en cartographie*. Montpellier, GIP-Reclus, 1986.
- [41] F. CHEN, *Thermal responses of the hand to convective and contact cold with and without gloves*, Thèse doctorat, Department of ergonomics, National Institute of Working Life, Solna, Suède, 1997.
- [42] L. CHEN ET F. STENTIFORD, *An attention based similarity measure for colour images*, in Artificial Neural Networks-ICANN 2006, S. Kollias, A. Stafylopatis, W. Duch et E. Oja, édés., vol. 4132 de Lecture Notes in Computer Science, Springer Berlin / Heidelberg, 2006, p. 481–487.

- [43] Z. CHEN, S. HAYKIN, J. EGGERMONT ET S. BECKER, *Correlative Learning : A Basis for Brain and Adaptive Systems*, John Wiley & Sons, 2007, chap. The Correlative Brain, p. 8–71.
- [44] N. CHINO, *Asymmetric multidimensional scaling*, Journal of the Institute for Psychological and Physical Science, 3 (2011), p. 101–107.
- [45] ———, *Invited talk at the Weierstrass Institute for Applied Analysis and Stochastics*, 9 mars 2006.
- [46] N. CHINO ET S. SABURI, *Controlling the two kinds of error rate in selecting an appropriate asymmetric MDS model*, Journal of the Institute for Psychological and Physical Science, 2 (2010), p. 37–42.
- [47] N. CHINO ET K. SHIRAIWA, *Geometrical structures of some non-distance models for asymmetric MDS*, Behaviormetrika, 20 (1993), p. 35–47.
- [48] T. J. CHOLEWO ET S. LOVE, *Gamut boundary determination using alpha-shapes*, in Proceedings of the Seventh Color Imaging Conference (CIC 1999), 16-19 novembre 1999.
- [49] L. CLAUSTRÉS, Y. BOUCHER ET M. PAULIN, *Spectral BRDF modeling using wavelets*, in Proceedings of SPIE Wavelet and Independent Component Analysis Applications IX, H. H. Szu et J. R. Buss, édés., vol. 4378, 2002, p. 33–43.
- [50] J. COMMANDEUR, *Matching Configurations*, vol. 19 de M & T, DSWO Press, 1991.
- [51] COMSOL, *COMSOL Multiphysics®*, *multiphysics modeling, finite element analysis and engineering simulation software*. version 4.2 - www.comsol.fr.
- [52] A. G. CONSTANTINE ET J. C. GOWER, *Graphical representation of asymmetric matrices*, Applied Statistics, 27 (1978), p. 297–304.
- [53] R. COOK, P. KAY ET T. REGIER, *WCS Data Archives*. <http://www.icsi.berkeley.edu/wcs/data.html>, 2011.
- [54] R. L. COOK ET K. E. TORRANCE, *A reflectance model for computer graphics*, in Proceedings of SIGGRAPH 81, 1981, p. 307–316.
- [55] P. J. CORNWELL, *Concept Maps in the Mechanical Engineering curriculum*, in Proceedings of the 1996 ASEE Annual Conference, Washington D.C, 1996.
- [56] T. F. COX ET M. COX, *A general weighted two-way dissimilarity coefficient*, Journal of Classification, 17 (2000), p. 101–121.
- [57] W. R. CRAMER, *Description and characterization of interference pigments*. Universidad de Alicante, Dept Interuniversitario de Optica, july 2006.
- [58] W. R. CRAMER ET P. GABEL, *Measuring special effects : a comparison of various spectrophotometers*, Paint & Coatings Industry, (2001), p. 36–46.

- [59] M. CRAMPES, J. VILLERD, F. VELICKOVSKI, N. MILLE ET S. RANWEZ, *Cartes conceptuelles pour l'ingénierie de cartes de connaissances adaptatives*, in 17èmes journées francophones d'ingénierie des connaissances (IC 2006), june 2006.
- [60] S. CROCHEMORE, D. NESA ET S. COUDERC, *Analyse sensorielle des matériaux d'habitable automobile : toucher/vision*, in Les Techniques de l'Ingénieur : Matériaux Fonctionnels > Perception Sensorielle des Matériaux, Editions Techniques de l'Ingénieur, 2004. dossier am3292.
- [61] C. DACREMONT ET I. SOUFFLET, *Impact of fabric end-use knowledge on handle perception*, Revue européenne de psychologie appliquée, 56 (2006), p. 273–277.
- [62] V. DAIROU ET J. M. SIEFFERMANN, *A comparison of 14 jams characterized by conventional profile and a quick original method, the flash profile*, Journal of Food Science, 67 (2002), p. 826–834.
- [63] K. DANA, B. VAN GINNEKEN, S. NAYAR ET J. KOENDERINK, *Reflectance and texture of real-world surfaces*, ACM Trans. Graphics, 18 (1999), p. 1–34.
- [64] K. DANDEKAR, B. I. RAJU ET M. A. SRINIVASAN, *3-D finite-element models of human and monkey fingertips to investigate the mechanics of tactile sense*, Journal of Biomedical Engineering, 125 (2003), p. 682–691.
- [65] M.-C. DANIEL ET D. ASTRUC, *Gold nanoparticles : assembly, supramolecular chemistry, quantum-size-related properties, and applications toward biology, catalysis, and nanotechnology*, Chemical Reviews, 104 (2004), p. 293–346.
- [66] M. DANZART, J. M. SIEFFERMANN ET J. DELARUE, *New developments in preference mapping techniques : finding out a consumer optimal product, its sensory profile and the key sensory attributes*, in 7th Sensometrics Conference, Davis, California, USA, 2004.
- [67] D. L. DARMOFAL, D. H. SODERHOLM ET D. R. BRODEUR, *Using concept maps and concept questions to enhance conceptual understanding*, in 32nd ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference, 6-9 nov. 2002, Boston MA, USA, 2002, p. 1–6. Session T3A.
- [68] F. DE BOISSIEU, *Toucher artificiel à base d'un microcapteur d'effort : traitement du signal et des informations associées*, Thèse doctorat, INPG, ED "Electronique, Electrotechnique, Automatique et traitement du signal", 2010.
- [69] M. DE ROOIJ ET W. J. HEISER, *Triadic distance models for the analysis of asymmetric three-way proximity data*, British Journal of Mathematical and Statistical Psychology, 53 (2000), p. 99–119.
- [70] C. DE ROUSIERS, A. BOUSSEAU, K. SUBR, N. HOLZSCHUCH ET R. RAMAMOORTHY, *Real-time rough refraction*, in ACM Siggraph Symposium on Interactive 3D Graphics and Games (I3D), 2011. DOI : 10.1145/1944745.1944764.

- [71] V. DE SILVA ET J. B. TENEBBAUM, *Global versus local methods in non-linear dimensionality reduction*, in Proc. NIPS, S. Becker, S. Thrun et K. Obermayer, édés., vol. 15, 2003, p. 721–728.
- [72] G. DE'ATH, *Principal curves : a new technique for indirect and direct gradient analysis*, Ecology, 80 (1999), p. 2237,2253.
- [73] S. DEHANE, *The neural basis of the Weber-Fechner law : a logarithmic mental number line*, Trends in Cognitive Sciences, 7 (2003), p. 145–147.
- [74] E. DEMIR, *The field of Design and Emotion : conspets, arguments, tools and current issues*, METU Journal of the Faculty of Architecture, 25 (2008), p. 135–152.
- [75] E. A. DEN HARTOG ET G. HAVENITH, *Modelling fingertip cooling during contact with cold materials*, in Proc. 9th Internat. Conf. on Environmental Ergonomics, Dortmund, 2000.
- [76] J. C. DENAIN ET P. LANGLOIS, *Cartographie en anamorphose*, Mappemonde, 49 (1988), p. 16–19.
- [77] D. DENNETT, *La conscience expliquée*, Odile Jacob, Paris, 1993.
- [78] F. DEPLEDT, *Evaluation sensorielle, manuel méthodologique*, TEC & Doc, Editions Lavoisier, 1998. 2nde édition.
- [79] R. DESCARTES, *Traité de l'homme (1664)*, in œuvres de Descartes vol.11, C. Adam et P. Tannery, édés., Léopold Cerf, Paris, 1909.
- [80] ———, *Méditations métaphysiques, objections et réponses (1641)*, Flammarion, 1993.
- [81] P. M. A. DESMET, *Nine sources of product emotion*, in Proceedings of IASDR'07, International Association of Societies of Design Research, 12-15 sept. 2007, Hong-Kong Polytechnic University, 2007.
- [82] P. M. A. DESMET, P. HEKKERT ET M. G. HILLEN, *Values and emotions; an empirical investigation in the relationship between emotional responses to products and human values*, in Proceedings of the 5th European academy of design conference, Barcelona, Spain, 2003.
- [83] R. DETERRE, A. SARDA ET C. VERGNEAULT, *Le doigt thermique : une réponse innovante à la caractérisation sensorielle des produits*, in Congrès SIA "Confort Automobile et Ferroviaire - Acoustique, Thermique", Le Mans, 13-14 novembre 2002, 2002. communication num. CAF/02-08.
- [84] P. DILLON, W. MOODY, R. BARTLETT, P. SCULLY, R. MORGAN ET C. JAMES, *Sensing the fabric*, in First International Workshop on Haptic Human-Computer Interaction, Springer, 2000, p. 205–17.
- [85] M. DOWMAN, *Colour language 1 : Typology, Psycholinguistics, Neurophysiology*. Cours "Language and Cognition" (Honours), University of Edinburgh, 2005.
- [86] D. DUBOIS, *Categories as acts of meaning : the case of categories in olfaction and audition*, Cognitive Science Quarterly, 1 (2000), p. 35–68.

- [87] A. DUMENIL-LEFEBVRE, *Intégration des aspects sensoriels dans la conception des emballages en verre : mise au point d'un instrument méthodologique à partir des techniques d'évaluation sensorielle*, Thèse doctorat, ENSAM, Paris, 2006.
- [88] E. N. DZHAFAROV ET H. COLONIUS, *Reconstructing distances among objects from their discriminability*, in *Measurement and Representation of Sensations*, H. Colonius et E. N. Dzhafarov, éd., Mahwah, New Jersey - London, UK : Lawrence Erlbaum Associates, 2006, p. 47–88.
- [89] G. EDELMAN, *Biologie de la conscience*, Odile Jacob, Paris, 1992.
- [90] S. EDELMAN, *Representation is representation of similarities*, Technical Report CS96-08, The Weizmann Institute of Science, 1996.
- [91] ———, *Representation and Recognition in Vision*, The MIT Press, 1999.
- [92] H. EDELSBRUNNER ET E. P. MÜCKE, *Three-dimensional alpha-shapes*, *ACM Trans. Graphics*, 13 (1994), p. 43–72.
- [93] A. EL GOLLI, B. CONAN-GUEZ ET F. ROSSI, *A self organizing map for dissimilarity data*, in *Proceedings of IFCS-04*, International Federation of Classification Societies, 2004, p. 61–68.
- [94] ELDIM, *EZCom software : spatial photometry package for EZLite, EZ-Contrast and MURATest products*, 2010. www.eldim.fr.
- [95] ENACTIVE NETWORK, *The ENACTIVE Network of Excellence : Enactive interfaces*. www.enactivenetwork.org, 2007.
- [96] D. ENNIS, *Statistical and psychological aspects of thurstonian modelling*, in *Proceedings of the 7th Sensometrics Conference*, Davis, California, USA, 2004.
- [97] B. ESCOFIER ET J. PAGÈS, *Multiple factor analysis (AFMULT package)*, *Computational Statistics and Data Analysis*, 18 (1994), p. 121–140.
- [98] Y. ESCOUFIER ET A. GRORUD, *Analyse factorielle des matrices carrées non symétriques*, in *Data Analysis and Informatics*, E. e. a. Diday, éd., Amsterdam : North Holland Publishing Company, 1980, p. 263–276.
- [99] C. FAIRON ET P. WATRIN, *From extraction to indexation. Collecting new indexation keys by means of IE techniques*, in *EACL 2003, Workshop on Finite State Methods*, Budapest, 2003.
- [100] A. FAURE, *Des sons aux mots : comment parle-t-on du timbre musical ?*, Thèse. Discipline : Sciences Cognitives. Mention Psychologie Cognitive, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 2000.
- [101] L. K. FELLOWS ET M. J. FARAH, *Is anterior cingulate cortex necessary for cognitive control ?*, *BRAIN*, 128 (2005), p. 788–796.
- [102] J. A. FERWERDA, *Effects of mesoscale texture on apparent surface gloss*, in *Proceedings of the 2nd CIE Expert Symposium on Appearance*, Gand, Belgique, 2010, p. 79–82.

- [103] J. A. FERWERDA, F. PELLACINI ET D. P. GREENBERG, *A psychophysically-based model of surface gloss perception*, in Proceedings of the SPIE : Human Vision and Electronic Imaging VI, B. E. Rogowitz et T. N. Pappas, édés., vol. 4299, 2001, p. 291–301.
- [104] J. FILIP ET M. HAINDL, *Bidirectional Texture Function modeling : A state of the art survey*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 31 (2009), p. 1921–1940.
- [105] R. W. FLEMING ET H. H. BÜLTHOFF, *Low-level image cues in the perception of translucent materials*, ACM TAP, 2 (2005), p. 346–382.
- [106] S. L. FRANCE ET J. D. CARROLL, *Two-way multidimensional scaling : A review*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part C : Applications and Reviews, 41 (2011), p. 644–661.
- [107] J. M. GALLINA, *Les représentations mentales*, Dunod "Les Topos", 2006.
- [108] E. R. GANSNER, Y. HU, S. KOBouROV ET C. VOLINSKY, *Putting recommendations on the map : visualizing clusters and relations*, in Proceedings of the 3rd ACM conference on Recommender systems (RecSys'09), ACM, 2009, p. 345–348.
- [109] E. R. GANSNER, Y. KOREN ET S. NORTH, *Graph drawing by stress majorization*, in GD 2004, J. Pach, éd., 2004, p. 239–250.
- [110] Y. GAVET ET J.-C. PINOLI, *A geometric dissimilarity criterion between Jordan spatial mosaics. Theoretical aspects and application to segmentation evaluation*. J. Math. Imaging Vis., published online, 17-03-2011, 2011.
- [111] T. A. GERMER, *MIST version 3.01 : a Modeled Integrated Scatter Tool*. software, 2008.
- [112] I. GIRARD, *Hume : Genres de perceptions et modes d'accès au réel*, Cercles, 16 (2006), p. 75–82.
- [113] K. C. GOWDA ET T. RAVI, *Agglomerative clustering of symbolic objects using the concepts of both similarity and dissimilarity*, Pattern Recognition Letters, 16 (1995), p. 647–652.
- [114] —, *Genetic algorithms for symbolic clustering*, Sadhana, 21 (1996), p. 465–475.
- [115] J. C. GOWER, *A general coefficient of similarity and some of its properties*, Biometrics, 27 (1971), p. 623–637.
- [116] —, *Generalized Procrustes analysis*, Psychometrika, 40 (1975), p. 33–51.
- [117] —, *Metric and euclidean properties of dissimilarity coefficients*, Journal of Classification, 3 (1986), p. 5–48.
- [118] P. GÄRDENFORS, *Conceptual spaces : the geometry of thought*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts USA, 2000.
- [119] M. GREEN ET J. HUANG, *Extending the BSSRDF model to thin, highly diffusing materials*. www.cs.cmu.edu/~jch1/research/old/GreenHuang.pdf, 2005.

- [120] M. GROSS, *Visual computing. The integration of computer graphics, visual perception and imaging*, Computer Graphics : Systems and Applications, Springer Verlag, 1994.
- [121] F. GRUY, *Relationship between the morphology and the light scattering cross section of optically soft aggregates*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 112 (2011), p. 2609–2618.
- [122] M. HAINDL ET J. FILIP, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3212, Springer, 2004, chap. A Fast Probabilistic Bidirectional Texture Function Model.
- [123] M. HAINDL, J. GRIM, P. SOMOL, P. PUDIL ET M. KUDO, *A gaussian mixture-based colour texture model*, in Proceedings of 17th Int. Assoc. for Pattern Recognition Conf, vol. 3, 2004, p. 177–180.
- [124] B. T. HALLAM, A. G. HIORNS ET P. VUKUSIC, *Developing optical efficiency through optimized coating structure : biomimetic inspiration from white beetles*, Applied Optics, 48 (2009), p. 3243–3249.
- [125] HAPTEX PROJECT CONSORTIUM, *HAPTEX : Haptic sensing of virtual TEXTiles*. Projet Européen IST-6549, 2004.
- [126] C. HARDING, I. A. KAKADIARIARIS, J. F. CASEY ET R. B. LOFTIN, *A multisensory system for the investigation of geoscientific data*, Computers & Graphics, 26 (2002), p. 259–269.
- [127] M. HASCOËT, *Visualisation d'information : modélisation, interaction et nouveaux dispositifs*. mémoire d'HDR, USTL, Montpellier, 2007.
- [128] T. HASTIE ET W. STUETZLE, *Principal curves*, Rap. tech. 151, Department of Statistics, University of Washington, october 1988.
- [129] J. HAUSHOFER, M. S. LIVINGSTONE ET N. KANWISHER, *Multivariate patterns in object-selective cortex dissociate perceptual and physical shape similarity*, PLoS Biol, 6 (2008), p. 1459–1467.
- [130] X. D. HE, K. E. TORRANCE, F. SILLION ET D. P. GREENBERG, *A comprehensive physical model for light reflection*, in SIGGRAPH'91 conference proceedings, ACM Press, 1991.
- [131] M. HELMANTEL, *On the distribution of postposition and articles in the verbal complex*, GAGL, 42 (1998), p. 169–191.
- [132] A. HERSKOVITS, *Language and spatial cognition : An interdisciplinary study of the prepositions in english*, Cambridge University Press, 1986.
- [133] G. E. HINTON ET S. T. ROWEIS, *Stochastic neighbor embedding*, in Advances in Neural Information Processing Systems, vol. 15, CAbridge, USA : The MIT Press, 2002, p. 833–840.
- [134] H.-N. HO ET L. A. JONES, *Thermal model for hand-object interactions*, in Proceedings of the Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, B. Hannaford, J. Weisenberger et B. Gillespie, éd., 2006, p. 461–467.
- [135] Y.-X. HO, M. S. LANDY ET L. T. MALONEY, *How direction of illumination affects visually perceived surface roughness*, Journal of Vision, 6 (2006), p. 634–648.

