



HAL
open science

Analyse de signaux vibrotactiles et modèles flous de la perception : application aux interfaces tactiles pour l'automobile et l'aéronautique

Liviu-Cristian Dutu

► To cite this version:

Liviu-Cristian Dutu. Analyse de signaux vibrotactiles et modèles flous de la perception : application aux interfaces tactiles pour l'automobile et l'aéronautique. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Grenoble Alpes, 2015. Français. NNT : 2015GREAA002 . tel-01204658

HAL Id: tel-01204658

<https://theses.hal.science/tel-01204658>

Submitted on 24 Sep 2015

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

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

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : **STIC - Traitement de l'Information**

Arrêté ministériel : 6 janvier 2005 - 7 août 2006

Présentée par

Liviu-Cristian DUȚU

Thèse dirigée par **Philippe BOLON**

et co-encadrée par **Gilles MAURIS**

préparée au sein du **Laboratoire LISTIC**
dans l'**École Doctorale "SISEO"**

Analyse de Signaux Vibrotactiles et Modèles Flous de la Perception.

Application aux Interfaces Tactiles pour l'Automobile
et l'Aéronautique.

Thèse soutenue publiquement le **30 janvier 2015**,
devant le jury composé de :

Mme. Nathalie PERROT

Directrice de Recherche, I.N.R.A., Présidente

M. Mihai CIUC

Professeur à l'Université "Politehnica" de Bucarest, Rapporteur

M. Christophe MARSALA

Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, Rapporteur

M. Remy VERSACE

Professeur à l'Université Lumière Lyon 2, Examineur

M. Philippe BOLON

Professeur à l'Université Savoie Mont Blanc, Directeur de thèse

M. Gilles MAURIS

Maître de Conférences à l'Université Savoie Mont Blanc, Co-Encadrant de thèse

M. Jean-Marc TISSOT

Ingénieur, Responsable Ergonomie et Prospective, Valeo Annemasse, Invité



*À mon épouse,
Mădălina.*

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer mes remerciements envers mes directeurs de thèse, Philippe Bolon et Gilles Mauris, qui m'ont soutenu, encouragé et guidé dans la préparation de cette thèse. Leur support constant et leur conseils précieux ont contribué de manière importante au bon déroulement de ces travaux et m'ont fait aimer ce monde magnifique qui est *la recherche*. Je souhaite remercier spécialement Gilles Mauris pour son soutien humain et professionnel, son énergie, son optimisme et son enthousiasme stimulant, ainsi que pour les discussions entraînantes et dynamiques qui m'ont donné de confiance en moi dans les moments les plus difficiles. Également, je remercie Philippe Bolon pour ses échanges fructueux et les débats constructifs, ainsi que pour la qualité de son encadrement.

Je remercie ensuite M. Mihai Ciuc et M. Christophe Marsala pour m'avoir fait l'honneur de rapporter sur ces travaux de thèse. J'associe à ces remerciements Mme. Nathalie Perrot qui a accepté de présider mon jury de thèse. Mes remerciements s'adressent également à M. Remy Versace et à M. Jean-Marc Tissot pour avoir examiné ces travaux. J'apprécie le dévouement de tous les membres de jury pour le temps consacré sur le manuscrit, ainsi que pour l'effort fait afin d'arriver à la soutenance un vendredi de fin janvier particulièrement enneigé. J'apprécie aussi leur remarques précieuses et leur suggestions pertinentes qui m'ont permis d'approfondir et d'améliorer mes connaissances. Un remerciement spécial va vers M. Mihai Ciuc, un des mes professeurs à l'Université "Politehnica" de Bucarest, pour son soutien moral et pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de mes études en Roumanie.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude envers tous les membre du projet FUI-MISAC, et particulièrement vers l'équipe de Valeo Annemasse (M. Jean-Marc Tissot, Mme. Stéphanie Dabic, M. Nour-Eddine El-Ouardi, M. Stéphane Vanhelle et M. Anthony Aubry), pour leur aide et leur conseils précieux, et surtout pour m'avoir accueilli chaleureusement dans leur locaux pendant mes déplacements à Annemasse.

Mes pensées vont maintenant vers tous les collègues du laboratoire LISTIC, qui m'ont accueilli pendant ces trois dernières années, et avec qui j'ai partagé toutes mes réussites professionnelles et personnelles. Je tiens à remercier particulièrement Joëlle et Florent et tout le personnel technico-administratif pour leur soutien et leur aide constante, Sylvie et Reda pour leurs discussions intéressantes et leurs conseils utiles et aussi la direction du LISTIC pour la confiance accordée. Une pensée toute particulière et un grand merci à tous mes amis doctorants et stagiaires pour leur support, leur amitié et pour les très bons moments passés ensemble : Tibi, Bastien, Ha Thai, Renaud, Fabien, Yajing, Nabil, Ahmed, Aziz, Hakam, Thanh Long, Ge, Zhangyun, Abdellah, Thu Trang, Amaury, Meriem, Quentin, Andrei, et bien sûr, Shoichi. Je tiens aussi à remercier tous mes amis qui m'ont soutenu à distance, et tout particulièrement Petru et Ana.

Finalement, je remercie de tout mon cœur mon épouse Mădălina qui est toujours restée à mes côtés, malgré les nombreuses difficultés rencontrées pendant ces trois années de thèse, et qui même à distance m'a soutenu vivement et m'a toujours encouragé. Grâce à son soutien non-conditionné, j'ai pu surmonter une difficulté après l'autre. Également, je remercie affectueusement mes parents, Ortenzia et Dumitru, pour les efforts et les sacrifices faits tout au long de mes études, et aussi pour la bonne éducation qu'ils m'ont donnée.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Contexte : La génération <i>touch-screen</i>	1
1.2	Problématique et objectifs : Vers une interaction <i>haptique</i>	2
1.3	Organisation du document	3
2	Problématique des interfaces tactiles	5
2.1	Introduction	6
2.2	Évolutions des interfaces tactiles	6
2.3	Généralités sur le Feedback Vibratoire	8
2.3.1	Avantages de la rétroaction vibratoire	8
2.3.2	Discrimination tactile	12
2.3.3	Au-delà de l'haptique : la multimodalité	14
2.4	Psychophysique du Sens Tactile	15
2.4.1	Les mécanorécepteurs de la peau	15
2.4.2	Seuils de détection et effets de la fréquence	17
2.4.3	L'effet de l'amplitude et la loi de Stevens	19
2.4.4	Autres facteurs influant sur la perception tactile	20
2.4.5	La théorie des quatre canaux	22
2.4.6	Le canal de Pacini et l'intégration neuronale de stimuli temporels	23
2.4.7	Le canal Non-Pacini I et la vitesse du stimulus	26
2.4.8	Interaction inter-canaux	28
2.4.9	Synthèse sur le sens tactile	28
2.5	Analyse Temps-Fréquence de Signaux Vibrotactiles	29
2.5.1	La Transformée de Fourier à Court Terme	30
2.5.2	La Distribution de Wigner-Ville	32
2.5.3	Représentations Temps-Échelle	36
2.6	Aperçu des techniques de <i>Computational Intelligence</i>	37
2.6.1	Computational Intelligence et Soft Computing	37
2.6.2	Algorithmes génétiques	38
2.6.3	Réseaux de neurones artificiels	40
2.6.4	Généralités sur la logique floue	42
2.7	Conclusion	47
3	Caractérisation des Signaux Vibrotactiles	49
3.1	Introduction	50
3.2	Tâche d'évaluation de dissimilarité perceptuelle	50
3.2.1	Dispositif expérimental	50
3.2.2	Procédure expérimentale	51
3.2.3	Résultats	52
3.3	Mesures de l'accélération de la surface tactile	54

3.3.1	Motivation et contexte	54
3.3.2	Le signal d'accélération de la surface	55
3.3.3	Rapport signal-bruit pour les mesures d'accélération	56
3.4	Transformée en ondelettes continue	58
3.4.1	Motivation et présentation de la méthode	58
3.4.2	Le scalogramme	61
3.5	Quantification de l'activation du canal Pacinien	66
3.6	Quantification de l'activation du canal Non-Pacini I	68
3.7	Index de complexité du scalogramme	70
3.7.1	Définition	71
3.7.2	La divergence de Kullback-Leibler	72
3.8	Validation des variables caractéristiques	74
3.8.1	Procédure de comparaison	75
3.8.2	Résultats et discussions	75
3.8.3	Matrice de dissimilarité unifiée P-NP I	79
3.9	Tâche d'évaluation hédonique de signaux vibrotactiles	80
3.9.1	Dispositif expérimental – Le banc <i>MISAC</i>	81
3.9.2	Procédure expérimentale et confort global	82
3.10	Conclusion	86
4	Modèles Flous de la Perception des Signaux Vibrotactiles	89
4.1	Introduction	90
4.2	Architecture du modèle psychophysique	91
4.2.1	Identification de la base de données du système	92
4.2.2	Identification de la base de règles du système	95
4.2.3	Améliorations de la méthode WM	98
4.2.4	Méthode de <i>Sélection-Réduction</i> pour l'extraction de la base de règles	100
4.2.5	Opérateurs d'inférence du système	105
4.3	Performances du modèle psychophysique	106
4.3.1	Les variables du modèle et la variabilité des évaluations	106
4.3.2	Indicateurs quantitatifs du système	108
4.3.3	Modèle psychophysique de la perception vibrotactile	109
4.3.4	Analyse qualitative du modèle psychophysique	114
4.4	Personnalisation du modèle par une Interface Graphique	116
4.4.1	Présentation de l'interface	116
4.4.2	Personnalisation du modèle	118
4.5	Modèle expert pour l'évaluation des signaux vibrotactiles	122
4.5.1	Limites du modèle psychophysique	122
4.5.2	Procédures expérimentales	123
4.5.3	Base de règles <i>expert</i>	125
4.5.4	Modèle symbolique flou de la connaissance experte	127
4.5.5	Résultats du modèle symbolique	128
4.5.6	Portabilité du modèle expert au domaine aéronautique	132
4.6	Conclusion	135

5	Conclusions et Perspectives	137
5.1	Contributions	137
5.2	Perspectives	140
A	Multi-Dimensional Scaling et Matrice de Dissimilarité Perceptuelle	143
A.1	Multi-Dimensional Scaling	143
A.2	Matrice de Dissimilarité Perceptuelle	146
B	Mesures d'Accélération	149
C	Inférence Floue. Exemples Numériques	155
C.1	Exemple pour un système de <i>Mamdani</i>	155
C.2	Exemple pour un système flou symbolique	159
D	Analyse Numérique de la Redondance de la Base de Règles	163
D.1	Introduction et Présentation de la Méthode	163
D.2	Analyse numérique	167
D.3	Discussion	173
	Bibliographie	177

Table des figures

2.1	L'évolution du marché des dispositifs tactiles. Nombre d'unités et taux de croissance annuel. Adapté de [Lee 2011].	7
2.2	Comparaison entre les interfaces non-haptiques et les interfaces haptiques selon trois mesures objectives. Résultats de [Brewster 2007].	9
2.3	Comparaison entre quatre types d'interfaces pour le temps moyen de saisie d'une phrase. Résultats de [Hoggan 2008a].	10
2.4	Score moyen au questionnaire NASA-TLX pour trois types d'interface homme-machine. Résultats de [Hoggan 2008a].	11
2.5	Temps total par coup d'œil (a) et nombre de coups d'œil par tâche (b), pour un système d'information embarqué à bord d'un véhicule. Résultats extraits de [Pitts 2012a].	12
2.6	Section transversale de l'épiderme, du derme et de l'hypoderme, avec annotations pour les différentes catégories de mécanorécepteurs.	17
2.7	Seuils absolu de détection en fonction de la fréquence de la vibration. Résultats de [Bolanowski 1988].	18
2.8	Contours de sensations égales pour 6 niveaux d'amplitudes : le seuil de détection (courbe 0 dB) en bleu. Résultats de [Verrillo 1969].	20
2.9	Exposants reliant la magnitude physique à l'intensité subjective en fonction de la fréquence. Résultats pour l'amplitude (traits pleins) et pour l'énergie (lignes pointillées). Résultats de [Stevens 1968, Franzén 1969, Verrillo 1975].	21
2.10	Caractéristiques déplacement-fréquence pour les canaux psychophysiques (points noirs – aire de contact grande ; points blancs – aire de contact petite). Graphique extrait depuis [Gescheider 2004].	25
2.11	Décalage du seuil de détection en fonction du temps pour deux et quatre impulsions mono-fréquence à 250 Hz. Résultats de [Gescheider 1999].	26
2.12	Transmission des information tactiles (ligne continue) et de douleur (ligne pointillée) à partir du doigt vers le cortex somatosensoriel.	29
2.13	Synoptique du sens tactile, avec les trois variables intégrées dans le cortex somatosensoriel pour produire une sensation tactile unitaire.	30
2.14	Résolutions temps-fréquence de la TFCT pour : a) n grand ; b) n petit.	31
2.15	Spectrogrammes d'un signal synthétique composé de cinq modes Gaussiens pour différentes valeurs de n . <i>En haut à gauche</i> : $n = 1$, résolution en fréquence maximale mais résolution temporelle mauvaise ; <i>En haut à droite</i> : $n = N$, résolution temporelle maximale mais résolution en fréquence mauvaise ; <i>En bas à gauche</i> : $n = 4$, les modes proches en fréquence sont bien délimités, mais pas les modes proches temporellement ; <i>En bas à droite</i> : $n = 10$, les modes proches temporellement sont bien délimités, mais pas les modes proches en fréquence ; Représentations obtenues avec la <i>Toolbox Temps-Fréquence</i> de Matlab [Auger 1996]. Le code couleur est le suivant : faible énergie en bleu foncé ; haute énergie en rouge foncé.	33

2.16	Comparaison entre les spectrogrammes et les DWV pour un signal modulé en fréquence linéairement (haut) et un signal modulé en fréquence non-linéairement (bas). Représentations obtenues avec la <i>Toolbox Temps-Fréquence</i> de Matlab [Auger 1996].	35
2.17	Représentations PDWV et SPDWV pour le signal synthétique avec cinq modes gaussiens utilisé aussi dans la figure 2.15. Les noyaux considérés sont des fonctions fenêtre de type <i>Hamming</i> . Illustrations obtenues avec la <i>Toolbox Temps-Fréquence</i> de Matlab [Auger 1996].	36
2.18	Illustration des opérateurs génétiques pour un codage binaire de chromosomes. a) <i>Sélection par roulette</i> : la probabilité qu'un chromosome soit retenu augmente avec le score qu'il obtient en optimisant la fonction de fitness ; b) <i>Croisement</i> avec deux points de coupure pour les chromosomes retenus par la sélection ; deux descendants, c.à.d. $d1$ et $d2$, sont créés par le croisement des parents ; c) <i>Mutation</i> d'un bit avec probabilité $p_m = 0.01$ pour un des descendants.	39
2.19	Perceptron multi-couches avec une couche cachée.	42
2.20	Partition uniforme en cinq sous-ensembles flous, caractérisés par des FA triangulaires, pour la variable linguistique <i>Âge</i>	45
3.1	Le banc préliminaire utilisé pour produire les signaux vibrotactiles.	51
3.2	Représentation MDS des distances perceptuelles entre les 18 signaux. Les ronds blancs représentent les signaux "longs" à 23.4 ms et les ronds noirs les signaux "courts" à 7.8 ms. La représentation de la forme d'onde a été omise afin d'améliorer la clarté. Les axes n'ont pas de signification et l'orientation est arbitraire. <i>Stress</i> : 0.1022.	53
3.3	Mesures d'accélération pour le cinquième signal vibrotactile (voir Tableau 3.1). <i>En haut</i> : acquisition complète de 5 s comprenant deux déclenchements successifs du signal. <i>En bas</i> : zoom sur le premier déclenchement ; les points D et F marquent respectivement le début et la fin du signal.	57
3.4	Résolution temps-fréquence pour la TFCT (a) et la TOC (b).	60
3.5	Scalogramme d'un signal composé de cinq modes Gaussiens en utilisant la fonction d'ondelette de <i>Morlet</i> . (*) L'axe vertical est donné en fréquence normalisée et non en échelle pour faciliter la comparaison avec les figures 2.15 et 2.17. La fréquence normalisée est obtenue avec la relation échelle-fréquence (équation 3.11). Représentations obtenues avec la <i>Toolbox Temps-Fréquence</i> de Matlab [Auger 1996]. Le code couleur est le suivant : faible énergie en bleu foncé ; haute énergie en rouge foncé.	62
3.6	Scalogramme du signal d'accélération <i>effective</i> illustrée dans la figure 3.3 en utilisant l'ondelette de <i>Morlet</i> pour l'échelle $\sigma \in [1, 128]$	63
3.7	Illustration de l'ondelette de <i>Morlet</i> pour différentes échelles : (a) l'ondelette mère, i.e. $\sigma = 1$; (b) dilatation de l'ondelette mère par $\sigma = 2$; (c) compression de l'ondelette mère par $\sigma = 0.5$	64

3.8	Scalogrammes pour 4 signaux d'accélération du banc haptique, obtenus avec l'ondelette réelle de <i>Morlet</i> pour $\sigma \in [1, 128]$. La dissimilarité perceptuelle entre les signaux, telle qu'évaluée par les utilisateurs, est aussi affichée sur les flèches.	65
3.9	Données d'accélération effective (a) et de vitesse (b) pour un signal vibrotactile issu du banc haptique. La représentation temporelle de la vitesse est obtenue par intégration numérique des données d'accélération.	69
3.10	Densité de probabilité et valeurs <i>ICS</i> associées pour les quatre scalogrammes illustrés dans la figure 3.8. La dissimilarité perceptuelle entre les signaux vibrotactile est indiquée sur les flèches.	73
3.11	Représentation graphique de la procédure de comparaison entre deux matrices de dissimilarité : les corrélations colonne-par-colonne entre les deux matrices sont d'abord stockées, puis moyennées pour obtenir la corrélation globale entre les matrices.	76
3.12	Vue d'ensemble du dispositif expérimental employé dans l'expérience d'évaluation hédonique : A) Banc haptique ; B) Surface tactile à écran capacitif ; C) Système de communication PC-Appareil.	82
3.13	Illustration de l'échelle bipolaire à cinq niveaux utilisée pour évaluer le confort des signaux vibrotactiles.	83
4.1	Partition uniforme sur l'univers de discours avec des fonctions d'appartenance triangulaires pour les trois variables d'entrée : (a) E_P ; (b) \bar{V}^+ ; (c) <i>ICS</i>	94
4.2	Partition uniforme sur l'univers de discours avec des fonctions d'appartenance triangulaires pour la variable de sortie : le confort induit par les signaux vibrotactiles.	94
4.3	Illustration de la méthode de WM pour l'extraction de la base de règles. L'exemple E a deux variables d'entrée x_1 et x_2 et une variable de sortie y	97
4.4	Construction d'une base de règles à double conclusion. Dans chaque sous-espace d'entrée les deux meilleures règles (si elles existent) sont retenues. Les points situés dans l'espace d'entrée représentent des exemples numériques. Comme illustré pour un sous-espace donné, chaque exemple donne naissance à une règle floue (voir la figure 4.3). Ensuite toutes les règles obtenues pour un sous-espace sont classées selon leur degré d'importance et les deux meilleures règles sont stockées dans une base de règles <i>provisoire</i> . Les points <i>noirs</i> représentent des exemples qui donnent naissance à des règles retenues, et les points <i>blancs</i> à des règles non-retenues. Les valeurs numériques sont données à titre indicatif.	100
4.5	Sélection de la base de règles <i>finale</i> à partir d'une base de règles provisoires en utilisant les algorithmes génétiques.	101
4.6	Illustration de la méthode <i>Sélection-Réduction</i> pour le cas $N = 5$. L'étape de <i>Sélection</i> est représentée en haut, celle de <i>Réduction</i> en bas.	103

4.7	Comparaison signal par signal des degrés de confort estimés par les utilisateurs (<i>CG</i>) et prédits par le système flou en utilisant la base de règles présentée dans le Tableau 4.1. La variabilité des évaluations, c.à.d. $U = 19.5\%$ est affichée à l'échelle. Les lignes rouges verticales indiquent les $ME = 4$ signaux mal évalués.	112
4.8	(a) Vue d'ensemble sur l'interface utilisateur graphique, où les 48 signaux vibrotactiles sont répartis dans l'espace 2D $E_P-\bar{V}^+$; les figures (b) et (c) présentent respectivement la répartition des signaux dans l'espace E_P-ICS et $ICS-\bar{V}^+$. L'espace de représentation des signaux peut être choisi à travers le menu déroulant dans la section <i>Options</i> . Dans (a), à droite, les fonctions d'appartenance correspondant aux deux variables d'entrées et à la variable de sortie sont illustrées. En haut, les indicateurs de performance du système sont affichés. Le nombre de signaux mal évalués est relatif à la tolérance $U \in [15\%, 25\%]$. De plus, en cliquant sur le bouton <i>Base de Règles</i> , on peut consulter les règles du modèle (sous forme linguistique) dans une nouvelle fenêtre.	117
4.9	Interface utilisateur graphique employée dans le mode <i>Ajustement</i> . Noter l'apparition de trois lignes verticales et d'une ligne horizontale dans la zone de visualisation. Elles représentent les valeurs modales des sous-ensembles flous des variables d'entrée et peuvent être modifiées avec la souris. De manière analogue, les lignes épaisses rouges, dans la zone de la variable de sortie, représentant les valeurs modales des sous-ensembles flous, peuvent être modifiées.	119
4.10	Représentations <i>optimisées</i> des fonctions d'appartenance employées pour modéliser les évaluations des utilisateurs de moins de 35 ans.	120
4.11	Comparaison signal par signal entre le degré de confort estimé par l'expert et celui prédit par le système, en utilisant la base de règles présentée dans le Tableau 4.6. Les valeurs modales pour les symboles de sortie ont été fixées aux valeurs nominales de l'échelle. La tolérance de l'expert par rapport aux évaluations faites, c.à.d. $U = 20\% = 0.8$ est affichée à l'échelle. Les lignes rouges verticales indiquent les $ME = 5$ signaux mal-évaluée par rapport à U	131
A.1	Représentation MDS pour $N = 2$ de la matrice de dissimilarités dans Tableau A.1. La valeur de <i>Stress</i> de la représentation est 0.0231.	145
B.1	Mesure de l'accélération effective pour le signal vibrotactile <i>numéro 1</i> , défini par les paramètres électriques : { <i>sinus</i> , 60 Hz, 7.8 ms}.	150
B.2	Mesure de l'accélération effective pour le signal vibrotactile <i>numéro 2</i> , défini par les paramètres électriques : { <i>sinus</i> , 60 Hz, 23.4 ms}.	150
B.3	Mesure de l'accélération effective pour le signal vibrotactile <i>numéro 4</i> , défini par les paramètres électriques : { <i>sinus</i> , 130 Hz, 23.4 ms}.	151
B.4	Mesure de l'accélération effective pour le signal vibrotactile <i>numéro 10</i> , défini par les paramètres électriques : { <i>carré</i> , 130 Hz, 23.4 ms}.	151