- [136] T. HO-PHUOC ET A. GUÉRIN-DUGUÉ, *A new adaptation of self-organizing map for dissimilarity data*, in Proceedings of IWANN 2007, F. S. et al., éd., 2007, p. 219–226.
- [137] I. HOLMÉR, Q. GENG, G. HAVENITH, E. A. DEN HARTOG, H. RINTAMÄKI, J. MALCHAIRE ET A. PIETTE, *Temperature limit values for cold touchable surfaces (ColdSurf)*, rap. tech., Final report of the EU project SMT4-CT97-2149, 2003.
- [138] D. HUME, *livre I*, in *Traité de la nature humaine* (1740), P. Saltel et P. Baranger, éd., Garnier-Flammarion, 1995.
- [139] E. HUSSERL, *La crise des sciences européennes et la phénoménologie transcendantale*, Gallimard "Tel", 2004.
- [140] K. IERODIAKONOU, *Empedocles on colour and colour vision*, in *Oxford Studies in Ancient Philosophy*, D. Sedley, éd., vol. XXIX, Oxford University Press, 2005.
- [141] ISO, *Analyse sensorielle-vocabulaire. Norme ISO NF 5492 :2009*, 2009.
- [142] —, *online ISO Standards listing*, 2011. http://www.iso.org/iso/iso_catalogue.htm.
- [143] A. ISRAELSSON, *Simulation of responses in afferents from the glabrous skin during human manipulation*, Mém. D.E.A., Cognitive Science Programme, UmeåUniversity, Suède, 2002.
- [144] A. JAFFER, *FreeSnell version 1.b7 : a simulator for thin-film optics*. software, 2003.
- [145] A. F. JAHANGIRI ET G. J. GERLING, *A multi-timescale adaptive threshold model for the SA-I tactile afferent to predict response to mechanical vibration*, in Proceedings of the International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering, 2011, p. 152–155.
- [146] J. N. JAUBERT, C. TAPIERO ET J. C. DORE, *The field of odors : Toward a universal language for odor relationships*, *Perfumer and Flavorist*, 20 (1995), p. 1–16.
- [147] H. W. JENSEN, S. R. MARSCHNER, M. LEVOY ET P. HANRAHAN, *A practical model for subsurface light transport*, in Proceedings of SIGGRAPH'01, 2001.
- [148] R. S. JOHANSSON ET J. R. FLANAGAN, *Tactile sensory control of object manipulation in humans*, in *The Senses : A comprehensive Reference*, vol. 6 : Somatosensation, Elsevier, 2008, chap. 6.05.
- [149] L. JONES ET S. LEDERMAN, *Human hand function*, Oxford University Press, 2006.
- [150] C. G. JUNG, *Archétypes de l'inconscient collectif*, in *Jung : les racines de la conscience*, Paris : Buchet-Chastel, 1971, p. 11–59.
- [151] F. M. KAHNERT, *Numerical methods in electromagnetic scattering theory*, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 79-80 (2003), p. 775–824.

- [152] T. KAMADA ET S. KAWAI, *An algorithm for drawing general undirected graphs*, Information Processing Letters, 31 (1989), p. 7–15.
- [153] B. J. KANE, *A high resolution traction stress sensor array for use in robotic tactile determination*, Thèse doctorat, Stanford University, Department of Mechanical Engineering, 1999.
- [154] E. KANT, *Critique de la raison pure*, Gallimard Folio "Essais", 1994.
- [155] R. M. KAREIVA ET N. SHIGESADA, *Analyzing insect movement as a correlated random walk*, Oecologia, 56 (1983), p. 234–238.
- [156] L. KAUFMAN ET P. J. ROUSSEEUW, *Introduction, in Finding Groups in Data : An Introduction to Cluster Analysis*, L. Kaufman et P. J. Rousseeuw, édés., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2008.
- [157] S. KAWABATA, *The standardization and analysis of hand evaluation*, Osaka : The Textile Machinery Society of Japan, 1980. seconde édition.
- [158] S. KAWABATA, M. N. K. ITO ET M. NITTA, *Application of objective measurement to clothing manufacture*, Journal of Clothing Science and Technology, 2 (1990), p. 18–33.
- [159] S. KAWABATA ET M. NIWA, *Analysis of hand evaluation of wool fabrics for men's suits using data of a thousand samples and computation*, in Proceedings of the 5th Int. Wool Textile Res. Conf., Aix-la-Chapelle, Allemagne, vol. 5, 1975, p 413.
- [160] P. KAY, *Color categories are not arbitrary*, Cross-Cultural Research, 39 (2005), p. 39–55.
- [161] P. KAY ET L. MAFFI, *Color appearance and the emergence and evolution of basic color lexicons*, American Anthropologist, 101 (1999), p. 743–760.
- [162] P. KAY ET T. REGIER, *Resolving the question of color naming universals*, PNAS, 100 (2003), p. 9085–9089.
- [163] ———, *Color naming universals : the case of Berinmo*, Cognition, 102 (2007), p. 289–298.
- [164] N. G. KHLEBTSOV ET L. A. DYKMAN, *Optical properties and biomedical applications of plasmonic nanoparticles*, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 111 (2010), p. 1–35.
- [165] D. B. KIM, M. K. SEO, K. Y. KIM ET K. H. LEE, *Acquisition and representation of pearlescent paints using an image-based goniospectrophotometer*, Opt. Eng., 49 (2010), p. 5405–5412.
- [166] A. KIS ET G. VASARHELYI, *Developing system to detect and analyze spatio-temporal tactile events*, in 11th International Workshop on Cellular Neural Networks and Their Applications (CNNA 2008), 14-16 juillet 2008, Santiago de Compostela, Espagne, 2008, p 10.
- [167] ———, *Event detection with 3D tactile sensors*, in 2nd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL 2009), 24-27 nov. 2009, Bratislava, Slovaquie, 2009, p. 1–2.

- [168] A. KITAOKA, *A new explanation of perceptual transparency connecting the X-junction contrast-polarity model with the luminance-based arithmetic model*, Japanese Psychological Research, 47 (2005), p. 175–187.
- [169] T. KOHONEN, *The self-organizing map*, Proceedings of the IEEE, 78 (1990), p. 1464–1479.
- [170] A. KOO, *Clarity : current measurement practice*, in Proceedings of the 2nd CIE Expert Symposium on Appearance, Gand, Belgique, 2010, p. 67–69.
- [171] A. KOPCSA ET E. SCHIEBEL, *Science and technology mapping : A new iteration model for representing multidimensional relationships*, Journal of the American Society for Information Science, 49 (1998), p. 7–17.
- [172] M. KOUDELKA, S. MAGDA, P. BELHUMEUR ET D. KRIEGMAN, *Acquisition, compression, and synthesis of bidirectional texture functions*, in Proc. Third International Workshop on Texture Analysis and Synthesis, 2003, p. 47–52.
- [173] A. KRELL, T. HUTZLER ET J. KLIMKE, *Transmission physics and consequences for materials selection, manufacturing, and applications*, Journal of the European ceramic Society, 29 (2009), p. 207–221.
- [174] K. KUKICH, *Techniques for automatically correcting words in text*, ACM Computing Surveys, 24 (1992), p. 377–439.
- [175] A. KUMAR, A. SRIVASTAVA, I. Y. GALAEV ET B. MATTIASSON, *Smart polymers : Physical forms and bioengineering applications*, Prog. Polym. Sci., 32 (2007), p. 1205–1237.
- [176] Y. LACOSTE, *Atlas géopolitique*, Larousse, Paris, 2007.
- [177] E. P. F. LAFORTUNE, S.-C. FOO, K. E. TORRANCE ET D. P. GREENBERG, *Nonlinear approximation of reflectance functions*, in Proceedings of SIGGRAPH'97, ACM Press, 1997, p. 117–126.
- [178] G. LAKOFF, *Women, fire and dangerous things : what categories reveal about the mind*, Chicago University Press, 1987.
- [179] R. LAZZARI ET I. SIMONSEN, *Granfilm : a software for calculating thin-layer dielectric properties and Fresnel coefficients*, Thin Solid Films, 419 (2002), p 124.
- [180] J.-P. LECLERCQ, éd., *Catalogue de l'exposition "Jouer la lumière", Musée de la mode et du textile, Union centrale des Arts Décoratifs*, Paris : Société nouvelle Adam Biro, 2001.
- [181] G. W. LEIBNIZ, *Discours de métaphysique. Monadologie (1714)*, Gallimard Folio "Essais", 2004.
- [182] D. LEIBOVICI, G. QUILLEVERE ET J.-C. DESCONNETS, *A method to classify ecoclimatic arid and semi-arid zones in Circum-Saharan Africa using monthly dynamics of multiple indicators*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45 (2007), p. 4000–4007.
- [183] A. LEMPICKI, C. BRECHER ET S. MILLER, *Transparency revised*. ALEM Associates essays 5419, 2007.

- [184] D. R. LESNIAK ET G. J. GERLING, *Predicting SA-I mechanoreceptor spike times with a skin-neuron model*, *Mathematical Biosciences*, 220 (2009), p. 15–23.
- [185] H. LI ET K. E. TORRANCE, *An experimental study of the correlation between surface roughness and light scattering for rough metallic surfaces*, in *Proceedings of SPIE vol.5878 (Advanced Characterization Techniques for Optics, Semiconductors, and Nanotechnologies II)*, A. Duparré, B. Singh et Z.-H. Gu, édés., 2005.
- [186] J. LIN ET C. C. SEEPERSAD, *Empathic lead users : the effect of extraordinary user experiences on customer needs analysis and product redesign*, in *Proceedings of IDETC/CIE 2007, ASME 2006 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, 4-7 sept. 2007, Las Vegas, Nevada, USA, 2007. comm. DETC2007/35302.
- [187] D. T. LINDSEY ET A. M. BROWN, *World Color Survey color naming reveals universal motifs and their within-language diversity*, *PNAS*, 106 (2009), p. 19785–19790.
- [188] M. LINDSTRAND, *Gloss : measurement, characterization and visualization - in the light of visual evaluation*, Thèse doctorat, Linköping University, Département Science et Technologie, Stockholm, Suède, 2002.
- [189] G. D. S. LUDDEN, B. M. KUDROWICZ, H. N. J. SCHIFFERSTEIN ET P. HEKKERT, *Surprise and humor in product design : designing sensory metaphors in multiple modalities*, *Humor*, (2011). in press.
- [190] G. D. S. LUDDEN, H. N. J. SCHIFFERSTEIN ET P. HEKKERT, *Surprise as a design strategy*, *Design Issues*, 24 (2008), p. 28–38.
- [191] ———, *Beyond surprise : a longitudinal study on the experience of visual-tactual incongruities in products*, 2011. submitted.
- [192] D. W. MACKOWSKI ET M. I. MISHCHENKO, *A multiplesphere T-matrix fortran code for use on parallel computer clusters*, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 112 (2011), p. 2182–2192.
- [193] R. E. MACLAURY, *Ethnographic evidence of unique hues and elemental colors. Commentary on Saunders and van Brakel*, *Behavioral and Brain Sciences*, 20 (1997), p. 202–203.
- [194] T. MAEDA, N. ARAKAWA, M. TAKAHASHI ET Y. AIZU, *Monte Carlo simulation of spectral reflectance using a multilayered skin tissue model*, *Optical Review*, 17 (2010), p. 223–229.
- [195] T. MALZBENDER, D. GELB ET H. WOLTERS, *Polynomial texture maps*, in *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2001*, 2001, p. 519–528.
- [196] I. MANUNZA ET A. BONFIGLIO, *Strain and pressure sensors based on Organic Field-Effect Transistors*, in *Organic Electronics in Sensors and Biotechnology*, R. Shinar et J. Shinar, édés., Biophotonics, McGraw-Hill, 2009, chap. 3, p. 93–116.
- [197] A. S. MARFUNIN, *Physics of minerals and inorganic materials. An introduction*, Springer, 1979.

- [198] ———, *Spectroscopy, luminescence and radiation centers in minerals*, Springer, 1979. publié initialement en russe, 1975.
- [199] R. MAUSFELD, *The physicalistic trap in perception theory*, in *Perception and the Physical World*, D. Heyer et R. Mausfeld, édés., Wiley, 2002.
- [200] C. McCABE, E. T. ROLLS, A. BILDERBECK ET F. MCGLONE, *Cognitive influences on the affective representation of touch and the sight of touch in the human brain*, *SCAN*, 3 (2008), p. 97–108.
- [201] G. MCGUNNIGLE ET M. J. CHANTLER, *Segmentation of rough surfaces using reflectance*, in *BMVC*, 2001.
- [202] J. M. MEDINA, S. M. C. NASCIMENTO ET P. VUKUSIC, *Hyperspectral optical imaging of two different species of lepidoptera*, *Nanoscale Research Letters*, 6 (2011), p 369.
- [203] I. V. MEGLINSKY ET S. J. MATCHER, *Computer simulation of the skin reflectance spectra*, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 70 (2003), p. 179–186.
- [204] A. MEHRABIAN ET J. A. RUSSEL, *An approach to environmental psychology*, The MIT Press, 1980.
- [205] M. C. MEILGAARD, *Prediction of flavor differences between beers from their chemical composition*, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 30 (1982), p. 1009–1017.
- [206] F. METELLI, *The perception of transparency*, *Scientific American*, 230 (1974), p. 91–98.
- [207] J.-G. MEUNIER, *Avant la perception : l'espace conceptuel de la sensation selon la philosophie*. contribution aux actes du groupe "Sujet, Théorie et Praxis" 2002, 2002. www.lutecium.org/stp/meunier.html.
- [208] C.-J. MIGNARD, *Carte figurative des pertes successives en hommes de l'Armée Française dans la campagne de Russie 1812-1813*. Paris : Ren- gnier et Dourdet, 1869.
- [209] M. I. MISHCHENKO, L. D. TRAVIS ET D. W. MACKOWSKI, *T-Matrix computations of light scattering by nonspherical particles : a review*, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 55 (1996), p. 535–575.
- [210] J. N. MISSA ET A. CLEEREMANS, *Le problème de la conscience*. in *Cours de sciences cognitives 2004-2005*, Université Libre de Bruxelles, 2004.
- [211] P. MOLETTE ET A. LANDRÉ, *TROPES v8.0.0, logiciel d'analyse dis- cursive développé sur la base des travaux de Rodolphe Ghiglione*, 2011. <http://www.tropes.fr>.
- [212] C. J. MOORE ET C. J. PRICE, *A functional neuroimaging study of the variables that generate category-specific object processing differences*, *BRAIN*, 122 (1999), p. 943–962.
- [213] B. MORAND, *Le diagramme : à la périphérie ou au cœur de la cognition ? Rencontres Interdisciplinaires sur les représentations graphiques dans les systèmes complexes naturels et artificiels*. 30 janvier - 4 février 2000, Rochebrune, France, 2000.

- [214] H. R. MOSKOWITZ, *The intertwining of psychophysics and sensory analysis : historical perspectives and future opportunities ; a personal view*, Food Quality and Preference, 14 (2002), p. 87–98.
- [215] A. MUNOZ-MARTIN ET M. MARTIN-MERINO, *New asymmetric iterative scaling models for the generation of textual word maps*. JADT 2002 : 6es Journées internationales d'Analyse statistique des Données Textuelles, 2002.
- [216] M. NAGAMASHI, *Kansei engineering : a new ergonomic consumer-oriented technology for product development*, International Journal of Industrial Ergonomics, 15 (1995), p. 3–11.
- [217] C. R. NAVE, *The HyperPhysics Project*, 2011. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>.
- [218] S. K. NAYAR, K. IKEUCHI ET T. KANADE, *Surface reflection : Physical and geometrical perspectives*, Rap. tech. CMU-RI-TR-89 -7, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 1989.
- [219] M. E. J. NEWMAN, *Fast algorithm for detecting community structure in networks*, PHYSICAL REVIEW E, 69 (2006), p. 66133/1–5.
- [220] D. NORMAN, *Emotional design : Why we love (or hate) everyday things*, London : Basic Books, 2004.
- [221] NU CYBERTEK, INC., *PhabrOmeter[®] instrument and software*, 2004. <http://www.nucybertek.com>.
- [222] A. OLAUSSON, Y. LAMARRE, H. BACKLUND, C. MORIN, B. G. WALLIN, G. STARCK, S. EKHOLM, I. STRIGO, K. WORSLEY, A. B. VALLBO ET B. M. C., *Unmyelinated tactile afferents signal touch and project to insular cortex*, Nature neuroscience, 5 (2002), p. 900–904.
- [223] A. OLIVA, M. L. MACK, M. SHRESTHA ET A. PEEPER, *Identifying the perceptual dimensions of visual complexity of scenes*, in The 26th Annual Meeting of the Cognitive Science Society Meeting, Chicago, 2004.
- [224] J. C. ORTIZ NICOLÁS, N. TAKEDA TODA ET A. GARCIA VALDEZ, *Predefining emotions for visual product appearance*, in Proceedings of the International Conference on Kansei Engineering and Emotion Research, Sapporo, Japan, 2007.
- [225] E. PACHERIE, *Cours DEA de Sciences Cognitives, module "Perception et Cognition" (Ecole Normale Supérieure, Paris)*, 2001.
- [226] J. PAGÈS, *Collection and analysis of perceived product inter-distances using multiple factor analysis ; application to the study of ten white wines from the Loire Valley*, Food Quality and Preference, 16 (2005), p. 642–649.
- [227] N. PAN, *Quantification and evaluation of human tactile sense towards fabrics*, Int. Journal of Design & Nature, 1 (2007), p. 48–60.
- [228] M. PARÉ, C. BEHETS ET O. CORNU, *Paucity of presumptive Ruffini corpuscles in the index finger pad of humans*, J. Comparative Neurology, 456 (2003), p. 260–266.