B.5	Mesure de l'accélération effective pour le signal vibrotactile <i>numéro 11</i> , défini par les paramètres électriques : {carré, 200 Hz, 7.8 ms}.	152
B.6	Mesure de l'accélération effective pour le signal vibrotactile <i>numéro 18</i> , défini par les paramètres électriques : {triangle, 200 Hz, 23.4 ms}.	152
C.1	Partitions des variables du système.	156
C.2	Exemples de descriptions linguistiques floues.	157
C.3	Illustration des étapes d'implication et agrégation. Le vecteur d'entrée E active seulement les règles R_3 , R_4 , R_5 et R_6 avec un degré supérieur à zéro. .	158
C.4	Illustration de l'étape de defuzzification du système, où la valeur numérique $y = 0.51$ est obtenue avec l'opérateur du <i>centre de gravité</i>	158
D.1	Influence commune de deux règles floues sur un échantillon "s".	165

Liste des tableaux

2.1	Aperçu bibliographique sur la conception et la discrimination des tactons	14
2.2	Caractéristiques des quatre canaux psychophysiques de la peau. Synthèse de la littérature	24
3.1	Paramètres électriques pour les 18 signaux vibrotactiles employés.	52
3.2	Valeurs du rapport signal sur bruit pour les 18 signaux vibrotactiles décrites dans le Tableau 3.1. Les valeurs obtenues représentent la moyenne et l'écart-type pour cinq estimations du bruit, c.à.d. pour cinq fenêtres différentes de longueur L	58
3.3	Résultats de corrélation moyenne entre les matrices de dissimilarité D_{En} et D_P pour différents types d'ondelettes-mères.	77
3.4	Résultats de corrélation moyenne entre les matrices de dissimilarité D_V et D_P pour différents types d'ondelettes-mères.	77
3.5	Résultats de corrélation moyenne entre les matrices de dissimilarité D_{KL}^S et D_P pour différents types d'ondelettes-mères.	77
3.6	Résultats de corrélation moyenne entre la matrice de dissimilarité fusionnée $D_{En} \oplus D_V$ et la matrice D_P pour différents types d'ondelettes-mères. Le gain obtenu sur la corrélation en fusionnant les deux matrices est aussi indiqué.	80
3.7	Confort global (CG) normalisé pour l'ensemble de signaux vibrotactiles.	85
4.1	Base de règles floues obtenue avec la méthode de <i>Sélection-Réduction</i> sur l'ensemble de 48 signaux vibrotactiles. Le seuil S pour la réduction d'une règle dans l'étape (R-3) de la méthode a été fixée à $S = 5\%$	110
4.2	Base de règles floues obtenue avec la méthode de <i>Wang-Mendel</i> sur l'ensemble de 48 signaux vibrotactiles.	110
4.3	Comparaison entre les méthodes : $S-R$, WM , $WM-E$ et $AG-DC$. Indicateurs quantitatifs du système sur l'ensemble des 48 signaux vibrotactiles.	111
4.4	Comparaison entre les méthodes : $S-R$, WM , $WM-E$ et $AG-DC$. Résultats quantitatifs de la procédure de validation croisée. Les valeurs affichées représentent une moyenne pour $Q = 100$ divisions aléatoires de l'ensemble de données en apprentissage (75%) et test (25%). Les valeurs obtenues sur l'ensemble de test sont affichées en gras. L'écart-type de chaque indicateur pour les $Q = 100$ divisions est donné entre parenthèses.	114
4.5	Comparaison entre la base de règles obtenue sur l'ensemble des utilisateurs et celle obtenue pour les quatre utilisateurs de moins de 35 ans.	121
4.6	Base de règles floues fournie par l'expert.	126
4.7	Résultats quantitatifs du modèle expert sur les 48 signaux vibrotactiles.	130
4.8	Résultats quantitatifs du modèle expert dans le contexte aéronautique (a). Les valeurs modales utilisées (b) sont les valeurs nominales de l'échelle.	133

4.9	Résultats quantitatifs du modèle expert dans le contexte aéronautique (a). Les valeurs modales utilisées (b) ont été optimisées par l'algorithme de recuit simulé.	134
4.10	Répartition de signaux mal évalués selon le critère d'adaptation au contexte. Les évaluations sont pour le domaine aéronautique.	134
A.1	Dissimilarités perceptuelles entre 14 couleurs avec $\lambda \in [434nm, 674nm]$. Données de [Ekman 1954, Groenen 2005].	144
A.2	Matrice D_P contenant les distances perceptuelles entre les 18 signaux vibrotactiles présentées dans le Tableau 3.1.	147
B.1	Point de début et de fin et durée de sortie mesurée sur l'accélération effective pour les 18 signaux vibrotactiles présentés dans le Tableau 3.1.	153
C.1	Base de règles floues $\{BR\}$	155
C.2	Les variables d'entrée et sortie du modèle symbolique flou.	159
C.3	Base de règles floues fournie par l'expert.	160
C.4	Évaluations de l'expert sur les trois critères sensoriels pour le signal vibrotactile d'entrée x	161
D.1	Base de règles floues obtenue avec la méthode de <i>Sélection-Réduction</i> sur l'ensemble de 48 signaux vibrotactiles.	168
D.2	Erreur globale (Δ) et taux d'évaluation correcte (TEC) du système en enlevant différentes règles. La base de règles $\{BR\}$ est celle du Tableau D.1.	168
D.3	Base de règles floues et index de redondance obtenu après la suppression de la règle R_{12} (en gris).	169
D.4	Base de règles floues et index de redondance obtenu après la suppression de règles R_{12} et R_6 (en gris).	169
D.5	Base de règles floues et index de redondance obtenu après la suppression de règles R_{12} , R_6 et R_5 (en gris).	170
D.6	Base de règles floues et index de redondance obtenu après la suppression de règles R_{12} , R_6 , R_5 et R_8 (en gris).	170
D.7	Base de règles floues et index de redondance obtenu après la suppression de règles R_{12} , R_6 , R_5 , R_8 et R_{11} (en gris).	171
D.8	Base de règles floues et index de redondance obtenu après la suppression de règles R_{12} , R_6 , R_5 , R_8 , R_{11} et R_{14} (en gris).	171
D.9	Erreur globale (Δ) et taux d'évaluation correcte (TEC) du système en enlevant différentes règles. Encore une fois, la base de règles $\{BR\}$ est celle du Tableau D.1.	172
D.10	Base de règles <i>finale</i> avec $(NR)' = 9$ règles.	172

Introduction

Sommaire

1.1	Contexte : La génération <i>touch-screen</i>	1
1.2	Problématique et objectifs : Vers une interaction <i>haptique</i>	2
1.3	Organisation du document	3

1.1 Contexte : La génération *touch-screen*

Durant ces dernières années, le marché des équipements électroniques grand public a été marqué par les progrès technologiques remarquables réalisés par les fabricants dans le domaine des *écrans tactiles*¹. Même si le concept et la technologie des écrans tactiles existent depuis quelques décennies, ce n'est que récemment qu'ils sont devenus accessibles à grande échelle, grâce essentiellement aux développements de composants moins chers et plus fiables. En effet, entre 2008 et 2011 les appareils à écran tactile ont connu un rythme de croissance extrêmement rapide, et il est estimé qu'à l'heure actuelle le nombre total de dispositifs à écran tactile a déjà dépassé le seuil psychologique de 1 milliard.

L'avantage des équipements à écran tactile, par rapport aux interfaces mécaniques classiques, est qu'ils permettent une interaction naturelle, intuitive et efficace avec le dispositif, où l'écran tactile assume un double rôle : de visualisation et d'interaction. L'emploi de boutons mécaniques est ainsi superflu, ce qui permet d'améliorer à la fois la taille de l'écran, le poids de l'appareil et le coût de production.

Bien que l'évolution des écrans tactiles ait été initialement liée à l'évolution des téléphones portables, la technologie tactile a récemment commencé à conquérir de nouveaux marchés et produits. En effet, nous sommes aujourd'hui les témoins de cette expansion, avec l'apparition de distributeurs automatiques de billets, panneaux d'informations, appareils photo-vidéo, télécommandes, et, très récemment, de montres à écran tactile.

Face à cette évolution fulgurante des écrans tactiles, la prestigieuse revue américaine *The Atlantic* publie dans son édition d'avril 2013 un article intitulé "*La Génération Touch-Screen*"², où l'effet et la réception de cette technologie par les enfants sont analysés avec des arguments pour et contre. Même si, à ce jour, le débat n'est pas encore tranché, une

¹Au sens large, un appareil électronique à écran tactile est un dispositif qui permet l'interaction avec l'utilisateur à travers des appuis sur certaines zones de l'écran [Dictionaries 2014].

²*The Touch-Screen Generation* – <http://www.theatlantic.com/magazine/archive/2013/04/the-touch-screen-generation/309250/> – consulté le 4/10/2014

chose est sûre : les enfants d'aujourd'hui sont les adultes de demain et les technologies qu'ils découvrent maintenant seront les technologies qu'ils privilégieront plus tard.

Dans cette optique, l'appétence des utilisateurs pour cette nouvelle technologie pousse aussi d'autres fabricants d'équipements électroniques à adopter les écrans tactiles dans leurs produits afin de rester compétitifs sur le marché. La *spirale de la technologie tactile*, fondée sur les principes de l'offre et de la demande, s'est ainsi installée³.

Pris dans cette spirale, les équipementiers aéronautiques et automobiles, doivent faire face à une double problématique en ce qui concerne l'installation des écrans tactiles à bord d'avions ou d'automobiles : s'assurer, d'une part, que cette nouvelle technologie ne gêne pas l'activité principale du pilote/conducteur, et d'autre part, qu'elle peut être utilisée pour améliorer la qualité de la sensation perçue et, par là même, le plaisir de l'utilisation.

1.2 Problématique et objectifs : Vers une interaction *haptique*

Les problématiques soulevées par l'emploi de la technologie tactile dans les domaines de l'aéronautique et de l'automobile, sont au cœur d'un projet de recherche FUI, approuvé sous le nom *MISAC*⁴. Le projet réunit les équipementiers *VALEO*, pour l'automobile, et *THALES*, pour l'aéronautique, avec deux P.M.E. du domaine des composants électriques, et trois laboratoires universitaires dans les domaines des sciences cognitives et du traitement de l'information.

Le point de départ de ce projet est l'idée que, dans ces domaines plus conservateurs, l'interaction avec les écrans tactiles peut être améliorée par l'ajout d'un retour vibratoire envoyé directement au doigt de l'utilisateur au moment du contact avec l'écran. Il est donc estimé que, dans un premier temps, cette nouvelle modalité contribuera à rendre l'utilisation des interfaces tactiles plus sûre et plus fiable, grâce à l'engagement *actif* du sens tactile dans le processus de perception. De plus, avec les progrès technologiques réalisés dans le domaine des composants électriques et actionneurs, des patterns vibratoires complexes, qui vont au delà de la simple "validation de l'action" pourront être créés. Cette deuxième contribution du projet vise essentiellement la satisfaction de l'utilisateur, en essayant de lui offrir une sensation multi-modale adaptée.

Pour répondre à ces attentes, le projet *MISAC* explore une nouvelle modalité d'interaction avec les écrans tactiles, c'est-à-dire l'interaction *haptique*⁵, où l'activation appropriée du sens tactile est primordiale.

A travers cette thèse, la contribution du *LISTIC* dans le projet porte essentiellement sur l'étude, l'analyse et la modélisation des patterns vibratoires, et s'articule autour du deuxième objectif du projet, c.à.d. la satisfaction d'utilisation.

³Pour une idée plus claire sur les conséquences de cette spirale, il suffit d'analyser le cas de l'entreprise *Nokia*, qui en 2010 était le leader du marché des smartphones, et qui à l'heure actuelle n'est plus dans le top 5 [Statista 2014]. Une contribution importante à ce déclin a été l'adoption tardive de la technologie tactile.

⁴*MISAC – Multi-fonctional Intelligence Surface for Automotive & Aeronautics Cockpits* – est un projet de recherche issue des pôles de compétitivité Arve Industries et Aerospace Valley, qui co-financent cette thèse.

⁵Le mot "haptique", provient du mot grec *haptikos*, utilisé pour indiquer un concept lié au sens du toucher. Au sens large du mot, il est fréquemment employé comme adjectif pour indiquer la propriété d'un objet à stimuler activement le sens tactile par des forces ou des vibrations [Robles-De-La-Torre 2010].

Plus précisément, nous montrerons que les recherches réalisées, concrétisées par deux modèles de perception, peuvent aider les équipementiers qui souhaitent adopter l'interaction haptique dans leur dispositifs tactiles, en simplifiant le processus de conception de stimuli vibratoires adéquats.

La réalisation de cet objectif demande d'abord *une étude* approfondie du sens tactile, afin de comprendre les mécanismes psychophysiques déterminants pour la perception vibrotactile. A partir de cette étude, une *analyse* des stimuli vibratoires, en utilisant des techniques avancées de traitement de signal, est nécessaire afin de trouver les variables physiques les plus importantes pour caractériser le retour haptique. C'est ensuite sur ces bases que nous nous intéresserons à *la modélisation* de patterns vibrotactiles, ce qui permettra de lier la satisfaction d'utilisation aux variables physiques ou ergonomiques des patterns vibrotactiles. Les modèles ainsi créés répondent aux attendus des équipementiers, en montrant comment les caractéristiques des stimuli vibratoires influent sur l'appréciation et la satisfaction des utilisateurs. Cette nouvelle connaissance, structurée sous une forme linguistique interprétable, leur permet d'améliorer la conception des stimuli vibratoires afin de maximiser la qualité de l'expérience.

En dernier lieu, nous mettrons en évidence la généralité des techniques employées, qui ne se limitent pas aux contextes automobile ou aéronautique, et qui peuvent être utilisées dans un cadre plus large pour l'analyse et la modélisation des patterns vibrotactiles.

Le sujet de cette thèse est donc à la confluence de trois grands domaines de recherche : la psychophysique, le traitement de signal et la modélisation de l'information et de la connaissance. Étant donné le caractère novateur du sujet traité, cette thèse amène des contributions dans les trois domaines cités. Néanmoins, la singularité de ces travaux réside surtout dans l'enchaînement et la coopération des techniques employées.

1.3 Organisation du document

Étant donné les particularités des trois domaines de recherche étudiés, ce mémoire est structuré en trois chapitres complétés par quatre annexes.

Dans le *chapitre 2*, la problématique des interfaces tactiles est introduite. Dans un premier temps, nous montrerons, à travers les études bibliographiques réalisées, la nécessité d'avoir un retour haptique envoyé au doigt au moment de l'interaction avec l'interface. Cela permet d'améliorer simultanément l'efficacité et la satisfaction de l'utilisateur, surtout dans les situations à charge cognitive élevée. Dans la suite, une étude psychophysique approfondie du sens tactile sera présentée. Nous décrivons dans cette partie les mécanorécepteurs de la peau et la structure psychophysique du sens tactile. Cela nous conduira vers la définition de trois variables originales pour caractériser les stimuli vibrotactiles, prenant en compte l'activation des différents mécanorécepteurs et leur couplage. Nous présentons ensuite les principales techniques d'analyse temps-fréquence, afin de proposer une procédure automatique de calcul de ces variables d'influence. Parmi ces méthodes, nous mettrons en avant la transformée en ondelettes continue, en raison de la flexibilité offerte par le choix

de l'ondelette. Finalement, le chapitre se termine par un aperçu sur les techniques de type *computational intelligence*, en vue de réaliser la modélisation des stimuli vibratoires.

Le *chapitre 3* de cette thèse est consacré à la caractérisation des stimuli vibrotactiles, réalisée à travers des expériences psychophysiques et des analyses numériques. L'objectif sous-jacent de ce chapitre est de montrer l'existence d'un lien entre les caractéristiques physiques des stimuli vibrotactiles et les sensations induites. En conséquence, le chapitre débute par la présentation d'une première expérience psychophysique traitant les aspects de dissimilarité perceptuelle entre différents patterns vibratoires et qui nous aidera ensuite à valider les variables choisies. La partie suivante de ce chapitre est consacrée à la présentation détaillée de la transformée en ondelettes continue, qui est ensuite appliquée avec d'autres techniques de traitement de signal, afin d'extraire les trois variables caractéristiques des patterns vibratoires. Nous mettrons ensuite en évidence l'utilité de ces variables par des comparaisons avec les données de dissimilarité perceptuelle. En dernier lieu, une deuxième expérience psychophysique sera décrite, portant sur la satisfaction et l'appréciation du retour haptique. Les résultats obtenus par cette expérience permettront de réaliser, dans le *chapitre 4*, un premier modèle de l'appréciation des stimuli haptiques.

Dans le *chapitre 4*, la caractérisation des stimuli haptiques, réalisée antérieurement, est suivie de la conception de deux modèles indépendants, mais qui ont un objectif commun : décomposer le confort ou l'appréciation induite par les stimuli vibratoires sur plusieurs critères. Grâce à son pouvoir explicatif, la logique floue a été choisie pour l'implantation de ces deux modèles. Ainsi, le chapitre commencera par la présentation du premier modèle réalisé, qui décompose le degré de confort induit par un stimulus vibratoire selon les trois variables caractéristiques déduites précédemment. Dans ce processus, une méthode originale pour réaliser l'extraction de la base de règles floues sur un système de *Mamdani* est aussi proposée sur la base de l'approche classique de Wang-Mendel. Finalement, les résultats du modèle seront comparés avec les estimations des utilisateurs, afin de quantifier la performance du modèle. Ensuite, dans la dernière partie du chapitre, un deuxième modèle de perception, réalisé en collaboration avec un expert en ergonomie automobile, sera présenté. Contrairement au premier modèle, qui offre une vue générique sur la perception vibrotactile, ce deuxième modèle est conçu pour le contexte automobile et vise à décomposer le confort sur trois critères sensoriels-ergonomiques définis par l'expert, c.à.d. propreté, enfoncement et adaptation au contexte. Suite aux bons résultats obtenus dans le contexte automobile, la portabilité du modèle pour le domaine aéronautique est aussi étudiée à la fin du chapitre.

Un bilan final sera établi dans le *chapitre 5*, ce qui permettra de résumer les avantages et les limites des travaux réalisés. Ensuite, des perspectives à court et long terme, envisageables à partir des recherches réalisées dans cette thèse, seront présentées.

Problématique des interfaces tactiles

Sommaire

2.1	Introduction	6
2.2	Évolutions des interfaces tactiles	6
2.3	Généralités sur le Feedback Vibratoire	8
2.3.1	Avantages de la rétroaction vibratoire	8
2.3.2	Discrimination tactile	12
2.3.3	Au-delà de l'haptique : la multimodalité	14
2.4	Psychophysique du Sens Tactile	15
2.4.1	Les mécanorécepteurs de la peau	15
2.4.2	Seuils de détection et effets de la fréquence	17
2.4.3	L'effet de l'amplitude et la loi de Stevens	19
2.4.4	Autres facteurs influant sur la perception tactile	20
2.4.5	La théorie des quatre canaux	22
2.4.6	Le canal de Pacini et l'intégration neuronale de stimuli temporels	23
2.4.7	Le canal Non-Pacini I et la vitesse du stimulus	26
2.4.8	Interaction inter-canaux	28
2.4.9	Synthèse sur le sens tactile	28
2.5	Analyse Temps-Fréquence de Signaux Vibrotactiles	29
2.5.1	La Transformée de Fourier à Court Terme	30
2.5.2	La Distribution de Wigner-Ville	32
2.5.3	Représentations Temps-Échelle	36
2.6	Aperçu des techniques de <i>Computational Intelligence</i>	37
2.6.1	Computational Intelligence et Soft Computing	37
2.6.2	Algorithmes génétiques	38
2.6.3	Réseaux de neurones artificiels	40
2.6.4	Généralités sur la logique floue	42
2.7	Conclusion	47

2.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif d'offrir une vision générale sur l'état d'avancement des travaux et des connaissances dans le domaine des interfaces tactiles pour un usage automobile ou aéronautique. En particulier, ce premier chapitre a pour but de proposer des bases pour les méthodes et les concepts qui vont être développés et utilisés dans les chapitres ultérieurs. La nature hétérogène de cette partie est en liaison avec le caractère pluridisciplinaire du projet *MISAC*, c'est à dire, psychophysique, signal, intelligence computationnelle. Bien que formant une part importante du projet *MISAC*, les aspects liés à la technologie des actionneurs n'ont pas fait l'objet de nos travaux et ne sont pas traités ici.