- [229] E. PEKALSKA, *Dissimilarity representations in pattern recognition. Concepts, theory and applications*, Thèse doctorat, Université de Delft, 2005.
- [230] F. PELLACINI, J. A. FERWERDA ET D. P. GREENBERG, *Toward a psychophysically-based light reflection model for image synthesis*, in Proceedings of SIGGRAPH'00, 2000, p. 55–64.
- [231] L. PELLETIER, I. SOUFFLET ET C. DACREMONT, *How to describe the handle of fabrics? A focus on "grainy", "harsh", "rough" and "raspy" perception*, in Summer Program In Sensory Evaluation (SPISE 2007), HoChiMinh-City University of Technology, Vietnam, 26-27 juillet 2007, 2007.
- [232] P. R. PERES-NETO ET D. A. JACKSON, *How well do multivariate data sets match? The advantages of a procrustean superimposition approach over the Mantel test*, *Oecologia*, 129 (2001), p. 169–178.
- [233] V. PERLIBAKAS, *Distance measures for PCA-based face recognition*, *Pattern Recognition Letters*, 25 (2004), p. 711–724.
- [234] C. PETITMENGIN, *Describing one's subjective experience in the second person. An interview method for the science of consciousness*, *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 5 (2006), p. 229–269.
- [235] J. PETITOT, *La sémiophysique : de la physique qualitative aux sciences cognitives*, in *Passion des Formes : à René Thom*, M. Porte, éd., Editions de l'Ecole Normale Supérieure, 1994.
- [236] H. PETRIE, N. KING ET P. TOMLINS, *Investigations into sensation of "softness" and perception of the tactile properties of "Soft Touch" thermoplastic elastomers*, Rap. tech. Report nbr. DEPC-MPR 017, NPL, 2004.
- [237] B. T. PHONG, *Illumination for computer generated pictures*, *Communications of ACM*, 18 (1975), p. 311–317.
- [238] M. PIAZZA, E. GIACOMINI, D. LE BIHAN ET S. DEHAENE, *Single-trial classification of parallel pre-attentive and serial attentive processes using functional magnetic resonance imaging*, *Proc. R. Soc. Lond. B*, 270 (2003), p. 1237–1245.
- [239] D. PICARD, C. DACREMONT, D. VALENTIN ET A. GIBOREAU, *Perceptual dimensions of tactile textures*, *Acta Psychologica*, 114 (2003), p. 165–184.
- [240] S. PINKER, *How the Mind works*, Norton, New-York, 1997.
- [241] PLATON, *La République, livre VII*, Gallimard Folio "Essais" n°228, 1993.
- [242] J. C. PLATT, *Fastmap, Metricmap, and landmark MDS are all Nyström algorithms*, in In Proceedings of 10th International Workshop on Artificial Intelligence and Statistics, 2005, p. 261–268.
- [243] J. J. PRINZ, *Emotion and aesthetic value*. The Aesthetic Psychology Conference, Durham England, 2007.

- [244] ———, *Is emotion a form of perception ?*, Canadian Journal of Philosophy, supplementary volume 43 (2007), p. 137–160.
- [245] J. F. RAYPORT ET D. LEONARD-BARTON, *Spark innovation through empathic design*, (Harvard Business Review, (1997), p. 102–113.
- [246] T. REGIER ET P. KAY, *Language, thought, and color : Whorf was half right*, Trends in Cognitive Sciences, 13 (2009), p. 439–446.
- [247] T. REGIER, P. KAY ET N. KHETARPAL, *Color naming and the shape of color space*, Language, 85 (2009), p 8 pages.
- [248] RENAULT, *Référentiel tactile Sensotact©*. www.sensotact.com.
- [249] A. REY ET J. REY-DEBOUE, *Le nouveau Petit Robert, dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française*, Editions Le Robert, Paris, 1994.
- [250] H. R. RINSE ET C. E. SCHREINER, *Do primary sensory areas play analogue roles in different sensory modalities ?*, in Cortical Areas : Unity and diversity. Section IV : Functional Equivalence between areas, A. Schüz et R. Miller, édés., Conceptual Advances in Brain Research, Taylor & Francis, 2002, chap. 13, p. 273–310.
- [251] E. RISVIK, J. A. MCEWAN, J. S. COLWILL, R. ROGERS ET D. H. LYON, *Projective mapping : a tool for sensory analysis and consumer research*, Food Qual. Prefer., 5 (1994), p. 263–269.
- [252] E. RISVIK, J. A. MCEWAN ET M. RODBOTTEN, *Evaluation of sensory profiling and projective mapping data*, Food Qual. Prefer., 8 (1997), p. 63–71.
- [253] I. I. RIVEST ET G. J. GERLING, *Evaluating populations of tactile sensors for curvature discrimination*, in IEEE Haptics Symposium 2010, 25-26 mars, Waltham, Massachusetts, USA, 2010, p. 59–62.
- [254] S. RIVOLLIER, J. DEBAYLE ET J. C. PINOLI, *Shape representation and analysis of 2D compact sets by shape diagrams*, in IPTA 10, 2nd International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications, K. Djemal et M. Deriche, édés., 2010, p. 411–416.
- [255] M. N. ROBERTS, *Complexity and aesthetic preference for diverse visual stimuli*, Thèse doctorat, Departament de Psicologia, Universitat de les Illes Balears, 2007.
- [256] S. ROBERTS, A. PARUSH ET G. LINDGAARD, *Cognitive theories and aids to support navigation of multimedia information space*, in Cybercartography : theory and practice, D. R. F. Taylor, éd., vol. 4 de Modern Cartography, Elsevier, 2005, p. 231–257.
- [257] E. ROSCH, *Principles of categorization*, in Cognition and categorization, E. Rosch et B. Lloyd, édés., Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum, 1978, p. 27–48.
- [258] I. ROSENFELD, *The Strange, Familiar and forgotten : an anatomy of Consciousness*, Alfred A. Knopf, New York, 1992.

- [259] E. Z. ROTHKOPF, *A measure of stimulus similarity and errors in some paired-associate learning tasks*, Journal of Experimental Psychology, 53 (1957), p. 94–101.
- [260] J.-P. ROYET, D. ZALD, R. VERSACE, N. COSTES, F. LAVENNE, O. KOENIG ET R. GERVAIS, *Emotional responses to pleasant and unpleasant olfactory, visual, and auditory stimuli : a Positron Emission Tomography study*, The Journal of Neuroscience, 20 (2000), p. 7752–7759.
- [261] Y. RUBNER, C. TOMASI ET L. J. GUIBAS, *A metric for distributions with applications to image databases*, in Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Computer Vision, Bombay, India, 1998.
- [262] S. SADOV, L. GORAY ET V. UFNAROVSKY, *PCGrate-S Software version 6.1*. International Intellectual Group Inc., 2004.
- [263] Y. SAKAGUCHI ET K. NAKANO, *Haptic recognition system with sensory integration and attentional perception*, in IEEE Int. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI'94), 2-5 octobre 1994, Las Vegas, USA, 1994, p. 288–295.
- [264] J. W. J. SAMMON, *A nonlinear mapping for data structure analysis*, IEEE Transactions on Computer, C-18 (1969), p. 401–409.
- [265] Y. SATO ET K. IKEUCHI, *Reflectance analysis for 3D computer graphics model generation*, Graphical Models and Image Processing, 58 (1996), p. 437–451.
- [266] SCANDINAVIAN BEAR RESEARCH PROJECT, 2004. Tackasen - Kareliusvåg 2. 79498 Orsa, Sweden.
- [267] E. L. SCHWARTZ, *Computational studies of the spatial architecture of primate visual cortex : columns, maps and protomaps*, in Primary Visual Cortex in Primates, A. Peters et C. Rocklund, édés., vol. 10 de Cerebral Cortex, Plenum Press, 1993.
- [268] P. SEITAVUOPIO, *The roughness and imaging characterisation of different pharmaceutical surfaces*, Thèse doctorat, Faculty of Pharmacy, University of Helsinki, Finlande, 2006.
- [269] R. SHEPARD, *The internal representation of numbers*, Cogn. Psychol., 7 (1975), p. 82–138.
- [270] S. SHIN, *The logical status of diagrams*, Cambridge University Press, 1994.
- [271] Y. G. SHKURATOV ET Y. S. GRYNKO, *Light scattering by media composed of semitransparent particles of different shapes in ray optics approximation : consequences for spectroscopy, photometry, and polarimetry of planetary regoliths*, Icarus, 173 (2005), p. 16–28.
- [272] L. SIMONOT, M. HÉBERT, R. D. HERSCH ET H. GARAY, *Ray scattering model for spherical transparent particles*, JOSAA,A, 25 (2008), p. 1521–1534.
- [273] L. SIVIK ET C. TAFT, *Color naming : a mapping in the NCS of common color terms*, Scandinavian Journal of Psychology, 35 (1994), p. 144–164.

- [274] B. F. SKINNER, *Behaviourism at fifty*, Nature, 140 (1963), p. 951–958.
- [275] J. P. SNYDER, *Map projections - a working manual*, U.S. Geological Survey, 1987. Professional paper 1395.
- [276] SOFTWARE SPECTRA INC., *TFCalc version 3.5.6 : Thin Film Design software*. www.sspectra.com, 2003.
- [277] T. SOMEYA, Y. KATO, T. SEKITANI, S. IBA, Y. NOGUCHI, Y. MURASE, H. KAWAGUCHI ET T. SAKURAI, *Conformable, flexible, large-area networks of pressure and thermal sensors with organic transistor active matrixes*, PNAS, 102 (2005), p. 12321–12325.
- [278] T. SOMEYA, T. SEKITANI, S. IBA, Y. KATO, H. KAWAGUCHI ET T. SAKURAI, *A large-area, flexible pressure sensor matrix with organic field-effect transistors for artificial skin applications*, PNAS, 101 (2004), p. 9966–9970.
- [279] F. W. M. STENTIFORD, *An attention based similarity measure with application to content-based information retrieval*, in Storage and Retrieval for Media Databases, Santa Clara, 22-24 janvier 2003, vol. 5021 de SPIE, 2003.
- [280] ———, *Attention-based similarity*, Pattern Recognition, 40 (2007), p. 771–783.
- [281] I. STEPANEK, *Interpretation and comparison of perceptual spaces*, in Internoise 2005 Congress on Noise Control Engineering. Rio de Janeiro (Brésil) Août 2005, 2005.
- [282] V. SÜLAR ET A. OKUR, *Sensory evaluation methods for tactile properties of fabrics*, Journal of Sensory Studies, 22 (2006), p. 1–16.
- [283] R. SÈVE, *Physique de la couleur : de l'apparence colorée à la technique colorimétrique*, Physique fondamentale et appliquée, Masson, Paris, 1996.
- [284] TACTOLOGIC, *TactoPoint, TactoFlex, TactoPad three-axial tactile sensor arrays*, 2008. H-1083 Budapest, Práter utca 50/a, Hongrie - <http://www.tactologic.com>.
- [285] Y. TANABE ET S. SUGANO, *On the absorption spectra of complex ions I*, Journal of the Physical Society of Japan, 9 (1954), p. 753–766.
- [286] ———, *On the absorption spectra of complex ions II*, Journal of the Physical Society of Japan, 9 (1954), p. 766–779.
- [287] ———, *On the absorption spectra of complex ions III*, Journal of the Physical Society of Japan, 11 (1954), p. 864–877.
- [288] D. R. F. TAYLOR, éd., *Cybercartography : theory and practice*, vol. 4 de Modern Cartography, Elsevier, 2005.
- [289] J. B. TENENBAUM, V. DE SILVA ET J. C. LANGFORD, *A global geometric framework for nonlinear dimensionality reduction*, Science, 290 (2000), p. 2319–2323.
- [290] W. THEISS, *SPRAY : Spectral raytracing software*. www.wtheiss.com, 2001.

- [291] C. THEVENOT, *Synthèses, caractérisations et propriétés électrostimulables d'hydrogels composites polyacrylamide-nanoparticules de polystyrène/polyaniline*, thèse, UPPA, 2006.
- [292] C. THEVENOT, A. KHOUKH, S. REYNAUD, J. DESBRIÈRES ET B. GRASSL, *Kinetics aspects, rheological properties and mechano-electrical effects of hydrogels composed of polyacrylamide and polystyrene nanoparticles*, *Soft Matter*, 2 (2007), p. 437–447.
- [293] J. THIÈVRE, *Cartographies pour la Recherche et l'Exploration de données documentaires*, Thèse doctorat, USTL, Université de Montpellier II, 2006.
- [294] M. E. TIPPING, *Topographic mappings and feed-forward neural networks*, Thèse doctorat, University of Aston, Birmingham, 1996.
- [295] S. TORQUATO, *Random heterogeneous materials : microstructure and macroscopic properties*, vol. 16 de *Interdisciplinary Applied Mathematics*, Springer Science and Business Media Inc., 2002.
- [296] P. TORRENS ET M. ALBERTI, *Measuring sprawl*. Working Paper 27, Centre for Advanced Spatial Analysis, University College of London, 2001.
- [297] TOUCH-HAPSYS PROJECT CONSORTIUM, *TOUCH-HapSys - Towards a Touching Presence : High-definition haptic system*. Projet Européen IST-2001-38040, 2001.
- [298] J. T. TOWNSEND, J. AISBETT, J. BUSEMEYER ET A. ASSADI, *General recognition theory and methodology for dimensional independence on simple cognitive manifolds*, in *Measurement and Representation of Sensations*, H. Colonus et E. N. Dzhafarov, édés., Mahwah, New Jersey - London, UK : Lawrence Erlbaum Associates, 2006, p. 203–241.
- [299] T. W. TSAI, T. C. CHANG, M. C. CHUANG ET D. M. WANG, *Exploration in emotion and visual information uncertainty of websites in culture relations*, *International Journal of Design*, 2 (2008), p. 55–66.
- [300] N. TSINGOS, *A geometrical approach to modeling reflectance functions of diffracting surfaces*. soumis Eurographics Workshop on rendering, EGWR, 2000.
- [301] N. TSUCHIYA ET R. ADOLPHS, *Emotion and consciousness*, *TRENDS in Cognitive Sciences*, 11 (2007), p. 158–167.
- [302] A. TVERSKY, *Features of similarity*, *Psychological Review*, 84 (1977), p. 327–352.
- [303] A. B. VALLBO, H. OLAUSSON ET J. WESSBERG, *Unmyelinated afferents constitute a second system coding tactile stimuli of the human hairy skin*, *Journal of Neurophysiology*, 81 (1999), p. 2753–2763.
- [304] L. VAN DER MAATEN ET G. HINTON, *Visualizing data using t-SNE*, *Journal of Machine Learning Research*, 9 (2008), p. 2579–2605.

- [305] N. J. VAN ECK ET L. WALTMAN, *How to normalize cooccurrence data? an analysis of some well-known similarity measures*, Journal of the American Society for Information Science and Technology, 60 (2009), p. 1635–1651.
- [306] N. J. VAN ECK, L. WALTMAN, R. DEKKER ET J. VAN DEN BERG, *A comparison of two techniques for bibliometric mapping : Multidimensional scaling and VOS*, Journal of the American Society for Information Science and Technology, 61 (2010), p. 2405–2416.
- [307] S. R. VAN TOMME, C. F. VAN NOSTRUM, M. DIJKSTRA, S. C. DE SMEDT ET W. E. HENNINK, *Effect of particle size and charge on the network properties of microsphere-based hydrogels*, European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 70 (2008), p. 522–530.
- [308] F. VARELA, E. THOMPSON ET E. ROSCH, *L'inscription corporelle de l'esprit*, Seuil, Paris, 1993.
- [309] B. VERSPAGEN, *Mapping technological trajectories as patent citation networks : a study on the history of fuel cell research*, Advances in Complex Systems, 10 (2007), p. 93–115.
- [310] P. VUKUSIC, R. SAMBLES, C. LAWRENCE ET G. WAKELY, *Sculpted-multilayer optical effects in two species of Papilio butterfly*, Applied Optics, 40 (2001), p. 1116–1125.
- [311] P. VUKUSIC ET D. G. STAVENGA, *Physical methods for investigating structural colours in biological systems*, J. R. Soc. Interface, 6 (2009), p. 133–148.
- [312] G. J. WARD, *Measuring and modeling anisotropic reflection*, Computer Graphics, 26 (1992), p. 265–272.
- [313] C. WARE, *Color sequences for univariate maps : Theory, experiments, and principles*, IEEE Computer Graphics and Applications, 8 (1988), p. 41–49.
- [314] C. WARE, *Quantitative texture sequences for legible bivariate maps*, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 15 (2009), p. 1523–1530.
- [315] D. WELD ET J. DE KLEER, *Readings in Qualitative Reasoning about physical systems*, Morgan Kaufman, CA, USA, 1990.
- [316] J. WESSBERG, H. OLAUSSON, K. WIKLUND FERNSTRÖM ET A. B. VALLBO, *Receptive field properties of unmyelinated tactile afferents in the human skin*, Journal of Neurophysiology, 89 (2003), p. 1567–1575.
- [317] N. WETTELS, D. POPOVIC ET G. E. LOEB, *Biomimetic tactile sensor*, in Proceedings of BioMed 2007, "2nd Frontiers in Biomedical Devices" Conference, 7-8 juin, Irvine, California, USA, 2007. pub. 38043.
- [318] D. R. WYBLE ET R. S. BERNS, *Validating the accuracy of the MCSL Imaging Goniospectrometer*, final report, Andrew W. Mellon Foundation, 2010.
- [319] H. ZAHOUANI, R. VARGIOLU ET A. MAVON, *Sonde tribo-acoustique*. Brevet WO 2005/085805 A1, 2005.

Extraits du dossier
d'habilitation : CV, liste de
travaux et de publications

Itinéraire

Septembre 1982- juin 1983

DEA de Géologie Appliquée, option Pétrologie, Université Scientifique et Médicale de Grenoble I

Cartographie en haute montagne du Massif du Ruitor (Alpes françaises, secteur du Petit Saint-Bernard), et interprétation pétrographique et géochimique des séries métasédimentaires.

Juin 1983- juin 1985

Doctorant de l'Université Scientifique et Médicale de Grenoble I (Arrêté du 5 juillet 1984)

Travaux réalisés à l'Ecole des Mines d'Alès (EMA) et à la Mine des Malines (Penaroya) au titre du contrat MIR 83.E.1077 de l'action concertée VRSS.

Soutenance le 20 juin 1985 après 2 ans de travaux, mention très honorable avec félicitations.