En conséquence, nous commençons par présenter l'évolution et l'état actuel des interfaces tactiles, suivis d'une analyse bibliographique sur l'intérêt de l'ajout de retours vibratoires pour des dispositifs dotés d'écrans tactiles. Puis, nous présentons une analyse psychophysique du sens tactile, qui nous aidera à mieux comprendre la composition des sensations tactiles, les facteurs influant sur la perception tactile ainsi que leurs interactions. Ensuite, les méthodes d'analyse temps-fréquence des signaux vibratoires sont décrites et quelques conclusions relatives à leur emploi sont dégagées. Le chapitre se termine par un aperçu sur les différentes techniques de *computational intelligence* existantes, tout en précisant leurs avantages et inconvénients ainsi que leur cohérence avec l'objectif de cette thèse, c'est à dire la définition d'un modèle de perception pour les signaux vibratoires.

2.2 Évolutions des interfaces tactiles

Dans les cinq dernières années, le marché des dispositifs tactiles a explosé, avec un nombre total d'appareils qui est passé de 167 millions en 2008 à 665 millions en 2011, et qui est estimé à plus de 1350 millions au-delà de 2014 (figure 2.1) [Lee 2011]. Le taux de croissance annuel moyen du marché des dispositifs tactiles reste aussi très élevé, et bien supérieur à celui des téléviseurs à écrans plats par exemple.

Ces données statistiques indiquent sans aucun doute que le marché des dispositifs et interfaces tactiles est en pleine expansion. Même si cette expansion est essentiellement fondée sur l'évolution des *smartphones* ou des tablettes, qui représentent le principal vecteur de croissance, la technologie des interfaces tactiles a également été adoptée par d'autres dispositifs visant à faciliter l'interaction homme-machine. Par exemple, une bonne partie des distributeurs automatiques de billets ou boissons sont aujourd'hui commandés via des interfaces à écrans tactiles qui ont remplacé les boutons mécaniques.

Bien que l'évolution des interfaces mécaniques en interfaces tactiles corresponde à une demande du marché et des consommateurs, elle est aussi très bénéfique pour les fabricants et équipementiers, car elle permet d'envisager de résoudre les problèmes techniques de l'appareil par une simple mise à jour logicielle. Par ailleurs, grâce à la *virtualisation* des concepts, l'aspect visuel d'une interface tactile, par exemple les couleurs ou les dimensions des différents boutons virtuels, peut aussi être facilement changé.

L'industrie automobile ne fait pas exception à ce changement, puisque plusieurs fonctionnalités d'une automobile moderne ne sont plus contrôlées par des boutons mécaniques,

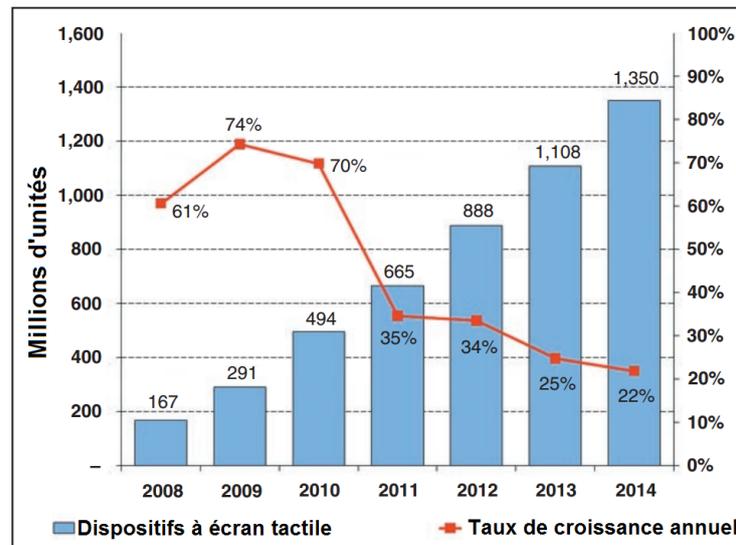


FIGURE 2.1 – L'évolution du marché des dispositifs tactiles. Nombre d'unités et taux de croissance annuel. Adapté de [Lee 2011].

mais plutôt par des écrans tactiles élégants embarqués à bord du véhicule [Kim 2014]. De plus, il est estimé que le marché des plates-formes pour l'info-divertissement embarquées dans les cockpits de voitures devrait s'accroître de 12 % par an jusqu'en 2016 selon [MarketsAndMarkets 2012], ce qui indique que la technologie *touch-screen* est à la fois acceptée et demandée par les utilisateurs pour remplacer les interfaces mécaniques dans leur voiture.

Bien qu'évidente au sens de l'évolution technologique, cette transition a forcé les équipementiers automobiles à s'interroger sur sa viabilité à long terme, surtout en raison de l'impact négatif que les interfaces tactiles ont sur les conducteurs et sur la sécurité dans une situation de conduite [Van Erp 2001].

En effet, le principal inconvénient des interfaces tactiles actuelles est le fait qu'elles s'appuient sur le sens visuel de l'utilisateur pour lui donner un retour, alors que l'activation d'un bouton mécanique stimule le sens du toucher de façon pro-active. Cette passivité des interfaces tactiles oblige le conducteur à vérifier visuellement son action sur la surface afin de compenser le retour mécanique manquant, détournant ainsi son attention de la route, augmentant par là même le risque d'accidents [Stevens 2002]. Cela est corroboré par les conclusions d'un rapport technique [Klauer 2006] dans lequel les auteurs montrent que le fait de quitter la route des yeux pour une durée supérieure à 2 secondes augmente significativement le risque d'accidents routiers.

Bien que moins critique que dans le domaine automobile, ce défaut majeur des interfaces tactiles existe aussi dans d'autres domaines d'activité où l'interaction se fait par des interfaces homme-machine (IHM) à écran tactile. Un de ces domaines est l'industrie aéronautique (civile et militaire) où le remplacement des interfaces mécaniques par des écrans tactiles est actuellement à l'étude [Alapetite 2012, Coni 2011].

Bien que les particularités liées à l'emploi d'écrans tactiles dans les cockpits d'automobiles ou d'avions soient différentes, la problématique à gérer est commune : rendre l'interaction avec les interfaces tactiles plus sûre et plus fiable pour l'utilisateur.

La façon la plus simple d'atteindre cet objectif consiste à fournir un retour ou *feedback* direct au doigt par des patterns vibratoires ou *signaux vibrotactiles*, déclenchés par l'interface tactile au moment de l'interaction avec le doigt. Ces vibrations, qui sont immédiatement perçues par les mécanorécepteurs de la peau, ont le rôle de transmettre une information concernant l'action de l'utilisateur sur la surface tactile. L'information est ainsi transmise uniquement à travers le sens tactile, soulageant par là même le sens visuel.

Les caractéristiques de ces signaux vibratoires doivent être choisies de manière à ce que les sensations tactiles créés soient facilement détectables, confortables, et qu'elles ressemblent si possible aux sensations induites par l'interaction avec des dispositifs mécaniques.

Notons que la généralité de cette approche n'est pas limitée aux domaines automobile et aéronautique, et qu'elle peut être facilement adoptée par d'autres types d'IHM tactiles, afin de faciliter leur utilisation.

L'ajout de patterns vibratoires sur les dispositifs à écrans tactiles représente donc une nouvelle étape dans l'évolution des interfaces homme-machine. Dans cette étape, l'élégance et la flexibilité des interfaces tactiles sont combinées avec la stabilité et la sécurité offertes par les dispositifs mécaniques. Dans la suite de ces travaux nous appellerons interfaces *haptiques* ce nouveau type de dispositifs.

2.3 Généralités sur le Feedback Vibratoire

2.3.1 Avantages de la rétroaction vibratoire

Comme il a été déjà précisé, l'ajout du feedback vibratoire sur les interfaces tactiles a le rôle de partiellement soulager le sens visuel. Ceci est en relation avec la *théorie des ressources multiples* de C.D. Wickens [Wickens 2002] qui affirme que la baisse des performances cognitives est considérablement réduite si l'information est fournie par des sens différents. Par conséquent, nous pouvons réduire le stress visuel associé à une interface tactile en présentant au sens du toucher de l'utilisateur une rétroaction proche de celle fournie par les boutons et par les interfaces physiques.

De nombreux exemples quotidiens existent, où la répartition de l'information sur plusieurs sens facilite le traitement simultané de différentes sous-tâches :

- conduire la voiture en utilisant le sens *visuel* et écouter la radio avec le sens *auditif* ;
- dactylographier une lettre en utilisant le sens *tactile* et regarder l'écran ou la lettre à travers le sens *visuel*.

Tout ceci confirme l'importance des feedback vibratoires dans les interfaces tactiles pour optimiser l'emploi des ressources de l'utilisateur. Mais les avantages de la rétroaction vibratoire ne se limitent pas au soulagement du sens visuel. Ainsi, plusieurs articles

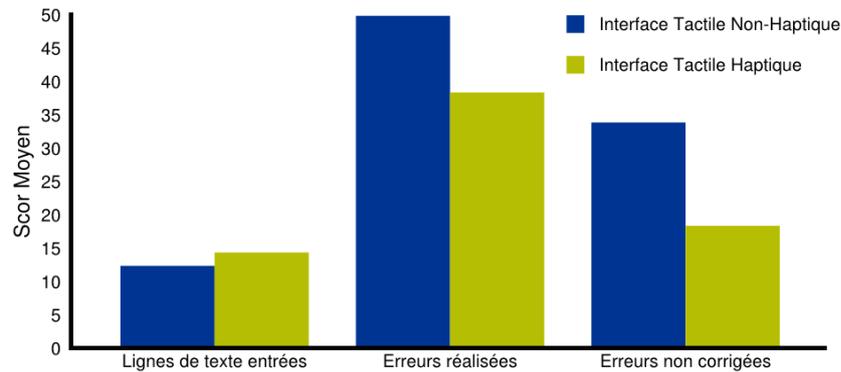


FIGURE 2.2 – Comparaison entre les interfaces non-haptiques et les interfaces haptiques selon trois mesures objectives. Résultats de [Brewster 2007].

[Poupyrev 2002, Brewster 2007, Leung 2007, Hoggan 2008a], portant sur l'étude du feedback vibratoire pour des appareils à écran tactile, ont mis en avant son importance par des méthodes subjectives et objectives d'évaluation. Dans ces études, des appareils comme des smart-phones à écran tactile, tablettes ou assistants numériques personnels sont généralement employés. Afin de souligner l'importance du feedback vibratoire, les auteurs proposent aussi des comparaisons entre les performances d'un dispositif haptique et celles d'un dispositif non-haptique.