Juin 1985 - fin 1985

Stagiaire recherche bénévole à l'Institut Dolomieu (Géologie) de Grenoble pour la mise au point et l'étalonnage d'un appareillage de dosage chimique par voie physique (EDXRF).

Fin 1985 - mi 1987

Enseignant en tant que coopérant militaire (VSNA) à l'Institut Algérien du Pétrole de Boumerdes (Cours magistraux, TP, TD et stages)

Assistance Recherche à l'Entreprise de Recherches Minières (EREM) de Boumerdes

Fin 1987

Etudiant, semestre académique du DESS « Informatique Double Compétence (Génie Logiciel) » (IMAG, Université de Grenoble). Intérêt particulier pour algorithmique, gestion de bases de données, interprétation automatique de la structure des partitions musicales. Formation interrompue avant le stage industriel pour intégrer l'EMA en tant qu'enseignant-chercheur.

1988-1991

Enseignant-chercheur (Ministère de l'Industrie), affecté à l'Ecole des Mines d'Alès dans une structure dénommée successivement

- « laboratoire Gisements Miniers »,
- « Institut des Matériaux et des Gisements Miniers - laboratoire Génie Particulaire »,

– « Centre des Matériaux de Grande Diffusion - Laboratoire Poudres Microstructures Macrostructures Mines Propriétés », ce qui rend compte littéralement de l'évolution de l'activité.

En terme de thématique de recherche : passage de la minéralogie et de la minéralurgie à une approche de la complexité dans les matériaux minéraux. Toute propriété d'un matériau polyphasé peut être vue comme la combinaison de propriétés individuelles au sein d'une texture.

Enseignement (Cours, TP, TD, encadrement de stages) et recherche contractualisée

1991

Participation à la définition de la thématique « Minéraux Industriels » du centre.

Missionné par l'EMA pour la préfiguration d'un laboratoire délocalisé à Pau sur le site de la technopole Hélioparc.

1992

Rédaction du projet scientifique, technique et immobilier de la structure paloise

Constitution du dossier de financement (FEDER), et des dossiers d'appel d'offre

Après la création du centre « Poudres Minérales Colorées », responsable de l'animation scientifique et de la gestion financière de la structure

En terme de thématique de recherche : généralisation de l'approche complexe aux propriétés visuelles courantes des matériaux (attributs de couleur) et aux techniques permettant leur prédiction (formulation).

1994

Titularisation dans le rang des Maîtres-Assistants du Ministère de l'Industrie

1997-2000

Coordinateur français du programme CAPES-COFECUB 208-97.

1999

Travail de préfiguration de la plateforme « 2PSM : Propriétés PsychoSensorielles des Matériaux » rassemblant laboratoires, collectivités locales et industriels avec pour objet la création d'activité économique locale.

Rédaction du dossier scientifique et technique, projet de consortium, scénarios financiers.

En terme de thématique de recherche : le passage aux propriétés dites « de deuxième niveau », rendu possible par les progrès de l'instrumentation et nécessaires par l'apparition de nouveaux matériaux, implique de comprendre et quantifier leur mode de perception pour en faire l'ingénierie.

2000

Création de l'association « 2PSM ». Représentant de l'EMA au bureau de l'association (Secrétaire)

2004

Instigateur à 2PSM du 1^{er} workshop international « Materials & Sensations ». Membre du comité local d'organisation

2006

Participation à la création du « Groupe de Recherche commun EMA-Université de Pau-CNRS sur les propriétés PsychoSensorielles des Matériaux ». Représentant de l'EMA au comité de pilotage du groupe.

En terme de thématique de recherche : Concept des « cartes d'apparence »

2008

Co-chairman du 2^e workshop international « Materials & Sensations » qui se tiendra en octobre 2008

LISTE DE PUBLICATIONS ET TRAVAUX

mise à jour au 11 octobre 2011

RECHERCHE

Entre 1988 et 2011, mon activité de recherche à l'EMA s'est exercée au sein du laboratoire « Gisements Miniers », devenu ensuite « Institut des Matériaux et des Gisements Miniers » (IMGM), et enfin « Centre des Matériaux de Grande Diffusion » (CMGD). En 1992, j'ai eu la responsabilité de créer à Pau et d'animer la première implantation délocalisée de l'EMA, ce que j'ai fait jusqu'à la période 1998–2000, à laquelle des problèmes de santé m'ont contraint à réduire sensiblement mon activité. Celle-ci a été constituée, au cours du temps, d'une proportion variable de travaux de recherche, de tâches d'encadrement de DEA, doctorat et post-doctorat, et de tâches administratives ou d'intérêt collectif (participation à la structuration du centre, animation d'équipes, mais également entretien du matériel scientifique et technique pendant les premières années paloises...).

Au plan thématique, mon intérêt pour les propriétés industrielles des minéraux, qui s'est d'abord exercé sur des propriétés pondérales (teneur), puis sur des propriétés d'usage physico-mécaniques (solubilité, réactivité), a évolué progressivement vers les propriétés visuelles. A partir de 1997-1998, les tendances qui se faisaient jour dans l'industrie m'ont amené à envisager une extension de cette thématique au domaine tactile. Cette extension a conduit à la création de l'Association « Propriétés Psychosensorielles des Matériaux » (*2PSM*, au sein du bureau de laquelle j'ai assuré jusqu'ici le poste de Secrétaire), puis à celle du Groupe de Recherche Commun EMA-Université de Pau Pays de l'Adour-CNRS. Depuis 2008, je co-anime le groupe *Sensomines* qui fédère au sein de l'Institut Carnot M.I.N.E.S. les activités de diverses structures des Ecoles des Mines menant des recherches dans le domaine des propriétés sensorielles des matériaux : CEMEF et Centre de Morphologie Mathématique de Mines ParisTech, Centre Sciences des Matériaux et Structures de l'EM de St-Etienne, CMGD et LGEI de l'EM d'Alès. Mes activités de recherche actuelles concernent le développement d'outils destinés à une ingénierie de l'aspect des matériaux. Jusqu'à septembre 2011 j'ai animé l'axe de recherche *Propriétés Psychosensorielles des Matériaux* au sein du pôle Matériaux Polymères Avancés du CMGD de l'EMA.

DEA et THESE

[*DEA*] O. ETERRADOSSI (1983) : Les roches vertes orthodérivées du Massif du Ruitor (Alpes franco-italiennes) : pétrographie et géochimie. *Mémoire de DEA, Option : Pétrographie-Métallogénie*, Université de Grenoble I. 76 pages.

2 publications associées :

[*DEA.1*] T. BAUDIN, O. ETERRADOSSI (1984) : le massif de Ruitor (Alpes Françaises) : Pétrographie et métamorphisme. *Reun. annu. sci. terre*, 1984 (10), p.35

[*DEA.2*] T. BAUDIN, O. ETERRADOSSI, J. FABRE, J. SHADE (1984) : Sédimentation et magmatisme du Permo-Carbonifère et de son socle dans la zone houillère briançonnaise (Savoie, Haut Val d'Aoste). *Mezhdunarodnyj geologicheskij kongress. 27*, Moscou, 4-14 aout 1984, pp.122-123

[*THE*] O. ETERRADOSSI (1985) : La fluorescence X portable : une méthode adaptée à l'estimation de minéralisations en place. Application aux minéralisations zincifères. *Thèse de l'Université de Grenoble I, option Géologie Appliquée*, 135 pages + annexes, mention Très Honorable avec félicitations.

2 publications associées :

[*THE.1*] O. ETERRADOSSI (1985) : La fluorescence X portable : une technique adaptée à l'estimation in-situ. *Congrès de l'Industrie Minérale*, séance plénière - Toulouse 1985.

[*THE.2*] O. ETERRADOSSI, C. KAVOURINOS, J.P. ROLLEY (1985) : Utilisation d'appareils de fluorescence X portables en milieu minier. Application aux minéralisations zincifères. *L'Industrie Minérale - Mines et Carrières - Les Techniques*, dec. 1985, pp.511-517

REVUES NATIONALES OU INTERNATIONALES A COMITE DE LECTURE

- [PL1] B. TOURE, J.M. LOPEZ-CUESTA, O. ETERRADOSSI, P. GAUDON, A. CRESPIY, A. BENHASSAINE (1997) : Incorporation d'ophite dans un copolymère PP PE : Influence sur la coloration et le comportement mécanique des composites. *Eur. Polym. J.*, 33(5), pp.705–711
- [PL2] P. GAUDON, O. ETERRADOSSI, Y. YAN, A. BENHASSAINE, Y. DUSAUSOY, P. TEKELY (1997) : Opal silica behaviour in high pH medium. *J. Chim. Phys.*, 94, pp.799–812
- [PL3] M.S. BACOU, O. ETERRADOSSI, F. SILVESTRE, A. BENHASSAINE, A. GASET (1997) : Valorisation d'effluents chromés de tanneries par transformation thermique en présence de quantités variables de silice : obtention d'un colorant silico-calcique chromifère du verre d'emballage. *Environmental Technology*, 18, pp.387–398
- [PL4] E. GUIBAL, C. MILOT, O. ETERRADOSSI, C. GAUFFIER, A. DOMARD (1999) : Study of molybdate ion sorption on chitosan gel beads by different spectrometric analyses. *International Journal of Biological Macromolecules*, 24, pp.49–59
- [PL5] B. N'DRI-STEMPFER, D. OULAHNA, O. ETERRADOSSI, J. DODDS (2002) : Incidence of pressure on the colour of compacted powders. *Powder Technology*, 128(2–3), pp.320–325
- [PL6] H. GARAY, O. ETERRADOSSI, A. BENHASSAINE (2003) : Predicting changes in the color of powders : does Melamed's model fit to industrial powders? *Color Research & Application*, 29(6), pp.413–419
- [PL7] B. N'DRI-STEMPFER, D. OULAHNA, O. ETERRADOSSI, A. BENHASSAINE, J. Dodds (2003) : Binder Granulation and Compaction of Coloured Powders. *Powder Technology*, 130(1–3), pp.247–252
- [PL8] H. GARAY, O. ETERRADOSSI, A. BENHASSAINE (2005) : Should Melamed's spherical model of size-colour dependance in powders be adapted to non-spheric particles. *Powder technology*, 156, pp.8–18
- [PL9] O. ETERRADOSSI, S. PERQUIS, V. MIKEC (2008) : Using Appearance Maps drawn from gonioscolorimetric profiles to predict sensory appreciation of paints. *Color Research & Application*, 34(1), pp.68–74
- [PL10] J. FRAYRET, O. ETERRADOSSI, A. CASTETBON, M. POTIN-GAUTIER, G. TROUVE, H. De ROULHAC (2008) : Determination of the correlation between physical measurements of roughness, optical properties and perception of frosted glass surfaces. *Applied Optics*, 47(21), pp.3932–3940

[PL11] L. BILLON, M. MANGUIAN, V. PELLERIN, M. JOUBERT, O. ETERRADOSSI, H. GARAY (2009) : Tailoring Highly Ordered Honeycomb Films Based on Ionomer Macromolecules by the Bottom-Up Approach. *Macromolecules*, 42(1), pp.345–356

[PL12] N. CONCHA-LOZANO, P. GAUDON, J. PAGES, G. DE BILLERBECK, D. LAFON, O. ETERRADOSSI (2011) : Protective effect of endolithic fungal hyphae on oolitic limestone buildings. A paraître *Journal of Cultural Heritage*, manuscrit D-11-00151-R1.

[PL13] N. REFIK-SABIRI, O. ETERRADOSSI (2011) : Assessing the semantic space of metallic appearance. Soumis *ACM Transactions on Applied Perception*

[PL14] N. CONCHA-LOZANO, D. LAFON, O. ETERRADOSSI, P. GAUDON (2011) : Assessment of real aging in selection process of replacement materials for stone monuments conservation. *Virtual Archeology Review*, 2(3), pp. 27–31

COLLOQUES AVEC ACTES ET COMITE DE LECTURE

[COL1] P. LAFLAQUIERE, D. LAFON, O. ETERRADOSSI, P. SLANGEN (1998) : Characterization of color texture - CIEL*a*b* calibration of CCD device. *International Symposium on Electronic Image Capture and Publishing*, Europto Series 98, communication 3409-20, Zurich (Suisse), 18-20 May 1998

[COL2] Y. BOURADA, D. LAFON, O. ETERRADOSSI (1998) : Characterization of color texture - Color texture-based sorting of tiles. *International Symposium on Electronic Image Capture and Publishing*, Europto Series 98, communication 3409-45, Zurich (Suisse), 18-20 May 1998.

[COL3] H. BOZEC, O. ETERRADOSSI (1999) : Morphogranulometry and optical behaviour of powders : effects on colorimetric control of pulverulents. *Proceedings of the 2nd Congress of Chemical Engineering (ECCE2)*, Montpellier, 5-7 octobre 1999 (CD Rom)

[COL4] B. N'DRI-STEMPFER, D. OULAHNA, O. ETERRADOSSI, A. BEN-HASSAINE, J. A. DODDS (2001) : Binder granulation and compaction of coloured powders. *Proceedings of the 7th International Symposium on Agglomeration*, Albi, 29-31 mai 2000, PROGEP, vol. 1, pp.353–360

[COL5] B. N'DRI-STEMPFER, D. OULAHNA, O. ETERRADOSSI (2001) : Couleur et texture des poudres compactées : influence de la composition de mélange et de la pression de consolidation. *Récents Progrès en Génie des Procédés*, 15(77), pp.173–180

- [COL6] P. LARRICQ, T. RAMANANANTOANDRO, M. BACOU, O. ETERRADOSSI (2004) : Two compared analyses of roughness on sanded surfaces : how to replace sensorial measure by mechanical measure? *Proceedings of the 2nd international Symposium on Wood Machining, Properties of Wood and Wood Composites Related to Machining*, Vienne (Autriche), 05-07 juillet 2004
- [COL7] C. DERAÏL, O. ETERRADOSSI (2004) : Using blending laws for bread color prediction *1^{er} Workshop International « Materials & Sensations » (MS 2004)*, Pau, 27-29 octobre 2004
- [COL8] O. ETERRADOSSI (2004) : From « CCM » to « TCM » : is there something to learn from Colour Computer Matching to perform Touch Computer Matching? *1^{er} Workshop International « Materials & Sensations » (MS 2004)*, Pau, 27-29 octobre 2004
- [COL9] T. RAMANANANTOANDRO, M. BACOU, O. ETERRADOSSI, D. LAFON (2004) : Taking into account colour aspect parameters in the metrology of tactile roughness perception on wood materials. *1^{er} Workshop International « Materials & Sensations » (MS 2004)*, Pau, 27-29 octobre 2004
- [COL10] T. RAMANANANTOANDRO, P. LARRICQ, A. KHAZAEIAN, M. BACOU, O. ETERRADOSSI (2004) : Application of laser and confocal optical profilometry for 3-D surface metrology on wood materials *IAWA International Symposium on Wood Sciences*, Montpellier, 24-29 octobre 2004
- [COL11] C.O. PETTER, O. ETERRADOSSI, C.H. SAMPAIO (2004) : Reflectance Measurements of Brazilian Coals *International Seminar in Mineral Processing Technology*, Bubhaneswar - India, 2004. *Mineral Processing Technology*. New Delhi : Allied Publishers PVT. Ltd., 2004. vol. 1, pp.45-54
- [COL12] T. RAMANANANTOANDRO, O. ETERRADOSSI, P. LARRICQ (2005) : Relationship between 3D roughness parameters and visiotactile perception of surface roughness on Maritime Pine wood and MDF. *IWMS'17*, Rosenheim (Allemagne), 29 septembre 2005
- [COL13] O. ETERRADOSSI, S. PERQUIS (2006) : Appearance parameters of various opaque materials. A toolbox for manufacturing and quality control. *Proceedings of the 1st CIE Expert Symposium on Visual Appearance*, Paris, 19-20 October 2006, publication CIE x032 :2007, pp. 53-60 (+ CD Rom)
- [COL14] R. BELLA, F. EHRENFELD, O. ETERRADOSSI, S. REYNAUD, B. GRASSL (2008) : Kinetic aspects, rheological properties and mechano-electrical effects of hydrogels composed of polyacrylamide/polyacrylic acid and polystyrene nanoparticles. *7th International Symposium on Polyelectrolytes*, Coimbra (Portugal), 16-19 June 2008
- [COL15] R. BELLA, O. ETERRADOSSI, F. EHRENFELD, S. REYNAUD, B. GRASSL (2008) : Tailoring of hydrogel-based "biomimetic" sensors for direct ins-

trumental evaluation of some tactile descriptors. *Materials and Sensations 2008*, Pau, 22-24 octobre 2008

[COL16] O. ETERRADOSSI (2010) : Exploratory investigation of an Appearance-Emotion relation : the example of hair. *2nd CIE Expert Symposium on Appearance*, Gent (Belgique), 8-10 septembre 2010

[COL17] H. VAHABI, C. LONGUET, L. FERRY, O. ETERRADOSSI, J.M. LOPEZ-CUESTA (2011) : Transparent polycarbonate with improved fire behavior. *9th EU-ROFILLERS International Conference*, Dresden (Allemagne), 21-25 Août 2011

POSTERS DANS COLLOQUES AVEC COMITE DE LECTURE

[POSTL1] C.O. PETTER, O. ETERRADOSSI (1995) : Use of Kubelka-Munk Theory to predict grades of contaminants in kaolin ores. *Mineralogical Society Conference « Industrial Application of Clay Minerals »*, séance Posters, St Austell (UK)

[POSTL2] C.O. PETTER, O. ETERRADOSSI (1996) : Using Kubelka-Munk theory in the Kaolin Industry to predict the Brightness of Blends. *Congrès « Industrial Minerals'96 »*, séance Posters, Brisbane (AUS)

[POSTL3] K.T.E. CAPO-CHICHI, B. VAYSSADE, O. ETERRADOSSI, A. BEN-HASSAINE (1996) : Le couple fines/eau est la base de la coloration du béton coloré. *Congrès International BIBM*, séance Posters, Paris 1-5 juillet 1996.

[POSTL4] O. ETERRADOSSI, E. COMENT (2008) : Assessment of cycling helmets thermal comfort using Appearance Maps drawn from coefficient of heat measurements. *Materials and Sensations 2008*, Pau, 22-24 octobre 2008

[POSTL5] M. MANGUIAN, M. JOUBERT, O. ETERRADOSSI, H. GARAY, L. BILLON, V. PELLERIN (2008) : Tailoring Bio-inspired Iridescent Materials by Bottom-up Approach using Ionomer Macromolecules. *Materials and Sensations 2008*, Pau, 22-24 octobre 2008

REVUES SCIENTIFIQUES SANS COMITE DE LECTURE

- [P1] O. ETERRADOSSI, E. ILDEFONSO, G. VERRAES (1990) : Etude de l'erreur associée à l'estimation in situ de la teneur de lots de volées par fluorescence X. Cas de la mine de Noailhac-St Salvy (Metaleurop). *L'Industrie Minérale - Mines et Carrières - Les Techniques*, mars-avril 1990, pp.28–30
- [P2] H. PICHON, P. GAUDON, A. BENHASSAINE, O. ETERRADOSSI (1996) : Caractérisation et quantification de la fraction réactive dans les pouzzolanes volcaniques. *Bull. LCPC*, 201, pp.29–38
- [P3] E. CAPO-CHICHI, B. VAYSSADE, O. ETERRADOSSI, A. BENHASSAINE (1996) : Qualitätssicherung beim Einfärben von Beton. *Betonwerk+Fertigteil-Technik*, 1996(7), pp.4–68.
- [P4] C.H. SAMPAIO, C.O. PETTER, O. ETERRADOSSI, H. GARAY (2001) : Réflectance de charbons brésiliens. *Revue de la Société de l'Industrie Minérale*, 2001(12), pp.95–98
- [P5] P. SLANGEN, O. ETERRADOSSI, D. LAFON, P. MAURY, E. PERE (2004) : Introduction de nouvelles techniques optiques pour la caractérisation des propriétés psychosensorielles des matériaux. *REE*, (9), oct. 2004
- [P6] N. CONCHA-LOZANO, O. ETERRADOSSI, D. LAFON, P. GAUDON, G. FRONTÉAU, A. BLANC (2009) : Pierre et Couleur. *Pierre Actual*, 2009(10), pp.76–82
- [P7] O. ETERRADOSSI (2010) : Une approche cartographique pour l'ingénierie d'aspect des matériaux. *Matériaux et Techniques*, 2010(2), pp.102–105

COLLOQUES SANS COMITE DE LECTURE

- [C1] O. ETERRADOSSI, E. ILDEFONSO, G. VERRAES (1989) : Etude de l'erreur associée à l'estimation in situ de la teneur de lots de volées par fluorescence X. Cas de la mine de Noailhac- St Salvy (Metaleurop). *Congrès de l'Industrie Minérale*, séance Posters - Alès Septembre 1989
- [C2] O. ETERRADOSSI, P. GAUDON, V. LEVASSEUR, J.M. LOPEZ-CUESTA (1990) : Modifications physico-chimiques d'une « clinoptilolite » française. *Réunion annuelle du Groupe Français des Zéolites*, Agde 8-9 mars 1990
- [C3] O. ETERRADOSSI (1994) : Le Centre de Recherches « Poudres Minérales Colorées ». *Congrès de l'Industrie Minérale*, Bordeaux, séance Posters
- [C4] C.O. PETTER, O. ETERRADOSSI, A. BENHASSAINE (1994) : Préviation des teneurs en contaminants d'un minerai de kaolin par une approche colorimétrique : adaptation du modèle de Kubelka-Munk à des produits à forte dispersion granulométrique. *Congrès de l'Industrie Minérale*, Bordeaux, séance Posters

- [C5] O. ETERRADOSSI (1996) : "Pierre et Couleur" - *Colloque Européen « La Pierre dans la Ville »*, séance plénière, ISRFMP, Rodez.
- [C6] O. ETERRADOSSI, D. LAFON (1997) : Mesures d'aspect sur bâtiments existants ou à (re)construire : Couleur et vieillissement de la pierre, couleur et allotissage, homogénéité de couleur. *Colloque « La Pierre : Archéologie, Architecture et Développement local »*. Alès, juin 1997
- [C7] O. ETERRADOSSI (2001) : Interactions lumière/matière, *Ecole de printemps « Image Couleur »*, Pau, 19-22 mars 2001
- [C8] H. GARAY, O. ETERRADOSSI (2004) : Influence de la morphogranulométrie et de la mise en forme sur la couleur des oxydes métalliques, *Ecole de printemps « Oxydes et composés métalliques »*, Roussillon, 22-26 mars 2004
- [C9] O. ETERRADOSSI, V. MIKEC (2007) : Description sensorielle de la qualité d'aspect des peintures automobiles sur la base de mesures de profils goniocolorimétriques, *réunion finale du GdR CNRS 2602 « Couleur et matériaux à effets »*, Paris, 14 mars 2007
- [C10] N. CONCHA-LOZANO, P. GAUDON, O. ETERRADOSSI, D. LAFON (2010) : Etude de la patine des pierres, exemple d'un calcaire oolitique. *Matériaux 2010 – Surfaces et Interfaces*, Nantes, 18-22 Octobre 2010
- [C11] O. ETERRADOSSI (2011) : Sensations, perceptions, émotions, confiance en soi : différents niveaux d'interaction avec les matériaux. *Journées Matériaux et Sport*, Bordeaux, 26-27 janvier 2011
- [C12] O. ETERRADOSSI (2011) : Sensations, perceptions, émotions : une approche cartographique des différents niveaux d'interaction avec les matériaux. *Colloque Terre 2*, Ecole Nationale Supérieure des Arts Appliqués de Limoges-Aubusson, Limoges, 8-10 mars 2011

JOURNEES TECHNIQUES, PROFESSIONNELLES OU COMMÉMORATIVES

- [JTP1] O. ETERRADOSSI (1993) : La couleur en chiffres : vers un référentiel? « *Journée Pierre* » de la CLAT du Gard, Alès
- [JTP2] O. ETERRADOSSI (1997) : Couleur et granulométrie. *1ères rencontres Coulter « Etats Divisés »*. Paris, 26-27 nov 1997
- [JTP3] C. DERAÏL, O. ETERRADOSSI (2003) : Corrélation entre analyses sensorielles et mesure de la couleur des farines. *Journée Technique de l'ENILIA « Filière blés-farines-produits de cuisson, vers une maîtrise des qualités organoleptiques »*, La Rochelle

- [JTP4] O. ETERRADOSSI (2005) : Matériaux et Sensations. *Journées Polymères en l'honneur du Pr Jeanne François*, Pau, 28-29 septembre 2005
- [JTP5] O. ETERRADOSSI (2005) : Perception, Analyse Sensorielle et Mesures Physiques. *Journée « MIG Luxe et Nanotechnologies » de l'ENSMP*, Pau, 16 novembre 2005
- [JTP6] O. ETERRADOSSI (2006) : Mesure versus Cognition, comment combler le fossé entre les deux mondes? *Réunion du « Bench Qualité perçue »*, Pau, 29 juin 2006
- [JTP7] O. ETERRADOSSI (2007) : Nouveaux aspects, nouvelles mesures? *Journée du Centre Français de la Plasturgie : « Les plastiques nous en font voir de toutes les couleurs »*, Paris, 3 juillet 2007
- [JTP8] O. ETERRADOSSI (2009) : De la psychosensorialité à l'émotion et à l'estime de soi, quel rôle pour les matériaux? *Symposium IX LVMH Recherche "Cosmétiques, Emotions et Image de Soi"*, Paris, 22 septembre 2009
- [JTP9] O. ETERRADOSSI, J.M. LOPEZ-CUESTA (2010) : L'ingénierie des matériaux et sensations au CMGD. *Journée Recherche Industrielle Sensomines*, Mines ParisTech, 4 février 2010
- [JTP10] O. ETERRADOSSI (2011) : Heli'PS, un outil pour des matériaux à sensations. *Réunion du Pôle Polymère Sud*, Pau, 18 juin 2010
- [JTP11] O. ETERRADOSSI (2010) : De l'Appearance Engineering à la Qualité Perçue? *Journée du groupe Bench GIP Qualité Perçue*, Alsthom transport, St-Ouen, 30 novembre 2010

PARTICIPATION A DES PROGRAMMES NATIONAUX OU INTERNATIONAUX

[PI1] 1997-2000 : coordonateur français du programme franco-brésilien CAPES-COFECUB 208/97 : *Développement de techniques spectro-colorimétriques comme outils d'aide à l'exploitation sélective et à la valorisation de kaolins pour l'industrie papetière.*

Après avoir enseigné 16 mois en tant que Volontaire du Service National à l'Institut Algérien du Pétrole, mon activité d'enseignant à l'EMA a connu trois périodes : un fort investissement de 1988 à 1991, autour des enseignements de Sciences de la Terre et leurs applications à l'industrie minière ; de 1992 à 1997 une baisse liée à la mise en place du site palois de l'EMA ; enfin à compter de 1998 un recentrage sur l'encadrement de projets locaux, rendu nécessaire par une réduction de ma mobilité pour raisons de santé.

ENSEIGNEMENT SANS DOCUMENTS EDITES

- [ENS1] O. ETERRADOSSI (1985) : Conférence-cours « Magmatisme et tectonique des plaques ». *Université du Temps Libre, Grenoble I* - 3 heures.
- [ENS2] O. ETERRADOSSI (1986-87) : Cours et TP de Pétrographie magmatique. *Institut Algérien du Pétrole* (Boumerdès, Algérie) - 30 heures / an.
- [ENS3] O. ETERRADOSSI (1986-87) : Cours de Géologie du Système Solaire. *Institut Algérien du Pétrole* (Boumerdès, Algérie) - 8 heures / an.
- [ENS4] O. ETERRADOSSI (1986-87) : TP et TD de Cartographie. *Institut Algérien du Pétrole* (Boumerdès, Algérie) - 20 heures / an + stages de terrain.
- [ENS5] O. ETERRADOSSI (1986-87) : Cours et TP de Minéralogie. *Institut Algérien du Pétrole* (Boumerdès, Algérie) - 20 heures / an.
- [ENS6] O. ETERRADOSSI (1988-91) : Cours, TP et TD de Géologie. *EMA, Tronc Commun* - 20 heures / an + stages
- [ENS7] O. ETERRADOSSI, B. VAYSSADE (1988-91) : Cours et TD d'Hydrogéologie. *EMA, 3^e année* - 40 heures / an
- [ENS8] O. ETERRADOSSI (1988-91) : Cours « Matériaux Naturels » et « Constituants naturels des Céramiques Silico-Alumineuses ». *EMA, Option Matériaux* - 15 heures / an
- [ENS9] O. ETERRADOSSI (1990) : Module « Tests de distribution » du cours « Traitement des Données Expérimentales ». *DEA « Structures - Matériaux - Génie des Procédés », Université de Montpellier* - 4 heures
- [ENS10] O. ETERRADOSSI (1992-98) : Cours « Couleur des Matériaux et Colorimétrie » , « Echantillonnage des matières morcelées ». *EMA, Option Matériaux* - 8 heures / an

[ENS11] O. ETERRADOSSI (1997) : Conférence-cours « Couleur et Matériaux divisés ». *LAPROM, UFRGS, Porto Alegre (Brésil)* - 4 heures

[ENS12] O. ETERRADOSSI (1999) : Cours « Physique et métrologie de la couleur ». *IUSTI, Marseille* - 4 heures

[ENS13] O. ETERRADOSSI (2011) : Matière, Matériaux, Sensations et Emotions : études de cas. *IUT Sciences et Génie des Matériaux de Bordeaux* - 3 heures

ACTIVITE DE FORMATION CONTINUE

[FC1] O. ETERRADOSSI (1997) : « Couleur et Matière divisée ». *entreprise CADAM, Brésil* - 8 heures

[FC2] O. ETERRADOSSI (1998) : « Couleur des Matériaux ». *entreprise SONY France* - 16 heures

[FC3] O. ETERRADOSSI (1998) : « Granulométrie et couleur des Matériaux ». *entreprise BECKMAN COULTER France* - 16 heures

[FC4] O. ETERRADOSSI (2004) : « Gonio-spectrocolorimétrie ». *entreprise RENAULT SAS* - 16 heures

THESES ET MEMOIRES

Thèses soutenues rédigées sous ma direction :

[TD1] (sous la direction officielle de A. BENHASSAINE) H. PICHON (1994) : Le système « pouzzolanes naturelles-chaux-eau » à 38 et 100 °C. Relations entre la réactivité chimique, les phases néoformées et les conséquences physico-mécaniques. Applications aux matériaux volcaniques du Massif Central Français. *Spécialité : Sciences de la Terre, Univ. Joseph Fourier (Grenoble I)*

1 publication associée : [P2]

[TD2] (sous la direction officielle de Ph. WEBER) C. O. PETTER (1994) : Contribution à l'étude de la valorisation de kaolins pour l'industrie papetière : mise au point d'une méthodologie colorimétrique ; application à la sélectivité minière. *Spécialité : Techniques et économie de l'exploitation du sous-sol, ENSMP*

2 publications associées : [POSTL1],[POSTL2]

[TD3] (sous la direction officielle de A. BENHASSAINE) N. PEYNAUD (1995) : Carbonates de calcium naturels, oxydes et hydroxydes de calcium : procédés de transformation, réactivité pouzzolanique et propriétés morpho-granulométriques héritées. *Spécialité : Mécanique, Génie mécanique, Génie Civil, Ecole Doctorale : Sciences pour l'Ingénieur, Univ. Montpellier II*

[TD4] (sous la co-direction officielle de A. GASET et A. BENHASSAINE) M.S. BACOU (1997) : Valorisation par la couleur de boues métallifères : application de la pyrominéralurgie aux boues de déchromation de l'industrie du cuir. Synthèse d'un colorant à usage verrier. *Spécialité : Sciences des Agroressources, INP Toulouse*

1 publication associée : [PL3]

[TD5] (sous la direction officielle de A. BENHASSAINE) H. BOZEC-GARAY (2000) : Paramètres morphogranulométriques et comportement optique des matériaux divisés. Mise en œuvre d'un modèle de diffusion en vue de son application à des opérations industrielles sur des poudres minérales. *Discipline : Génie des Procédés, ENSMSE/INPG*

3 publications associées : [PL6],[PL8],[COL3]

[TD6] (sous la direction officielle de M. FOULETIER) T. RAMANANANTOANDRO (2005) : Implications tactiles et visuelles de la rugosité du bois et des matériaux dérivés du bois de Pin Maritime. *Discipline : Génie des Procédés, ENSMSE / Université J.Monnet St-Etienne*

4 publications associées : [COL6],[COL9],[COL10],[COL12]

Thèses soutenues rédigées sous ma co-direction :

[TD7] (co-direction avec D. OULHANA, officiellement J. DODDS et A. BENHASSAINE) B. N'DRI (2001) : Etude de l'incidence des procédés de granulation et de compression sur la couleur des compacts de poudres et de granulés. *Spécialité : Génie des procédés, ENSMSE/INPG*

4 publications associées : [PL5],[PL7],[COL4],[COL5]

Thèses soutenues à l'encadrement desquelles j'ai participé activement :

[TC1] G. MENSI (1988) : Etude pétrogénétique des occurrences alumineuses de l'unité 1 d'Avène (Montagne Noire, Hérault). *Spécialité : Sciences de la Terre, Univ. Joseph Fourier Grenoble I*

[TC2] P. GRISOUL (1988) : L'analyse des minerais et des minéralisations par spectrométrie de fluorescence X portable - Etude des bisais induits par les contextes géologiques, géologiques et minéralogiques - Applications aux méthodes de prospection et d'exploitation. *Spécialité : Géologie appliquée. Université de Grenoble I*

[TC3] Y. YAN (1995) : Altération des sables par des solutions basiques. *Spécialité : Géomatériaux, Univ. Henry Poincaré Nancy 1*

1 publication associée : [PL2]

[TC4] K.T.E. CAPO-CHICHI (1996) : Matériaux complexes et couleur : hiérarchisation des paramètres et prévision de la couleur dans un béton coloré. *Spécialité : Mécanique-Génie mécanique-Génie civil, Univ. Montpellier 2*

2 publications associées : [P3],[POSTL3]

[TC5] R. GLIESE (2003) : Medição espectrofotométrica de polpas de caulim visando o controle do processo de beneficiamento. *Univ. Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brésil*

DEA sous ma direction :

[D1] C.O. PETTER (1991) : Interprétation des données de pré-exploitation d'un gisement de kaolin brésilien. Etude préliminaire d'une méthode optique de sélectivité. *Spécialité : Exploitation minière, ENSMP*

[D2] N. PEYNAUD (1992) : Microtextures des carbonates de barrières en relation avec certaines de leurs propriétés industrielles. *Spécialité : Océanographie, Univ. Bordeaux I*

[D3] H. BOZEC (1997) : Application du modèle de diffusion de Melamed au calcul de réflectance de poudres industrielles colorées. *Spécialité : Energétique, Transferts, Systèmes dispersés, UPPA*

Stages Post-Doctoraux :

- [PDC1] C.H. SAMPAIO (1998-99) : Colorimétrie et qualité de charbons brésiliens, *EMA-UFRGS (Brésil)*
- [PDC2] I. GREFF (2005-06) : Méthode numérique pour la synthèse ab initio de BRDF, *EMA-UPPA*
- [PDC3] R. BELLA (2007-08) : TactCard, un capteur à base d'hydrogels chargés pour réaliser des cartes d'apparence tactiles, *EMA-UPPA*
- [PDC4] M. De BRUYN (2008-09) : Synthèse de pigments organominéraux, *EMA-UPPA*
- [PDC5] N. REFIK-SABIRI (2010) : Cartographie sémantique, sensorielle et instrumentale de l'aspect métallique, *EMA-Institut Carnot M.I.N.E.S.*
- [PDC6] J. LOSTE (2011) : TactCard 2, optimisation d'hydrogels chargés à fonction tactile, *EMA-UPPA*

Stages d'étudiants étrangers :

Divers élèves-ingénieurs du LAPROM (Laboratoire de Minéralurgie, Prof. C.H. SAMPAIO) de l'université Fédérale du Rio Grande do Sul accueillis à l'occasion de stages d'été dans le cadre du contrat CAPES-COFECUB 208/97. 1 Publication associée [PI1]