Parmi les méthodes utilisées pour évaluer la performance objective des dispositifs haptiques nous trouvons :

- le temps nécessaire pour faire défiler une liste sur un smartphone à écran tactile : la rétroaction vibratoire a réduit le temps de recherche dans la liste de 22% [Poupyrev 2002] ;
- le temps de réponse de l'utilisateur à un téléchargement terminé sur un dispositif portable : la création d'une barre de téléchargement qui utilise le feedback haptique pour informer l'utilisateur sur l'état courant du téléchargement a permis de réduire le temps de réponse de 55 % par rapport à la situation non-haptique [Brewster 2005] ;
- précision dans la saisie de texte au moyen d'un clavier virtuel sur une tablette tactile : l'ajout de patterns vibratoires amène une réduction du nombre d'erreurs et facilite leur correction, mais augmente aussi le nombre de lignes de texte entrées [Brewster 2007] ; les résultats de ces trois mesures, obtenues dans un environnement statique, sont synthétisés dans la figure 2.2 ;
- le temps moyen pour la saisie d'une phrase : environ 20 s pour des interfaces haptiques, par rapport au 25 s pour des interfaces non-haptiques ; le temps moyen sur un clavier physique a été mesuré à 13 s par phrase [Hoggan 2008a] ;

Notons que dans [Hoggan 2008a], les performances des trois interfaces (haptique, non-haptique et mécanique) ont été comparées dans deux contextes : environnement statique

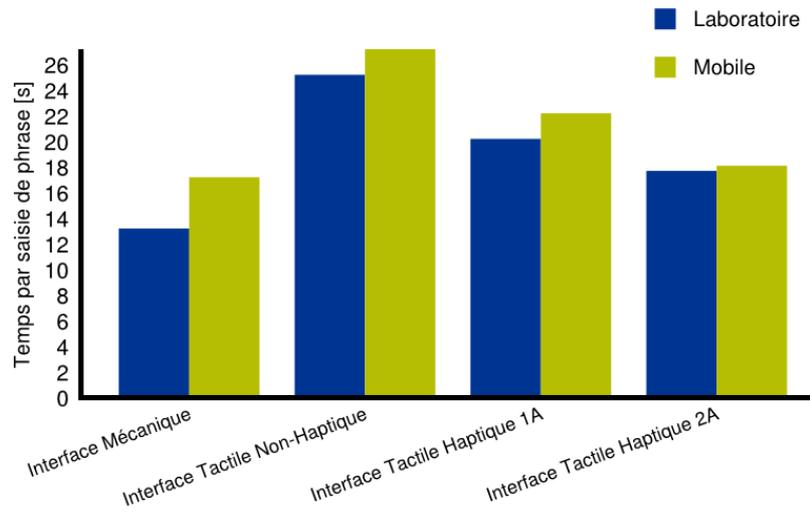


FIGURE 2.3 – Comparaison entre quatre types d’interfaces pour le temps moyen de saisie d’une phrase. Résultats de [Hoggan 2008a].

(dans un laboratoire) et environnement mobile bruyant (dans un train ou métro). Comme attendu, les performances des trois sont moins bonnes dans l’environnement mobile par rapport à l’environnement statique, mais les écarts relatifs entre eux n’ont pas changé significativement.

Par contre, il est montré aussi dans [Hoggan 2008a], que l’emploi de deux actionneurs pour générer le feedback vibratoire améliore les performances des interfaces haptiques et surtout que, dans un environnement mobile, elles se rapprochent de celles des interfaces mécaniques. Les résultats de ces quatre types d’interfaces selon le temps moyen pour la saisie d’une phrase sont synthétisés dans la figure 2.3, pour les deux contextes : laboratoire et mobile. Nous pouvons constater qu’une interface haptique dotée de deux actionneurs (“2A”) réduit nettement le temps nécessaire pour la saisie une phrase, par rapport à une interface haptique avec un seul actionneur (“1A”).

En dehors des mesures objectives utilisées pour évaluer la performance des dispositifs tactiles, certaines mesures subjectives portant sur l’évaluation de la charge mentale et physique, l’effort ou la frustration lors de l’utilisation des interfaces, sont également présentées dans la littérature [Hoggan 2008a, Brewster 2007, Hoggan 2007, McAdam 2009]. Ces indicateurs sont généralement obtenus par la méthode NASA-TLX (*Task Load Index*) [Hart 1988], en demandant aux utilisateurs de remplir un questionnaire sur leur expérience avec les dispositifs pendant le test.

La figure 2.4 présente les résultats, extraits de [Hoggan 2008a], d’une étude comparative entre une interface physique (mécanique), une interface tactile non-haptique et une interface tactile haptique, sur un ensemble d’indicateurs subjectifs. L’analyse de ces résultats confirme la théorie des ressources multiples, vu que l’ajout du feedback vibratoire sur une interface tactile passive aboutit à une amélioration significative de la charge mentale,

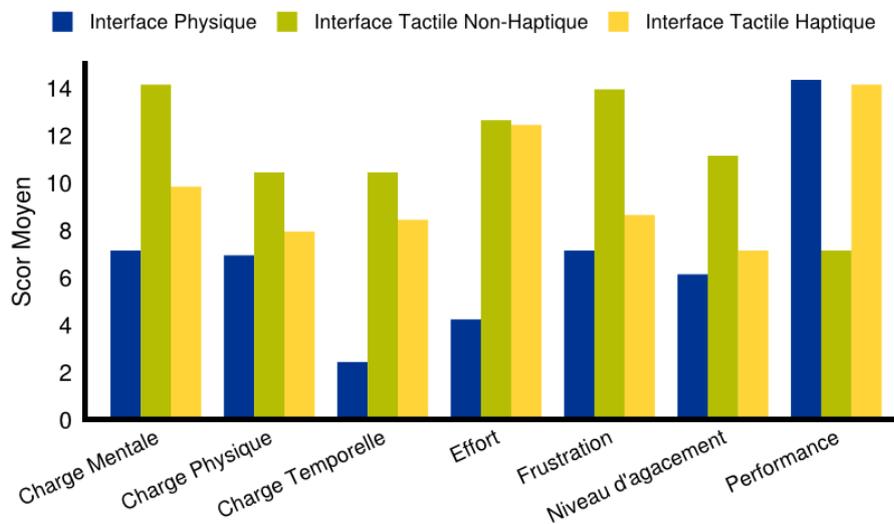


FIGURE 2.4 – Score moyen au questionnaire NASA-TLX pour trois types d’interface homme-machine. Résultats de [Hoggan 2008a].

de la frustration et du niveau d’agacement, tout en augmentant la performance *subjective* de l’interaction avec l’interface.

Étant données les bonnes performances objectives et subjectives offertes par la rétroaction haptique sur des dispositifs portables d’usage quotidien, c.à.d. smart-phones, tablettes et assistants numériques personnels, l’ajout des patterns vibratoires sur les systèmes d’information embarqués à bord des véhicules a récemment commencé à être étudié.

Ainsi, dans [Pitts 2012a], l’interaction avec l’interface tactile du tableau de bord d’une automobile est analysée pour deux situations : feedback visuel seul et feedback visuel + haptique. Pour le feedback visuel, trois niveaux sont étudiés : “immédiate”, “avec latence”, “aucun”. Les expériences sont réalisées dans une cabine de simulateur de conduite et dans un scénario de conduite sur autoroute. Comme dans d’autres études, l’effet de la rétroaction haptique est évalué par des indicateurs objectifs et subjectifs. Les mesures objectives sont surtout rapportées au temps total et au nombre de coups d’œil nécessaires pour la réalisation d’une tâche sur l’interface, puisque, comme nous l’avons déjà énoncé dans la section 2.2, la distraction visuelle est une des principales causes des accidents routiers. Ces résultats, partiellement reproduits dans la figure 2.5, indiquent que l’interaction entre le feedback haptique et visuel réduit simultanément le nombre de coups d’œil par tâche et le temps total par coup d’œil, entraînant la réduction de la durée totale de la tâche, avec des effets bénéfiques sur la sécurité dans une situation de conduite. Les évaluations subjectives des feedbacks montrent que les utilisateurs préfèrent, et font aussi plus confiance au feedback visuel et haptique conjoint (6.6 sur 9 pour la préférence et 7.2 sur 9 pour la confiance) par rapport au feedback visuel seul (5.3 sur 9 pour la préférence et 5.1 sur 9 pour la confiance) [Pitts 2012a]. Ces conclusions sur l’ajout du feedback vibratoire pour soulager le sens visuel sont corroborées par d’autres études [Richter 2010, Pitts 2009, Lee 2008,

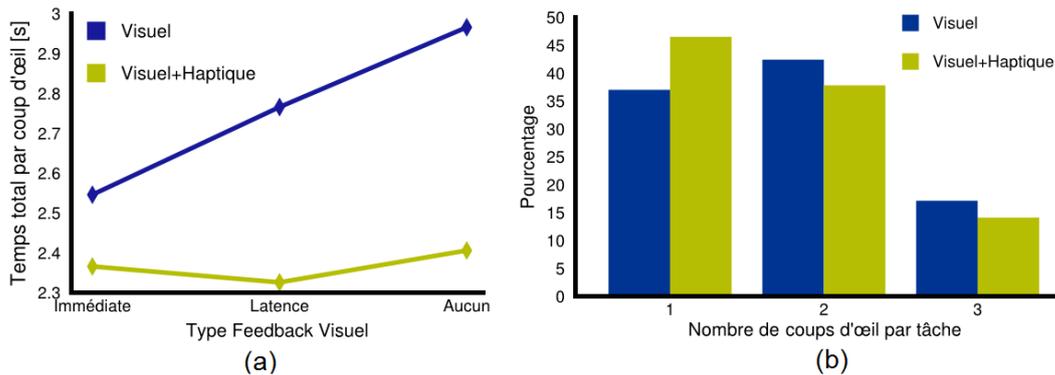


FIGURE 2.5 – Temps total par coup d'œil (a) et nombre de coups d'œil par tâche (b), pour un système d'information embarqué à bord d'un véhicule. Résultats extraits de [Pitts 2012a].

[Pitts 2012b]. Notons que plusieurs de ces études sont effectuées en collaboration avec des entreprises de l'industrie automobile, ce qui indique qu'au-delà de l'intérêt scientifique, ce nouveau type de feedback présente aussi un intérêt économique pour l'industrie automobile.

Pour conclure cette section sur les avantages de la rétroaction vibratoire, signalons que l'interface tactile n'est pas le seul dispositif à être utilisé pour transmettre un feedback haptique à l'utilisateur. Nous nous référons ici principalement aux travaux de Van Erp qui portent sur la conception d'un siège conducteur équipé de plusieurs actionneurs [Van Erp 2004, de Vries 2009], capable d'améliorer les performances de la conduite sous charge cognitive élevée. Les bénéfices d'un siège haptique à bord d'un véhicule ont aussi été étudiés dans [Chang 2011]. D'autres équipements peuvent également bénéficier de rétroaction haptique : une veste de torse [Van Erp 2006, Self 2008], un bracelet [Paneels 2013] ou une ceinture [Van Erp 2005]. Mais vu que nos travaux portent sur l'étude de la rétroaction vibratoire pour les interfaces tactiles, nous n'irons pas plus loin dans l'analyse de ces autres dispositifs.

2.3.2 Discrimination tactile

Dans la section précédente, le feedback haptique renvoyé au doigt de l'utilisateur par un dispositif tactile a été étudié d'une manière *binnaire* à travers des comparaisons entre les conditions *avec* et *sans* feedback vibratoire. Les études réalisées montrent l'efficacité des interfaces à retour haptique dans plusieurs contextes d'utilisation (tablettes, smart-phones, systèmes embarqués à bord des véhicules) et par rapport à plusieurs indicateurs (précision, temps de réalisation d'une tâche, charge cognitive, etc.).