Encadrement du stage de thèse (respectivement 24 et 16 mois) de deux doctorants du LAPROM (Gerson F. CAVALCANTE et Edison PACHECO) qui n'ont pas soutenu leur doctorat après leur retour au Brésil

DESIGNATION EN QUALITE DE MEMBRE DE JURY DE THESE

- [J1] F. ALLAIN (1996) : Nouveau concept de géomatériaux pour barrières étanches et antipolluantes : utilisation de coproduits miniers. *Discipline : Géologie de l'Ingénieur, INSA Rennes*
- [J2] M. IRRANAJAD BISAFAR (1998) : Valorisation de rejets miniers talqueux par voie physico-chimique (flottation) : Influence des traitements sur la blancheur des concentrés. *Discipline : Géosciences / Matières premières, INPL*
- [J3] F. LEGAY (2005) : Caractérisation morphologique des défauts d'aspect et détermination d'une méthodologie optique de quantification. *Spécialité : Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques, Univ. de Franche-Comté*

[J4] J. FRAYRET (2006) : Etude des mécanismes de satinage du verre ; mise au point de compositions et procédés permettant une réduction de la pollution à la source. *Spécialité : Environnement et Matériaux, UPPA*

ENCADREMENT DE TRAVAUX DE RECHERCHE, MEMOIRES D'ELEVES INGENIEURS, DESS ET MASTERS

- [IR1] V. LEVASSEUR (1988-89) : Caractérisation des propriétés de zéolites, *Init. Rech. EMA*
- [IR2] P. BARTHE (1989-90) : Fixation des ions ammonium par une zéolite, *Init. Rech. EMA*
- [IR3] I. OUEDRAOGO, C. HURET (1989) : Réorganisation d'une carrière en fonction des résultats de l'étude de stabilité, *Proj. Indus. EMA*
- [IR4] F. POLIDORO, C. SEIGNEURIE (1990-91) : La silice légère de la Capelle-Masmolène, *Init. Rech. EMA*
- [IR5] V. TARNIER (1990-91) : La Magnésie, *Et. Sci. EMA*
- [IR6] V. LEVASSEUR, L. ROSSI (1990) : Caractérisation de sables de la région de Pau, *Et. Techn. EMA*
- [IR7] V. LEVASSEUR, L. ROSSI (1990) : Etude minéralogique et valorisation globale d'un gisement sablo-argileux de Lagos (64), *Proj. Indus. EMA*
- [IR8] A. DOURFAYE, F. ROUCOULE (1990) : Buisson-Chapuy TP face au problème des agrégats dans le Chablais, *Proj. Indus. EMA*
- [IR9] F. ALLAIN, G.R. SARACCO (1991) : Etude du comportement de sables siliceux au broyage, *Et. Techn. EMA*
- [IR10] F. ALLAIN, G.R. SARACCO (1991) : Mise sous contrôle d'aspect d'un procédé de fabrication du béton cellulaire, *Proj. Indus. EMA*
- [IR11] V. GAY, P. SOULIE (1991) : Etude de la calcination d'un mélange sciure-kaolin, *Proj. Indus. EMA*
- [IR12] C. COTE, L. THOMAS (1996-97) : Caractérisation des ocres de Roussillon, *Init. Rech. EMA*
- [IR13] J. COMBES, H. DUFFEY (1996-97) : La production d'ocres dans le Sud-Est : Evolution historique de l'activité et du bassin de commercialisation, état actuel du marché et des importations, *Et. Socio-Ec. EMA*
- [IR14] F. GAVART, S. LANGLOIS (1992) : Etude de l'atelier de double cyclonage en milieu dense de Glomel, *Proj. Indus. EMA*

- [IR15] F. CHAZOT, C. GUILHOT (1992) : Copie de la couleur d'un enduit. Etude de faisabilité, *Et. Techn. EMA*
- [IR16] F. CHAZOT, J. BENABIDILLAH (1992) : Copie de l'enduit dit « du Coulon ». Palette d'enduits colorés, *Proj. Indus. EMA*
- [IR17] G. AUBE (1994) : Extension de la carrière du Pic de Rebenacq, *Proj. Indus. EMA*
- [IR18] T. CRASTES, X. DELPOSEN (1995) : Mise en conformité de carrières. Application aux installations classées sur sites pollués en France, *Proj. Indus. EMA*
- [IR19] M. BROCHIER (1996) : Evolution dans le temps de la couleur d'enrobés : mesures sur sites et simulation accélérée, *Proj. Indus. EMA*
- [IR20] J. PEREZ (1997) : Etude de la couleur d'un revêtement émail recouvrant une porcelaine électrotechnique, *Proj. Indus. EMA*
- [IR21] O. SILLY (1994) : Inventaire et analyse semi-quantitative de boues chromées issues de l'industrie du cuir, *Stage Ingénieur ENSIGTI (Pau)*
- [IR22] O. SILLY (1995) : Effluents chromifères : Analyse semi-quantitative et étude des paramètres de floculation, *Microthèse ENSIGTI (Pau)*
- [IR23] H. BOZEC (1996-97) : Etude du comportement optique de deux poudres minérales colorées, *Microthèse ENSIGTI (Pau)*
- [IR24] F. BIDART (1998) : Etude du rôle joué par la forme des particules dans le comportement optique d'échantillons de poudres minérales compactées, *IUP GSI/GM (Poitiers)*
- [IR25] E. CHAUSSON (1999) : Recherche d'un protocole de séparation granulométrique des particules de poudres colorées sans altération de leur couleur, stage *DEUG Sciences de la Matière, UPPA*
- [IR26] D. SANCHEZ (1999) : Mise en évidence d'une stratégie de triage sur des matériaux à texture colorée. *IUT Statistique et Traitement Informatique des Données, UPPA*
- [IR27] V. BEGAT, E. DUPUIS (2000) : Reformulation de produits cosmétiques, *Proj. Indus. EMA*
- [IR28] A. GABILLON, L. JOSSERAND, Y. MALET (2000) : Faisabilité de la diversification d'une entreprise locale, *Mission entrepreneuriale M4, EMA*
- [IR29] M. SAINTE-FAUSTE (2001) : Formulation de teinte appliquée aux céramiques. *Mémoire IUP Génie des Matériaux, UPPA*
- [IR30] M.P. ALEGRIA, H. COURALET, A. PEREZ (2002) : Analyse de données de colorimétrie, *TER Maîtrise MASS, UPPA*
- [IR31] H. LE CLOAREC (2002) : Etude du toucher de mélanges de poudres, *MST Chimie option Arômes et Parfums, Université du Havre*

- [IR32] S. PONT (2004) : Etude de matériaux polymères permettant d'exploiter les propriétés de la lumière, *Proj. Indus. EMA*
- [IR33] A. CHAMPAVERE (2005) : Mise au point et caractérisation de matériaux composites lumineux, *Proj. Indus. EMA*
- [IR34] B. LE MAGUERESSE, Y. RAGUENES, C.H. REGAUD (2006) : Conception TRIZ d'un chausson innovant, *Mission entrepreneuriale M3, EMA*
- [IR35] E. GIRAUD (2006) : Substrats souples lumineux, *Proj. Indus. EMA*, 14^e Challenge ITECH
- [IR36] M. DUSSIN (2006) : Etude psychosensorielle de satinages de verre, *Mastère Pro, UPPA*
- [IR37] A. DJAOUANI (2006) : Exploitation statistique de données colorimétriques matricielles, *Mastère Recherche, UPPA*
- [IR38] B. LEBLANC, B. ORSAT, G.PAGES (2007) : Réalisation d'un chausson innovant, *Mission entrepreneuriale M3, EMA*
- [IR39] G. BOURDAIS (2008) : Etude de propriétés physico-chimiques (de surface) et sensorielles de peintures et vernis à « toucher soft », *DRT Génie des Matériaux, Université d'Evry-Val d'Essonne*

RAPPORTS DE FIN DE CONTRAT

- [R1] O. ETERRADOSSI (1985) : Rapport final du contrat MIR 83.E.1077 (action concertée VRSS) « Essais d'étude de minéralisations en place à l'aide d'un appareil d'analyse par fluorescence X activée par source radioactive ». Rapport EMA
- [R2] O. ETERRADOSSI (1988) : Examen critique des données bibliographiques sur les utilisations agricoles des zéolites. Rapport EMA
- [R3] O. ETERRADOSSI (1989) : Prospection et évaluation d'indices de zéolites en vue d'un usage agricole. Rapport EMA
- [R4] O. ETERRADOSSI (1991) : Caractérisation de la blancheur et du comportement au broyage de carbonates fins issus de la carrière des Estailades (SMECPT). Rapport EMA
- [R5] O. ETERRADOSSI (1994) : Etude de la pigmentation de céramiques silico-alumineuses : Faisabilité d'une démarche de « formulation » pour une production de lots de qualité homogène. Rapport EMA
- [R6] O. ETERRADOSSI : Audit d'une procédure d'échantillonnage de calcin ménager (recyclage du verre). Rapport EMA
- [R7] O. ETERRADOSSI (1995) : Analyse de la marche d'une installation industrielle de broyage de pigments pour céramiques alumineuses - 1^{re} partie : broyage d'une matière première de provenance unique (Lot "R1"). Rapport EMA
- [R8] O. ETERRADOSSI (1996) : Analyse de la marche d'une installation industrielle de broyage de pigments pour céramiques alumineuses - 2^e partie : broyage d'une matière première mixte (Lot "R23") et conclusions générales. Rapport EMA, 1996.
- [R9R12] O. ETERRADOSSI (1995-96) : Détermination de la composition minéralogique, de la composition chimique et de la capacité d'échange cationique de 18 zéolites. 4 rapports EMA
- [R13] O. ETERRADOSSI (1997) : Blancheur de poudres carbonatées. Rapport EMA RT97/004/002
- [R14] O. ETERRADOSSI (1997) : Note d'orientation sur l'échantillonnage aux carrières du Boulonnais. Rapport EMA RT97/018/011
- [R15] O. ETERRADOSSI (1997) : Blancheur de poudres carbonatées. Rapport EMA RT97/024/012

- [R16] O. ETERRADOSSI (1997) : Faisabilité d'un formulateur de teintes pour gel-coats. Rapport EMA RS97/017/02
- [R17] O. ETERRADOSSI (1999) : Algorithme de calcul de contretypes pour bétons colorés. Rapport EMA
- [R18] O. ETERRADOSSI, H. BOZEC : 1^{re} phase de travaux, préalable à l'étude de la blancheur de Sb_2O_3 en relation avec le process de fabrication. Rapport EMA RS98/061
- [R19] M.S. BACOU, O. ETERRADOSSI (1999) : Faisabilité de l'obtention de poudres d'émaux microniques par voie mécanique (Projet PAMM AO.96 047). Rapport EMA RS97/016
- [R20] O. ETERRADOSSI (2000) : Etude de la faisabilité de la coloration d'un béton par des coproduits industriels. Rapport EMA RS00/55/01
- [R21] O. ETERRADOSSI (2000) : Faisabilité de la caractérisation rapide de l'aspect de bouteilles « dépolies ». Rapport EMA RT03/CT01-070/03
- [R22] O. ETERRADOSSI (2002) : Mise au point et test industriel d'une technique d'exploitation sélective de colorants minéraux naturels basée sur la relation pétrographie / potentiel colorant. Résultats n'ayant pas fait l'objet d'un rapport rédigé.
- [R23R25] O. ETERRADOSSI, H. GARAY (2002-2004) : Sensibilité de l'œil humain à l'aspect « peau d'orange » des peintures de carrosseries. 3 Rapports EMA RT02/CT02-074/54, RT03/CT02-074/06 et RS04/CT01-074/01
- [R26] O. ETERRADOSSI (2005) : Caractérisation optique de formules cosmétiques à base de talcs et de nacre. Rapport EMA RS05/CT03-098/27
- [R27] O. ETERRADOSSI (2005) : Exploration des causes de variations d'aspect constatées sur des céramiques. Rapport EMA RS05/CT05-086/24
- [R28] O. ETERRADOSSI (2005) : Faisabilité de la mise sous contrôle d'un procédé de réalisation de plaques d'inox coloré thermiquement. Rapport EMA RS05/CT04-008/28
- [R29] O. ETERRADOSSI (2006) : Etude des caractéristiques optiques d'échantillons cosmétiques en réflexion et transmission. Rapport EMA RT06/PR06-094/029
- [R30] O. ETERRADOSSI (2007) : Elaboration d'une maquette de « fiche technique sensorielle » - *Partie 1* : information visuelle. Rapport EMA RS07/CT06-040/01
- [R31] O. ETERRADOSSI (2007) : Faisabilité de la caractérisation du vieillissement visuel de polymères au moyen de « Cartes d'Apparence ». Rapport EMA

CONTRIBUTION A DES LOGICIELS

[LOG1] 2005-2006 : *The ColorDIMENSIONS EyeBox* : développement d'algorithmes de traitement de données colorimétriques en vue de la caractérisation globale de l'aspect visuel

[LOG2] 2007 : *PLOTRIX : Various plotting functions* (avec J. LEMON, B. BOLKER, S. OOM, E. KLEIN, B. ROWLINGSON, H. WICKHAM, A. TYAGI). R package version 2.1-8

EXPERTISES

[EX1] 1987 : Expertise/accompagnement dans le domaine de l'analyse chimique par voie physique. *Entreprise de Recherche et d'Exploration Minière (EREM)* (Boumerdès, Algérie)

[EX2] 2001 : Expert extérieur, Séminaire interne du groupe *IMERYS Tiles Minerals*

[EX3] 2001 : Expertise de dossier de l'appel d'offre *SESAME* (Région Ile-de-France)

[EX4] 2011 : Expert extérieur, Séminaire stratégique interne *LVMH Recherche*

SOCIETES SAVANTES, GDR ET COMITES TECHNIQUES

[SST1] 1985 : Société de l'Industrie Minérale

[SST2] 1989-90 : Groupe Français des Zéolites

[SST3] depuis 2004 : GDR-CNRS 2602 : Couleur et matériaux à effets visuels

[SST4] 2007-2011 : Commission Internationale de l'Eclairage, TC1-72

ORGANISATION DE LA RECHERCHE

[ORG1] 1990 : Participation à l'élaboration de la thématique d'une équipe « Minéraux Industriels » au sein du laboratoire « Poudres, Microstructures, Macrostructures, Mines et Gisements » (LP3MG) de l'IMGM

[ORG2] 1992 : Mission exploratoire de la faisabilité d'une implantation de l'EMA à Pau

[ORG3] 1993-1994 : Elaboration du projet de recherche, du dossier immobilier, du dossier de financement, du dossier technique, et installation pratique du laboratoire de l'EMA à Pau

[ORG4] 1994-2000 : Responsable du Centre de Recherche « Poudres Minérales Colorées » de l'EMA à Pau

[ORG5] 1998-1999 : Elaboration du projet de « Plateforme Intégrée Propriétés Psychosensorielles des Matériaux » (2PSM). Structuration thématique, recherche du partenariat industriel, relations institutionnelles.

[ORG6] 1999 : animateur de l'équipe « Propriétés d'usage » du CMGD (sites de Pau et Alès)

[ORG7] 2000-2008 : secrétaire de « 2PSM », association loi de 1901 issue du projet de plateforme.

[ORG8] 2001-2006 : représentant de l'EMA au « Comité de Projet » de l'Association 2PSM

[ORG9] 2006-2008 : représentant de l'EMA au Comité de Pilotage du Groupe de Recherche commun EMA-UPPA-CNRS *Propriétés Psychosensorielles des Matériaux*

[ORG10] depuis 2008 : co-animateur du groupe Carnot M.I.N.E.S « SensoMINES »

[ORG11] de 2010 à sept. 2011 : animateur de l'axe thématique *Propriétés Psychosensorielles des Matériaux* au CMGD

ORGANISATION DE CONGRES

[MS04] Initiateur, et membre du comité d'organisation du *1^{er} Workshop International « Materials & Sensations » (MS 2004)*, Pau, octobre 2004

[MS08] co-chairman du *2^e Workshop International « Materials & Sensations » (MS 2008)*, Pau, 22-24 octobre 2008

PARTICIPATION A DES EVENEMENTS SCIENTIFIQUES GRAND PUBLIC

[SF1] Science en Fête 1996 : *calcination d'ocres au feu de bois dans le four restauré de l'Usine Mathieu à Roussillon*.

Collecte et interprétation en temps réel, pendant 24 heures, de données thermiques au cœur de briques d'ocre enfournées. Calcination menée par E. Icard et R. Arnaud, derniers ouvriers à avoir pratiqué la calcination industrielle des ocres au feu de bois sur le site de Roussillon. Matériel d'acquisition fourni par la société SEPR (Le Pontet).

Expressions de dissimilarité

Le contenu de cette annexe est emprunté intégralement au chapitre 5 de la thèse de doctorat d'E. Pekalska [229].

Dans ce qui suit, $s\mathcal{F} = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ désigne un ensemble de variables ou d'attributs, et \mathcal{D}_{f_i} l'ensemble des valeurs prises par f_i .

données binaires Dans le cas de données binaires, chaque objet i est représenté par un vecteur $x_i \in \mathcal{B}^m$, avec $\mathcal{B} = \{0, 1\}$. Pour tout couple $(x_i, x_j) \in \mathcal{B}^m$, le produit scalaire est défini comme $x_i^T x_j = \sum_{k=1}^m x_{ik} x_{jk}$ et $1 - x$ est le complémentaire de x . On définit également les compteurs :

- $a_{ij} := x_i^T x_j$, nombre de propriétés communes aux deux objets
- $b_{ij} := x_i^T (1 - x_j)$, nombre de propriétés de i que j ne possède pas
- $c_{ij} := (1 - x_i)^T x_j$, nombre de propriétés de j que i ne possède pas
- $d_{ij} := (1 - x_i)^T (1 - x_j)$, nombre de propriétés que ni i ni j ne possèdent

où $a_{ij} + b_{ij} + c_{ij} + d_{ij} = m$.

Reference	Similarity S	Range	S psd	Dissimilarity D			
				$D = (1 - S)^{\frac{1}{2}}$		$D = 1 - S$	
				Metric	Euclidean	Metric	Euclidean
Russel & Rao	$\frac{a}{a+b+c+d}$	[0, 1]	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Simple matching	$\frac{a+d}{a+b+c+d}$	[0, 1]	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Jaccard	$\frac{a}{a+b+c}$	[0, 1]	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Dice	$\frac{a}{a+(b+c)/2}$	[0, 1]	Yes	Yes	Yes	No	No
Sokal & Sneath	$\frac{a+d}{a+(b+c)/2+d}$	[0, 1]	No	Yes	No	No	No
Anderberg	$\frac{a}{a+2(b+c)}$	[0, 1]	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Rogers & Tanimoto	$\frac{a+d}{a+2(b+c)+d}$	[0, 1]	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Kulczynski	$\frac{1}{2} \left(\frac{a}{a+b} + \frac{a}{a+c} \right)$	[0, 1]	No	No	No	No	No
Anderberg2	$\frac{1}{4} \left(\frac{a}{a+b} + \frac{a}{a+c} + \frac{d}{c+d} + \frac{d}{b+d} \right)$	[0, 1]	No	No	No	No	No
Hamman	$\frac{(a+d)-(b+c)}{a+b+c+d}$	[-1, 1]	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Yule	$\frac{ad-bc}{ad+bc}$	[-1, 1]	No	No	No	No	No
Pearson	$\frac{ad}{\sqrt{(a+b)(a+c)(b+d)(c+d)}}$	[0, 1]	Yes	Yes	Yes	No	No
Pearson2	$\frac{ad-bc}{\sqrt{(a+b)(a+c)(b+d)(c+d)}}$	[-1, 1]	Yes	Yes	Yes	No	No
Ochiai	$\frac{a}{\sqrt{(a+b)(a+c)}}$	[0, 1]	Yes	Yes	Yes	No	No

Reference	Dissimilarity D	Range	Metric	Euclidean
Binary Euclidean	$(b+c)^{\frac{1}{2}}$	$[0, \infty)$	Yes	Yes
Hamming	$b+c$	$[0, \infty)$	Yes	No
Variance	$\frac{b+c}{4(a+b+c+d)}$	$[0, \infty)$	Yes	No
Bray-Curtis	$\frac{b+c}{2a+b+c}$	[0, 1]	No	No
Binary size difference	$\frac{(b-c)^2}{(a+b+c+d)^2}$	$[0, \infty)$	No	No
Binary pattern difference	$\frac{bc}{(a+b+c+d)^2}$	[0, 1]	No	No
Binary shape difference	$\frac{(a+b+c+d)(b+c)-(b-c)^2}{(a+b+c+d)^2}$	$[-\infty, \infty)$	No	No

FIGURE B.1 – Similarités et dissimilarités entre profils définis par des variables binaires

La figure B.1 énumère 35 expressions de dissimilarité pour ce type de données, auxquelles il faudrait ajouter la famille des expressions liées aux défini-

tions proposées par Gower [117] (les indices ij ont été supprimés) :

$$S_\theta = \frac{a+d}{a+d+\theta(b+c)} \text{ and } T_\theta = \frac{a}{a+\theta(b+c)} \quad (\text{B.1})$$

ce qui donne les propriétés suivantes pour les dissimilarités :

1. $(1 - S_\theta)$ et $(1 - T_\theta)$ sont métriques pour $\theta \geq 1$. $(1 - S_\theta)^{1/2}$ et $(1 - T_\theta)^{1/2}$ sont métriques pour $\theta \geq 1/3$
2. si $(1 - S_\theta)^{1/2}$ est euclidienne, alors $(1 - S_\phi)^{1/2}$ pour tout $\phi \geq \theta$. Idem pour T_θ
3. $(1 - S_\theta)^{1/2}$ est euclidienne pour $\theta \geq 1$ et $(1 - T_\theta)^{1/2}$ pour $\theta \geq 1/2$

données catégorielles Soit X une matrice de $n \times m$ données catégorielles, et f_k une propriété valuée sur c_k catégories de sorte que $c = \sum_{k=1}^m c_k$. On utilise les mesures de la table B.1 après avoir transformé chaque vecteur x_i en un vecteur binaire $\tilde{x}_i = [\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_m]$. \tilde{x}_k est un vecteur de longueur c_k ne comportant que des 0 à l'exception d'un 1 à la position j si x_{ik} appartient à la catégorie numéro j .

données ordinales La notation est la même qu'au paragraphe précédent, mais la mesure de dissimilarité doit tenir compte de la position des catégories dans l'échelle, et doit être plus grande pour les catégories éloignées que pour les catégories proches. On utilise une généralisation de la dissimilarité de Jaccard de B.1. Pour deux profils p_i et p_j :

$$d(p_i, p_j) = \frac{\sum_{k=1}^m x_{ik} + \sum_{k=1}^m x_{jk} + 2 \sum_{k=1}^m \min(x_{ik}, x_{jk})}{\sum_{k=1}^m x_{ik} + \sum_{k=1}^m x_{jk} - 2 \sum_{k=1}^m \min(x_{ik}, x_{jk})} \quad (\text{B.2})$$

Il est également possible de transformer les vecteurs ordinaux en vecteurs binaires. p_i peut être représenté par un vecteur binaire $x_i^* = [x_1^*, \dots, x_m^*]^T$. x_k^* est un vecteur binaire de longueur c_k comportant h_k fois la valeur 1 puis $c_k - h_k$ fois la valeur 0, ce qui signifie que l'observation x_{ik} prend la valeur occupant la position h_k dans la liste ordonnée des c_k valeurs de la propriété f_k . On peut alors appliquer une quelconque des formules de dissimilarité binaire.

données quantitatives La figure B.2 liste les formules de dissimilarité pour des variables quantitatives. Les plus courantes d'entre elles appartiennent à la famille dite des distances l_p dont l'écriture générale est :

$$d_p(x, y) = \|x - y\|_p = \left\{ \sum_{i=1}^m (x_i - y_i)^p \right\}^{1/p} \text{ avec } p \geq 1 \quad (\text{B.3})$$

Parce que la dépendance de m variables quantitatives peut s'exprimer par la matrice de covariance Σ , on peut écrire une expression plus générale de la distance euclidienne sous la forme :

$$d_m^2(x, y) = (x - y)^T \Sigma^{-1} (x - y) \text{ connue sous le nom de distance de Mahalanobis} \quad (\text{B.4})$$

Si on ignore la valeur de Σ , on utilise son estimation C calculée sur un échantillon de n valeurs, qui s'exprime comme $C = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(x_i - \bar{x})^T$ ou, si on dispose de la répartition en k classes d'effectifs n_i : $C = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_j - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_i)^T$, \bar{x}_i étant la moyenne de la classe i .

Reference	D	Dissimilarity $d(x, y)$	Metric	Euclidean
Euclidean	D_E, D_2	$\sqrt{(x - y)^T(x - y)}$	Yes	Yes
City block	D_1	$\sum_{i=1}^m x_i - y_i $	Yes	No
Max norm	D_{max}	$\max_i x_i - y_i $	Yes	No
l_p or Minkowski	D_p	$[\sum_{i=1}^m x_i - y_i ^p]^{1/p}, p \geq 1, p \neq 2$	Yes	No
Mahalanobis	D_M	$\sqrt{(x - y)^T C^{-1} (x - y)}$; C is psd	Yes	Yes
Median distance	D_{med}	$D_{\lfloor n/2 \rfloor - rank}$	No	No
Correlation-based	D_{corr}	$\frac{1}{2} \left(1 - \frac{x^T y}{\ x\ ^2 + \ y\ ^2} \right)$	No	No
Correlation-based	D_{corr2}	$\frac{1}{2} \left(1 - \frac{x^T y}{\ x\ ^2 + \ y\ ^2 - 2x^T y} \right)$	No	No
Cosine	D_{cos}	$\frac{1}{2} \left(1 - \frac{x^T y}{\ x\ \ y\ } \right)$	No	No
Divergence	D_{div}	$\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - y_i)^2}{(x_i + y_i)^2}}$	No	No
Bray and Curtis	D_{BC}	$\frac{\sum_{i=1}^n x_i - y_i }{\sum_{i=1}^n x_i + y_i}$	No	No
Soergel	D_S	$\frac{\sum_{i=1}^n x_i - y_i }{\sum_{i=1}^n \max\{x_i, y_i\}}$	No	No
Ware and Hedges	D_{WH}	$\sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{\min\{x_i, y_i\}}{\max\{x_i, y_i\}} \right)$	No	No

FIGURE B.2 – Similarités et dissimilarités entre profils définis par des variables quantitatives

données symboliques Les objets dits symboliques sont décrits par m variables f_i ayant chacune un domaine de variation \mathcal{D}_{f_i} et une règle logique de la forme $\{f_i \in \mathcal{X}_i, \text{ avec } \mathcal{X}_i \subseteq \mathcal{D}_{f_i} \text{ (par exemple : [couleur} \in \{\text{rouge, vert, jaune}\})}$ ou $[\text{poids} \in (10, 20)]$. La dissimilarité entre deux objets symboliques $x = [f_1 \subseteq \mathcal{X}_1] \wedge \dots \wedge [f_m \subseteq \mathcal{X}_m]$ et $y = [f_1 \subseteq \mathcal{Y}_1] \wedge \dots \wedge [f_m \subseteq \mathcal{Y}_m]$ est définie comme :

$$d(x, y) = \sum_{i=1}^m [d_p(x_i, y_i) + d_s(x_i, y_i) + d_c(x_i, y_i)] \quad (\text{B.5})$$

où d_p , d_s et d_c sont normalisés sur l'intervalle $[0, 1]$ et désignent des indices respectivement de position, de dispersion et de contenu. d_p n'est défini que pour les variables quantitatives, d_s et d_c sont définis pour les variables quantitatives, symboliques et ordinales. Si on désigne par $\mathcal{X}_i = [x_i^l, x_i^u]$ et $\mathcal{Y}_i = [y_i^l, y_i^u]$ les intervalles (avec les exposants l et u désignant les limites inférieures et supérieures), il vient :

1. $d_p(x_i, y_i) = |x_i^l - y_i^l| / |\mathcal{D}_{f_i}|$ où $|\mathcal{D}_{f_i}|$ est l'étendue totale de f_i . d_p indique la position relative de 2 valeurs.
2. $d_s(x_i, y_i) = |l_x - l_y| / \text{span}(x_i, y_i)$. d_s représente la taille relative des valeurs en excluant la zone de recouvrement :
 - pour les variables quantitatives $l_x = |x_i^u - x_i^l|$, $l_y = |y_i^u - y_i^l|$ et $\text{span}(x_i, y_i) = |\max(x_i^u, y_i^u) - \max(x_i^l, y_i^l)|$
 - pour les autres types de variables $l_x = |\mathcal{X}_i|$, $l_y = |\mathcal{Y}_i|$ et $\text{span}(x_i, y_i) = |\mathcal{X}_i \cup \mathcal{Y}_i|$
3. $d_c(x_i, y_i) = |l_x + l_y - 2 \text{length}(\mathcal{X}_i \cap \mathcal{Y}_i)| / \text{span}(x_i, y_i)$. d_c mesure la zone de recouvrement des variables.

Bien que Pekalska n'y fasse pas allusion, ces formules ont été critiquées par leur propre auteur comme produisant des résultats incohérents dans certaines configurations particulières des données. Gowda a depuis proposé de nouvelles formules destinées à corriger ces comportements, mais la logique reste la même [113, 114].

ANNEXE **C**

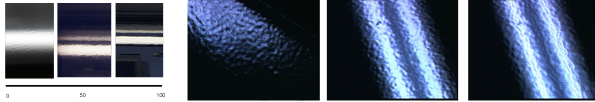
Posters

Introduction

- Orange Peel development on automotive paints depends on both material quality and industrial process of paint and varnish
- It appears as bumps on the reflected image of outer environment at the paint surface
- It is usually controlled using instruments of the WaveScan family
- It has been seen that the WaveScan output does not depend on paint color and appearance, while observers judgements do
- The Appearance Map tool was used to investigate the dependance of Orange Peel perception on shades at various intensity levels, model the psychophysical functions and predict perceptual evaluations of Orange Peel by observers

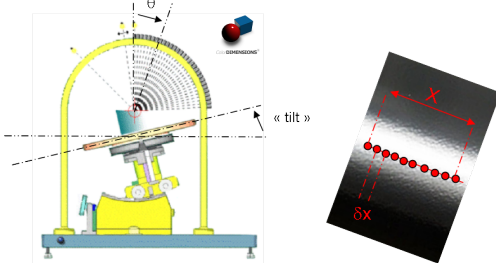
Samples Collection

- 13 painted specimen (flat form, 30 by 50 cm) prepared by RENAULT for sensory and instrumental analysis
 - 2 pearlescent basecoats (red, blue)
 - 1 solid basecoat (dark blue)
 - 1 clearcoat
- Waviness texture adjusted by changing parameters in the clearcoat application process
 - 4 levels of quality for both effect shades (Effect Red and Effect Blue)
 - 5 levels of quality for the solid shade (Solid Blue)
- Other colors not presented here for confidentiality reasons



Instrumental Setup

- ColorDIMENSIONS fast goniospectrocolorimeter (supported by ARMINES, granted by 2PSM and CR Aquitaine, 2002-2003)
 - 28 reflectance measurements from 3 to 84 degrees every 3 degrees
 - zenithal illumination by OSRAM XBO 150 OFR Xenon bulb
 - autocalibration based on simultaneous source and sample measurement
 - tilting, rotating, xy moving sample tray
 - measurements along profiles (50 mm long, every 300 micrometers)
 - 2° rotation using a 5 degrees step, at each measurement point
- Each sample is thus characterized by a vector of 5712 values
- Data processing using the EyeBox© software (development ARMINES, contract CT05-104)
- Calculation of similarity parameters between stimuli
- Similarity Mapping using Multidimensional Scaling



Sensory Evaluation

- full set of sensory evaluations including various descriptive and affective tests
- 72 subjects with more or less experience in paint finish (sensory assessors, paint experts and customers)
- all tests performed in Renault-specific, patented polysensorial-booths with standardized lights, adjustable working surface, printed protractor and removable walls
- 56 customers invited to express preference (acceptance) through scores given to the 13 painted panels in random sequential monadic order
- 9 experts and 6 sensory assessors rating Overall Appearance, plus Waviness, Gloss and DOI
- Latent Semantic Space (LSA) analysis conducted as well, not presented here for confidentiality reasons
- Results

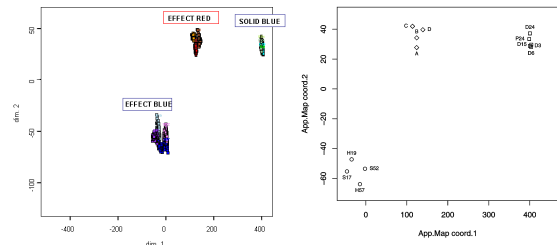
Sample	Overall Appearance Mean Rating	95% conf. interval
Effect Blue H19	48	6
Effect Blue H57	93	4
Effect Blue S17	78	4
Effect Blue S52	57	4
Solid Blue D3	50	4
Solid Blue D6	30	5
Solid Blue D15	60	5
Solid Blue D24	90	4
Solid Blue P24	80	5
Effect Red A	55	6
Effect Red B	60	10
Effect Red C	96	4
Effect Red D	75	11

Appearance Mapping

- Appearance Mapping uses Multidimensional Scaling (MDS)
- MDS maps dissimilarity among objects as distance between points of a low-dimensional space
 - metric MDS: tries to match dissimilarity by distance
 - non-metric MDS: only preserves ordering of dissimilarities
- Appearance Mapping successfully used to study other high-level perceptions
 - Thermal comfort of cycling helmets
 - Aging of polymers
 - Perception of "frost" on etched glass bottles
- Currently (2009-2010) used to explore perceptual dimensions of "metallicness" inside the Sensomines "Etalons" program

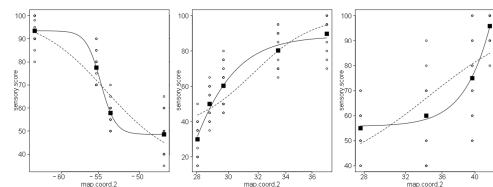
Physical Similarity Map

- here: metric MDS of the full array of color measurements along profiles
- no use of sensory notes at this stage
- Clusters appear as a function of shades
- Inside each cluster, no organization appears at first sight among the point pattern
- Result: Profiles (left) and mean (zoomed, right) Appearance Maps for the three shades



Sensory Calibration of the Map

- There are direct empirical relationships between map coordinate 2 and sensory evaluation
- Classical shapes of psychophysical perception-stimulus curves are found (sigmoid/power laws)
- Shapes and slopes of the curves depend on the shades of paints
- Possible fit using a log-logistic model
- Result : Sensory Scores as monotonic functions of map coordinate 2. From left to right : Curves for Effect Blue, Solid Blue and Effect Red (mean scores appear as black squares, log-logistic fit with four estimated parameters appears as a solid line, fixing the highest and lowest possible scores results in the dashed line)



Conclusion

- Color measurements along profiles keep track of the "Orange Peel stimulus"
- Similarity analysis of this stimulus reveals an unidentified latent dimension which is related in some manner to the perception of Orange Peel
- The relevant coordinate of the Appearance Map is related to the Overall Appearance rating through increasing or decreasing psychophysical functions depending on the shade
- Such a behaviour is known in colorimetry when a variable defined through polar coordinates (say, saturation) is related to variables defined through rectangular coordinates (say, a,b in the CIE Lab system)

Bibliography

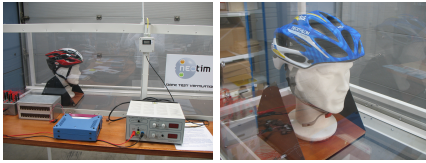
- O. Etteradossi, S. Perquis, "Appearance Parameters of Various Opaque Materials : A Toolbox for Manufacturing and Quality Control." CIE Expert Symposium on Visual Appearance. Museum National d'Histoire Naturelle, Paris, France, 19-20 oct.2006. CIE Publication x032:2007, pp.53-60 . ISBN 978 3 901 906 56 5.
- H. Abdi, "Metric Multidimensional Scaling (MDS): Analyzing Distance Matrices." in *Encyclopedia of Measurement and Statistics*, N. Salkind, Ed. Thousand Oaks (CA):Sage, 2007.
- O. Etteradossi, S. Perquis and V. Mikec, "Using Appearance Maps drawn from goniospectrocolorimetric profiles to predict sensory appreciation of red and blue paints," *COLOR research & application*, vol.34(1),feb. 2009.