Néanmoins, avec les avancées technologiques dans le domaine des actionneurs embarqués (voir [Kim 2008, Koskinen 2008] pour des comparaisons entre différents types d'actionneurs et [Banter 2010] pour un aperçu sur les différentes techniques d'actionnement), il est maintenant possible de générer des patterns haptiques complexes, capables d'induire des sensations tactiles évoluées qui vont au-delà de la simple confirmation de l'action sur

l'interface.

C'est sur ces bases que Brewster et Brown ont introduit dans [Brewster 2004] les *tactons*¹, concept analogue à celui des *earcons* [Blattner 1989], pour définir un moyen de transmettre à l'utilisateur des informations non-visuelles *structurées*, à travers son sens du toucher. En lien étroit avec le concept de tactons, MacLean et Enriquez ont défini la notion d'icône ou phonème haptique [MacLean 2003, Enriquez 2006], comme étant des messages tactiles primaires pouvant se combiner (par concaténation ou superposition) pour créer des *mots haptiques*. Même si ces deux concepts se différencient au début par les instruments utilisées pour générer le feedback haptique (systèmes à retour de force pour les phonèmes haptique et interfaces tactiles pour les tactons), l'idée sous-jacente est la même : associer un sens à chaque pattern tactile d'une liste prédéfinie de patterns, c.à.d. *alphabet haptique*, réalisant ainsi un codage associatif de l'information tactile. En conséquence, le terme *tacton* sera utilisé dans la suite pour désigner les deux concepts.

La création de tactons consiste donc à choisir les paramètres des signaux vibrotactiles et leur valeurs correspondantes. Ces choix doivent être faits afin d'assurer une discrimination maximale des signaux. Dans [Brewster 2004] les paramètres les plus communs sont décrits, avec des suggestions et consignes d'emploi :

- *la fréquence* : un des plus importants paramètres pour les signaux vibratoires ;
- *l'amplitude* : également importante, facilite le codage de l'intensité des tactons ;
- *la durée* : utilisée pour coder les informations temporelles des tactons ;
- *la forme d'onde* : étant difficile à distinguer, elle est moins importante que les autres ;
- *le rythme* : consiste à grouper plusieurs tactons dans des unités rythmiques, et donc à obtenir des tactons avec des *durées* différentes ;
- *la localisation spatiale* ou *locus* : implique l'emploi de plusieurs actionneurs, installés sur différents endroits du corps ;
- *la rugosité perceptuelle* : variable complexe, définie dans [Brown 2005] pour créer trois niveaux de rugosité en utilisant des sinusoïdes modulées en amplitude.

Après le choix des paramètres, une étape d'apprentissage est généralement mise en oeuvre. Dans cette étape les utilisateurs apprennent les associations entre les tactons, définies par leurs variables d'entrées, ainsi que leur signification. Un exemple d'une telle association est :

$$Tacton_i \equiv \{Rugosité(lisse), Rythme(alerte)\} \implies Nouveau\ message\ vocal \quad (2.1)$$

¹*Tacton* - mot anglais obtenu par la contraction des mots *tactile* et *icon*.

²L'évaluation est faite sur la base de distances perceptuelles entre les tactons à partir d'une représentation Multi-Dimensional Scaling (voir Annexe A.1).

³Dans [Ryu 2010] les auteurs montrent que la tension électrique d'entrée des signaux influe sur l'intensité perçue, et donc les N niveaux de tension d'entrée correspondent à N niveaux d'intensité.

⁴Le taux de reconnaissance représente la moyenne des deux expériences réalisées dans [Brewster 2010].

TABLE 2.1 – Aperçu bibliographique sur la conception et la discrimination des tactons

Étude	Variables employées (nombre de catégories)	Taux de reconnaissance
[Brown 2005]	rugosité (3) ; rythme (3) ⇒ 9 tactons	71 %
[Brown 2006]	rugosité (2) ; rythme (3) ; locus (3) ⇒ 18 tactons	81 %
[Enriquez 2006]	fréquence (3) ; forme d'onde (3) ⇒ 9 tactons	73 % (forme d'onde) ; 81 % (fréquence)
[Ternes 2008]	rythme(21) ; fréquence (2) ; amplitude (2) ⇒ 84 tactons	<i>Sans Objet</i> ²
[Ryu 2010]	tension électrique d'entrée (3 ; 5 ; 7) ³ ⇒ 3, 5, 7 tactons	96 % (3 tactons) ; 80 % (5 tactons) ; 53 % (7 tactons) ;
[Brewster 2010]	forme d'onde (2) ; rythme (3) ⇒ 6 tactons	93 % ⁴
[Azadi 2014]	fréquence(3) ; amplitude (3) ; durée (3) ; ⇒ 9 tactons	79 % (doigt) ; 74 % (avant bras)

Les performances du codage associatif sont évaluées par les taux de reconnaissance des tactons. Une synthèse de la littérature des *tactons* est présentée dans le Tableau 2.1 avec les variables utilisées pour créer les tactons et les taux de reconnaissance obtenus. Nous pouvons remarquer une prédominance de l'emploi des variables suivantes : *fréquence* (employée 3 fois), *rythme et durée* (employés 5 fois) et *forme d'onde* (employée 4 fois y compris la rugosité). Étant donnée les bons résultats de reconnaissance obtenus par ces variables, nous retenons leur utilité pour la discrimination des patterns vibrotactiles.

Toutes ces variables représentent les paramètres électriques utilisés pour contrôler les actionneurs qui génèrent les vibrations. Mais pour définir des modèles de *perception* pour les patterns vibratoires, nous avons besoin de comprendre comment ces informations sur les signaux vibrotactiles sont intégrées par le cortex à travers le sens tactile. En conséquence, dans la section 2.4 nous présenterons un aperçu psychophysique du sens tactile afin de mettre en évidence sa structure, ses propriétés et les facteurs influant sur la perception tactile.

2.3.3 Au-delà de l'haptique : la multimodalité

Avant de passer à une étude approfondie du sens tactile, nous devons ajouter quelques remarques sur un aspect qui, même s'il n'est pas directement l'objet de nos travaux, fait partie de ses perspectives : *la perception multimodale*. Nous nous référons ici surtout à l'interaction entre le feedback haptique et le feedback auditif. Plusieurs études réalisées dans cette direction indiquent une forte influence de la modalité auditive sur l'haptique dans le sens où la présence du feedback auditif augmente l'intensité perçue d'un stimulus haptique [Tikka 2006] et améliore le taux de reconnaissance des tactons [Chen 2010,

Wei 2014]. Une synergie perceptuelle entre les deux modalités est également mise en évidence dans [Altinsoy 2009], où le feedback multimodal haptique-audio a été perçu par les participants comme plus adapté que les deux modalités séparées. Pour l'interface tactile d'un smart-phone, l'existence d'une synergie entre les modalités haptique, auditive et visuelle a été relevée dans [Hoggan 2008b] par des évaluations subjectives sur plusieurs combinaisons d'effets : $(2 \times \text{haptique}) \times (2 \times \text{audio}) \times (8 \times \text{visuel})$.

L'interaction haptique-audio a aussi été étudiée pour les systèmes d'information embarqués à bord des véhicules. Nous remarquons ainsi les travaux de Pitts [Pitts 2012b, Pitts 2009] qui montrent que si l'information est fournie par les deux modalités simultanément, le temps de réalisation de certaines tâches, telles que contrôler la radio ou la climatisation, est considérablement réduit et que les utilisateurs aiment davantage cette interaction que les deux modalités séparées. Dans une démarche similaire à celle de [Tikka 2006], dans [Pitts 2012b], les auteurs indiquent que l'ajout du feedback auditif augmente l'intensité perçue du signal haptique, mais aussi le réalisme de l'interaction (la sensation créée se rapproche de celle d'un bouton mécanique).

Notons néanmoins que dans les deux études citées, les stimuli auditifs étaient fournis par des écouteurs, ce qui ne reflète pas une situation réelle de conduite. En effet, l'emploi d'une rétroaction auditive dans un contexte automobile ou aéronautique est soumis à beaucoup de contraintes en raison des niveaux élevés de bruit présents dans ces environnements. En conséquence son usage doit être considéré avec précaution.

2.4 Psychophysique du Sens Tactile

Dans cette section nous examinons les principales propriétés psychophysiques du sens tactile : la structure des mécanorécepteurs, les seuils de détection et les différents facteurs influant sur la perception tactile. Puis, sur ces bases, nous présentons les principales variables psychophysiques qui caractérisent les signaux vibrotactiles, et qui seront analytiquement définies dans le chapitre 3.

2.4.1 Les mécanorécepteurs de la peau

La peau est l'organe le plus étendu du corps humain [Bos 1986]. En dehors de son rôle de protection, elle est aussi responsable de la transmission des informations, c.à.d. les sensations ou les émotions, au cortex, à travers ses récepteurs cutanés. Selon [McGlone 2010], les sensations cutanées *classiques* (le toucher, la douleur, les sensations thermiques et prurigineuses) sont arbitrées par différents récepteurs, décrits brièvement ci-dessous :

- *thermorécepteurs* – subdivisés eux-mêmes en récepteurs sensibles au froid ($< 20^\circ\text{C}$) et au chaud ($> 45^\circ\text{C}$) [McGlone 2010], ils sont responsables de la détection et la transmission des sensations thermiques ;
- *nocicepteurs* – traitent l'encodage et la transmission des sensations de douleur par un mécanisme appelé *nociception*, visant à éviter les lésions des tissus [McGlone 2010] ;

- *pruricepteurs* – responsables pour le traitement des sensations pruritiques (de démangeaison) ;
- *mécanorécepteurs* – la catégorie de récepteurs cutanés qui gèrent la perception des informations *tactiles* : leur détection, traitement et transmission vers le cortex somatosensoriel ; ils sont responsables de la perception des sensations vibratoires, de pression et de texture [McGlone 2010].

Étant donné que l'interaction avec une interface tactile haptique à l'aide de signaux vibratoires, n'active que les mécanorécepteurs, nous nous intéresserons dans la suite exclusivement à ce type de récepteurs cutanés, pour présenter leur subdivision et le mécanisme de traitement des informations tactiles qu'ils emploient. L'illustration d'une section transversale des trois premières strates de la peau humaine, à savoir l'épiderme, la derme et l'hypoderme (voir figure 2.6), montre les principales catégories de mécanorécepteurs de la peau [Johnson 2001] :

- *les corpuscules de Pacini* : sensibles aux vibrations rapides, c.à.d. de haute fréquence, ils “produisent une image neuronale fidèle des stimuli vibratoires et transitoires transmises par la peau” [Johnson 2001] ;
- *les corpuscules de Meissner* : responsables de la détection des vibrations à basse-fréquence (“battement”), ils reflètent plutôt le mouvement et la déformation dynamique de la peau ;
- *les disques de Merkel* : répondent aux indentations soutenues de la peau et sont responsables de la perception de la forme d'un objet [Johnson 2001], grâce à leur sensibilité à très basse-fréquence (en dessous de 10 Hz) [McGlone 2010] ;
- *les organes terminaux de Ruffini* : détectent l'étirement latéral de la peau et sont responsables de la perception de la direction du mouvement [Johnson 2001].