Introduction

- Main limitation to the use of cycling helmets: said to be thermally uncomfortable
- The present results were obtained by post-processing of pre-existent experimental datas
 - Thermal exchange coefficients calculated from measurements
 - Satisfaction notes from a benchmark test
- Use of the Appearance Map tool to transform an array of physical data into a sensory note

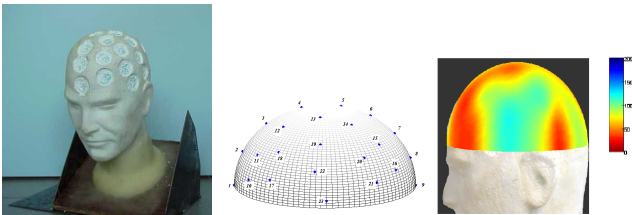
Helmets & Thermal Bench

- 17 commercially available helmets provided to NeoTIM by TOPVelo
- use of a tilting manikin head
 - here: inclination set to 10° from horizontal
 - no modelization of hair, sweat or skin
 - model takes skull surface temperature and convection between helmet and head into account
- thermal measurement bench
 - wind tunnel with tunable speed of airflow (0 to 10 m · s⁻¹)
 - here: airflow set to 7 m · s⁻¹



Thermal Measurements

- 23 NeoTIM sensors
 - 30 mm diameter, 0.3 mm thickness kapton® puck
 - grooved discoid constantan resistive element
 - soldered T-type (copper-constantan) thermocouple
- for symmetry reasons : sensors restricted to one half of the head
- calculation of 23 thermal exchange coefficients
- cartography by biharmonic interpolation of the 23 thermal exchange coefficients



Results (W · m⁻² · K⁻¹)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23
A	91.5	78.1	78.5	57.8	23.7	45.3	56.7	66.5	80.9	77	87.8	83.8	38.9	33.2	72.7	72.5	116	84.3	20.5	77.1	81.4	125	45.7
B	38.2	80.4	68.9	64.9	57.9	65.2	63.4	56.8	81.9	36.7	88.1	77.5	28.4	57.3	79	89.3	110	86.7	109	86.6	94.2	118	183
C	92.7	78.8	73.9	72.6	44	57.8	68.2	38.6	86.1	79.4	42.4	37.8	65.4	72.9	78.9	113	95.4	118	87.1	68.1	111	78.9	
D	113	78.6	80.9	67.1	75.1	62.3	68	69.3	80.5	109	78.7	63	30.6	40.2	81.5	85.4	71	70.8	107	72.9	85.6	131	142
E	89.8	81.2	39.1	38.3	31.4	68.9	68.4	77.4	80	91.5	81.2	88	45.2	66.7	81.2	78.5	99.6	81.3	103	78.8	82.3	117	151
F	84.2	83.3	74	78.2	28.8	53.6	58.4	64.3	89.3	84.2	53.9	109	80.9	69.5	70.1	83.5	113	81.6	108	81.4	81.8	107	78.9
G	101	27.4	48.8	54.8	28.4	56.9	47.5	53.3	62.4	76.6	74.3	46.7	73.1	72.5	59	73.7	70	65.7	30.4	26.8	83.3	35.6	31
H	96.5	53.3	72.3	64.5	67.3	57.3	59	69.3	32.1	80.7	81.3	78.1	28.9	70	68.7	123	94.4	90.9	117	83.8	99.9	41.8	
I	87	82.2	79.7	103	31.8	71.6	61	63.9	75.4	78.9	74.9	36	84.7	67.8	67.4	62.9	76.4	93.7	100	78	76.9	138	136
J	98.2	75.9	72.8	34.6	42.8	58.9	67.9	71.8	109	82.6	87	21.5	58.8	83.9	79.3	119	92	85.2	31.5	92.2	77.9	87.5	67.6
K	88.5	67.5	72.1	69.2	68.1	64.2	61.8	56.7	76.9	37.2	80.7	52.8	42.9	85.6	75	83.8	40.4	79.5	90.3	96.4	36.7	118	112
L	91.8	34.1	49.7	71.4	67.9	38.4	80.3	60.2	83	91.3	88.6	80.1	81.2	67.7	42.9	82.7	100	58.6	101	80.8	114	107	50.9
M	96.2	93.7	72.7	69.6	76.7	64.3	67.8	65.6	78.2	92.8	83.9	74.5	71.5	52.9	78.5	73.6	88.9	84.3	108	86.9	78.1	106	194
N	91.5	78.3	58.7	32.2	30.4	69.2	65.3	60.6	82.2	77.8	67.8	69.3	39	64.2	69.2	65.4	88.5	108	75.2	55.7	61.3	105	48.6
O	86	71.6	72	77.5	68.6	68.6	70.2	47.9	107	83.2	85.9	46	73.8	74.5	75.5	75	114	92.4	104	85.1	100	130	
P	93.5	78.4	79.6	69	71.2	66.8	70.9	66.6	74.9	96.7	74.7	37.1	39	70.9	76.4	87.2	116	93.9	81.3	91	85.9	127	148
Q	95.1	97.6	77.1	78.1	64.5	62.3	58.9	60.7	84.6	85.5	83.6	31.2	34.5	58.8	79.9	79.6	133	97.2	51.8	80.5	98.9	80.2	133

Sensory Evaluation

- not a classical sensory evaluation test
- benchmarking of 17 commercially available helmets
 - by experts of the french monthly magazine TOPVelo
 - in true cycling conditions
 - comfort, ventilation and satisfaction notes given on [0-10] scales
- Results

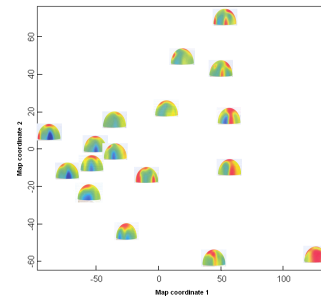
	comfort	ventilation	satisfaction
A	7	6	6
B	7	6	7
C	8	9	9
D	9	8	10
E	7	8	8
F	9	9	9
G	7	4	5
H	7	6	6
I	8	7	7
J	7	6	7
K	8	6	6
L	8	7	6
M	9	10	10
N	7	4	5
O	8	10	10
P	10	9	10
Q	8	8	8

Appearance Mapping

- Appearance Mapping uses Multidimensional Scaling (MDS)
- MDS maps dissimilarity among objects as distance between points of a low-dimensional space
 - metric MDS: tries to match dissimilarity by distance
 - non-metric MDS: only preserves ordering of dissimilarities
- Appearance Mapping successfully used to study other high-level perceptions
 - "Orange Peel" of automotive paints
 - Aging of polymers
 - Etching of glass bottles

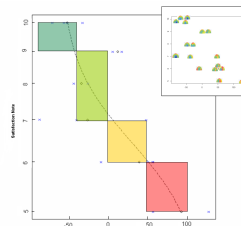
Thermal Similarity Map

- here: metric MDS of the full array of thermal exchange coefficients
- no use of sensory notes at this stage
- thermal similarities well illustrated using two dimensions
- coordinate 1: cooling of temples (positive: "hot temples")
- coordinate 2: "predominant hot axis" (positive: forehead-neck axis dominates)
- as a side-effect: helmets with negative coordinate 2 show rather small dispersion, regardless of whether the values are high or low



Sensory Calibration

- Calibration searches for relations between map coordinates and notes
- here: only coordinate 1 relates to notes
- lack of conventional sensory testing: we only define comfort zones
- the feeling of "thermal comfort" relates to cool temples
- this feeling is enhanced in case of maximal contrast with the forehead-neck axis
- maybe these conditions give the strongest feeling that "cooling works"

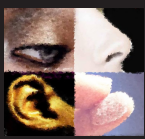


Further Developments

- extension to other parts of the body
- extension to other clothes or objects
- connection with "Appearance Maps" from other perceptual fields (visual and tactile)

Bibliography

- E. Coment, J-C. Batsale, B. Ladevie, O. Fudym and M. Caillibotte, "Méthodologie d'estimation de cartographie de coefficients d'échange thermique sous un casque cycliste." Presented at Congrès français de thermique, Lyon, France, May 15-17, 2000.
- H. Abdi, "Metric Multidimensional Scaling (MDS): Analyzing Distance Matrices." in *Encyclopedia of Measurement and Statistics*, N. Salkind, Ed. Thousand Oaks (CA):Sage, 2007.
- O. Eterradosi, S. Perquis and V. Mikec, "Using Appearance Maps drawn from goniochrometric profiles to predict sensory appreciation of red and blue paints," *Color Research & Application*, to be published.



SensoM.I.N.E.S.: Research on Psycho-Sensory Properties and Materials in the "Groupe des Ecoles des Mines" Network

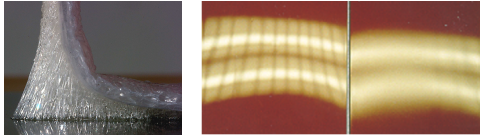


Research on "Materials & Sensations" within the Carnot M.I.N.E.S Institute: the *SensoM.I.N.E.S* group

- ▶ The **Carnot institutes network** gathers 12800 professional people working for research with the same goal : developing partnership research with companies
- ▶ The **Carnot M.I.N.E.S** (Innovative Methods for Companies and Society) key figures:
 - ▶ 950 permanents of research
 - ▶ 880 PhD students
 - ▶ a global budget of 66900 k€
 - ▶ contractual incomes of 31100 k€
- ▶ The **SensoM.I.N.E.S group** gathers the Materials Sciences, Materials Engineering and Applied Mathematics centers of the Carnot M.I.N.E.S Institute. It is intended to aim their complementing resources at a better understanding of the relations between physical properties, engineering processes, sensations and perceptions. The key points are:
 - ▶ tailoring of materials on the basis of sensation specifications
 - ▶ metrology of visual, tactile or olfactory sensations **in an engineering perspective**
 - ▶ development of innovative analytical and data processing techniques
 - ▶ modeling materials as generators for sensations
 - ▶ linking formulation, manufacturing processes and perception of defects
- ▶ The **SensoM.I.N.E.S group** is located on 6 sites

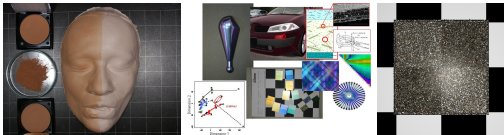
Center for Materials Forming (CEMEF, MINES ParisTech)

- ▶ The analysis of phenomenons which occur during **forming operations**, and the study of physical principles explaining the relations between processes and sensory properties of metals and industrial polymers, is a speciality of the **Surface and Tribology Group** of the Centre for Material Forming (CEMEF).
- ▶ Experts from various fields are working together: materials, structural design, numerical modeling of processes, mechanics and thermal analysis of contacts.
- ▶ Physical principles are used to explain how surface and volume textures produce sensory properties.
- ▶ This in turn provides guidelines for the **understanding** and **tuning** of forming processes.



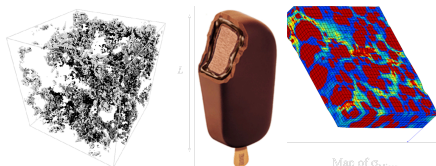
Center for Materials Engineering (CMGD, Ecole des Mines d'Alès)

- ▶ The **PPSM** (Propriétés Psychosensorielles des Matériaux) team considers any material as a generator of sensations. In the fields of **visual & tactile perceptions**, current works focus on the changes in information status and content while it turns from physical stimuli to perceptions through sensations.
- ▶ In order to achieve **Appearance Engineering**, the focus is put on:
 - ▶ conceptual/perceptual spaces of appearance properties
 - ▶ sensation or perception based devices and methods for materials characterization
 - ▶ sensation-oriented formulation
 - ▶ modeling or simulation of appearance properties



Center for Mathematical Morphology (CMM, MINES ParisTech)

- ▶ The **CMM** develops tools for image analysis, modelisation and simulation of textures. Psychosensory insights are mainly related to **vision, audition and gustation** (the latter through the relations between texture and mechanical properties)
- ▶ In the field of **vision**, various criteria are used at CMM to describe and recognize textures, such as colour or local intensity variations. Morphological parameters (volume fractions, granulometry, distribution, connectivity) can be evaluated using image analysis (2D or 3D)
- ▶ **Textures** are simulated using probabilistic models. Relations between physical properties and textures are studied by numerical simulation and may be linked to psychosensory properties (optical properties, surface appearance, mechanical behaviour)

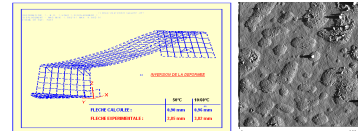


Some of the *SensoMINES* equipments

- ▶ Radiometers, spectroradiometers and goniospectroradiometers
- ▶ Colour calibrated lines for image capture, polling booths, sensory evaluation booths
- ▶ Confocal rugosimeter, texturometer, micro and nano-indenter, laser diffraction granulometers
- ▶ Electron microscopes (BEM, TEM, EBSD...), X rays diffraction, IR thermography, surface analysis (IR-microscopy, Auger, XPS, ToF-SIMS, AFM)
- ▶ Computing & simulation: PC farms, image analysis, statistics, data management, molecular dynamics, FEM, CAO, ...
- ▶ Gas chromatography (GC), GC/MS/olfactometry coupling, electronic noses, olfactometers
- ▶ Materials processing facilities

Polymers & Composites Technology & Mechanical Engineering Department (DTPCIM, Ecole des Mines de Douai)

- ▶ The general objective of **DTPCIM** research activities is the **optimisation of processing technologies and performances** of plastic (polymers reinforced or not by fillers, short or long fibres, nanoparticles) & composite materials (polymers reinforced by continuous fibres) and industrial parts. The main topics are:
 - ▶ physico-chemical, thermo-mechanical, rheological, micro-structure analysis characterisation
 - ▶ integration of sensors in machines and tooling
 - ▶ analysis, characterization and control of phenomena involved during manufacturing (by injection moulding, (co)extrusion, thermoforming, rotomoulding technologies)
 - ▶ identification and control of phenomena generating quality or defects in industrial parts
 - ▶ self-adaptive process control
- ▶ **DTPCIM** investigates the **interactions** between raw materials, processing conditions (machine and tooling related parameters), quality and performances of manufactured parts, taking their lifecycle into account. **Sensory properties** fall in the field of performances to be optimised.
- ▶ Current topics, all related to formulation and manufacturing processes, are:
 - ▶ surface defects
 - ▶ dimensional stability (shrinkage warpage)
 - ▶ optical properties
 - ▶ barrier properties
 - ▶ odour



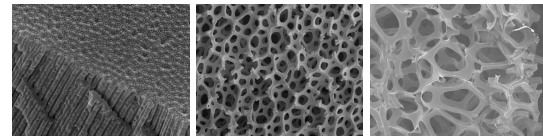
Industrial Environment Engineering Laboratory (LGEI, Ecole des Mines d'Alès)

- ▶ The **Odours & VOCs** team of LGEI offers a global answer to problems of odours and Volatile Organic Compounds (VOCs). Its main activities are:
 - ▶ development of analytical methods for VOCs
 - ▶ determination of perception threshold for odorous trace-compounds
 - ▶ study of the emission and dispersion mechanisms of odorous compounds
 - ▶ development and optimization of processes for odours and VOCs treatment
- ▶ This gives rise to methods development and to technology transfer in the following fields:
 - ▶ impact of the atmospheric quality on materials conservation
 - ▶ **odours or VOCs emission from materials**
 - ▶ effects of adding odorous compounds
 - ▶ impact on the indoor air quality
 - ▶ materials for odours treatment
 - ▶ Development
 - ▶ Performance evaluation
 - ▶ Identification and impact of by-products



Center for Materials & Structures Sciences (SMS, Ecole des Mines de Saint-Etienne)

- ▶ The **Center for Materials & Structures Sciences** develops research and training activities around psychosensory properties of materials.
- ▶ The training portion of these activities is strongly aimed at **industrial design**
- ▶ The research component focuses the tools of industrial design, in particular:
 - ▶ knowledge bases, expert systems and selection assistance tools based on sensory properties,
 - ▶ fine characterization of materials surfaces (microstructure, mechanics, roughness, chemistry) in connection with their sensory properties
- ▶ To do this, SMS relies on **4 leading technology platforms**:
 - ▶ CMS (Characterization of Microstructures: Metallography, Scanning Electron Microscopies, XPS/Auger/AFM surface analysis)
 - ▶ MSE (Materials & Structures Engineering: Alloys, metals, crystals, ceramics, structure and composites elaboration and modeling)
 - ▶ MTI (Mechanical Testing and Instrumentation: mechanical characterization, hot forming, stress corrosion, composites sustainability)
 - ▶ NS (Numerical Simulation)



Contacts & Links

- ▶ **Contacts:**
 - ▶ CEMEF (Sophia Antipolis):
 - ▶ Bernard Monasse (Bernard.Monasse@mines-paristech.fr)
 - ▶ Evelyne Darque-Ceretti (Evelyne.Darque-Ceretti@mines-paristech.fr)
 - ▶ CMGD (Alès & Pau, group coordination):
 - ▶ Olivier Eterradosi (olivier.etterradosi@ema.fr)
 - ▶ José-Marie Lopez-Cuesta (Jose-Marie.Lopez-Cuesta@ema.fr)
 - ▶ CMM (Fontainebleau)
 - ▶ Dominique Jeulin (dominique.jeulin@mines-paristech.fr)
 - ▶ DTPCIM (Douai):
 - ▶ Marie-France Lacrampe (lacrampe@ensm-douai.fr)
 - ▶ LGEI (Alès & Pau):
 - ▶ Valérie Desauziers (Valerie.Desauziers@ema.fr)
 - ▶ SMS (St-Etienne):
 - ▶ Roland Fortunier (fortunier@emse.fr)
 - ▶ David Delafosse (delafosse@emse.fr)

- ▶ **Links:**
 - ▶ Institut Carnot M.I.N.E.S: <http://www.carnotmines.eu/>
 - ▶ Groupe des Ecoles des Mines: <http://www.gemtech.org/>