Fréquemment dans la littérature, les mécanorécepteurs sont classifiés par rapport à leur capacité d'adaptation au stimulus, décrite dans [Matsuzaki 2012] comme étant une réduction de l'activité neuronale pour un stimulus constant, afin d'éviter les surcharges cognitives. Selon le taux d'adaptation, les mécanorécepteurs sont divisés en : *unités d'adaptation rapide* (les corpuscules de Pacini et de Meissner), dont l'activité neuronale baisse après une durée de 0.1 s à 1 s de stimulation constante, et *unités d'adaptation lente* (cellules de Merkel et les terminaisons de Ruffini), qui génèrent une activité neuronale même après quelques dizaines de secondes de stimulation [Choudhary 2013]. Même si l'adaptation peut influencer la perception des stimuli vibratoires, nous soutenons que dans le contexte des cockpits automobiles et aéronautiques son effet est négligeable, vu que les stimuli utilisés dans ces contextes ont des durées bien inférieures aux périodes d'adaptation des mécanorécepteurs.

D'autre part, comme nous l'avons indiqué dans la description des mécanorécepteurs, la fréquence du stimulus semble être un des plus importants paramètres contrôlant la perception tactile. Pour cette raison, la prochaine partie est dédiée à l'étude approfondie de ce paramètre et de son influence sur les seuils de détection pour les signaux vibrotactiles⁵.

⁵Terme utilisé dans la littérature psychophysique qui dénote un signal vibratoire envoyé au sens tactile.

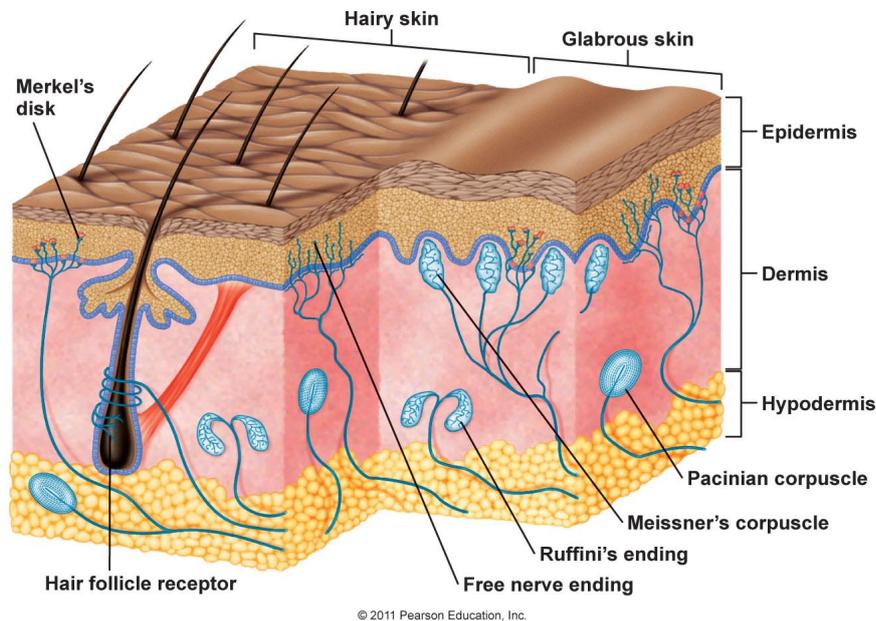


FIGURE 2.6 – Section transversale de l'épiderme, du derme et de l'hypoderme, avec annotations pour les différentes catégories de mécanorécepteurs. Source de l'image : http://droualb.faculty.mjc.edu/Course%20Materials/Physiology%20101/Chapter%20Notes/Fall%202011/chapter_10%20Fall%202011.htm

2.4.2 Seuils de détection et effets de la fréquence

Un *seuil absolu de détection* est la quantité minimale d'un stimulus qui produit une réaction consciente de détectabilité du stimulus. Par conséquent, un stimulus au-dessous du seuil va passer inaperçu, tandis qu'un stimulus au-dessus du seuil est bien perçu. Dans la définition précédente, la notion de *quantité* n'est pas clairement définie. En effet, sa définition exacte change selon le contexte, mais reste toujours liée à une mesure de magnitude physique du stimulus, par exemple la tension électrique d'un signal, le poids d'un objet, la saturation d'une couleur.

Dans le contexte des signaux vibrotactiles, le seuil absolu de détection est souvent défini dans la littérature comme l'amplitude minimale nécessaire pour la détection d'un stimulus vibratoire présenté à la fréquence f . Si l'amplitude est mesurée pour le déplacement, nous obtenons le graphique en forme de U [Gescheider 2004], présenté dans la figure 2.7. Nous pouvons ainsi remarquer que la zone de sensibilité tactile maximale se situe entre 200 Hz et 300 Hz. Cela signifie qu'à amplitude constante, nous avons plus de chances de détecter une vibration à 250 Hz qu'à 10 Hz, par exemple.

L'étude des seuils de détection est importante pour la configuration des signaux vibrotactiles, parce qu'ils permettent de définir à partir de quel niveau un signal commence à être détecté. En conséquence, dans de nombreuses études citées dans [Forta 2009] les auteurs recommandent d'utiliser des stimuli avec 15-20 dB au-dessus du seuil de détection abso-

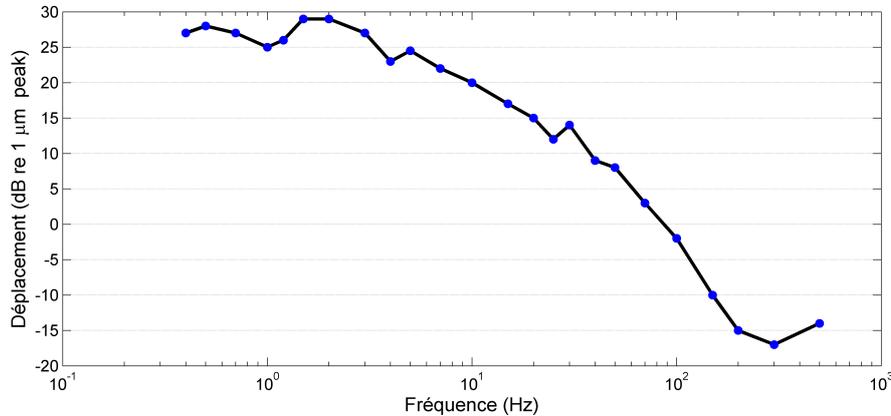


FIGURE 2.7 – Seuils absolus de détection en fonction de la fréquence de la vibration. Résultats de [Bolanowski 1988].

lue. Notons néanmoins que le seuil absolu peut être déterminé pour d’autres paramètres que la fréquence : la surface de la peau en contact avec la vibration, la durée, l’orientation, la température, le masquage, etc. Une synthèse sur l’influence de ces facteurs est présentée dans la section 2.4.4. Plus de détails sur leurs seuils de détection sont disponibles dans [Forta 2009].

Outre le seuil absolu, il existe un *seuil relatif* ou différentiel, décrit comme la plus petite variation ΔI d’un stimulus I qui peut être perçue ($\Delta I/I$). Comme pour le seuil absolu, dans le contexte des signaux vibrotactiles, la quantité à faire varier pour trouver le seuil relatif est généralement l’amplitude du stimulus [Forta 2009]. Le seuil relatif indique donc la résolution humaine par rapport au facteur I , et peut être exprimé par des valeurs absolues de déplacement ou d’accélération ($SR = \Delta I$), en pourcentage ($SR = \Delta I/I$), ou en decibels ($SR = 20 \log_{10}[(I + \Delta I)/I]$).

Quand les seuils relatifs sont exprimés en pourcentage, ils sont appelés *fractions de Weber* d’après le psychophysicien allemand Ernst Heinrich Weber [Forta 2009], qui a émis l’hypothèse selon laquelle le seuil relatif est proportionnel à la magnitude du stimulus, conduisant à ce que est connue sous le nom de la *loi de Weber* :

$$\frac{\Delta I}{I} = K = \text{constant} \quad (2.2)$$

Comme l’équation 2.2 définit une loi empirique plutôt que théorique, les cas qui ne respectent pas cette loi sont dénommés dans la littérature des “*near-miss*” de la loi de Weber. Ainsi, la discrimination de signaux auditifs mono-fréquence ne respecte pas cette loi [McGill 1968]. Pour les signaux vibrotactiles, les seuils relatifs en fonction de la fréquence rapportés dans la littérature vont de 16% pour une vibration à 160 Hz [Craig 1972] à 15%–18% pour la gamme de fréquences 8–500 Hz [Morioka 2001], et plus récemment à environ 18% pour des vibrations entre 100 et 500 Hz [Pongrac 2008].

L’importance des seuils absolu et relatif dans la conception des signaux vibrotactiles est donc résumée par la *detectabilité des signaux*, déterminée par le seuil absolu, et la *dis-*

criminabilité des signaux, fournie par le seuil relatif. Mais la conception des stimuli vibrotactiles ne se résume pas qu'à ces deux notions, que nous pourrions qualifier comme étant objectives. Elle doit être complétée par une notion qualitative sur les signaux, *le confort* induit. Cette notion, superficiellement traitée dans la littérature du sens tactile, fait donc l'objet de nos travaux. Dans les chapitres 3 et 4, des procédures expérimentales, mesures et techniques de modélisation seront développées pour modéliser le confort des signaux vibrotactiles.

Néanmoins, avant de passer à l'analyse du confort, nous devons d'abord approfondir l'étude psychophysique du sens tactile afin de bien formaliser le mécanisme de perception et ses liens avec les caractéristiques des signaux.

2.4.3 L'effet de l'amplitude et la loi de Stevens

Bien que la fréquence des vibrations ait une influence importante sur l'activation des différents types de mécanorécepteurs ainsi que sur les seuils absolus et relatifs, de nombreux autres facteurs entrent en ligne de compte pour expliquer la perception des signaux vibratoires.

Parmi ces facteurs on distingue d'abord *l'amplitude*, qui en liaison avec la fréquence, détermine les seuils absolus et relatifs des stimuli. Cette liaison est beaucoup plus complexe que ce que nous pouvons penser. En effet, une analyse de la figure 2.7 indique que chaque paire (*Amplitude, Fréquence*) induit *la même perception*. Cela signifie que si une des deux reste constante, nous pouvons obtenir la même plage de sensation en faisant varier l'autre. Par exemple, dans [Morley 1990], pour un signal vibrotactile à fréquence *constante* (150 Hz), l'augmentation de l'amplitude entraîne une augmentation de la fréquence perçue. Ce phénomène se produit aussi pour une fréquence constante de 30 Hz [Morley 1990]. En conséquence, dans la littérature, une représentation amplitude-fréquence est appelée *contour de sensations égales* et est déterminée pour plusieurs niveaux de sensation au-dessus du seuil absolu [Verrillo 1969, Stevens 1968]. Des courbes de sensations égales sont représentées dans la figure 2.8 pour six niveaux d'amplitude.

Cette dualité amplitude-fréquence rend redondante l'utilisation d'un des deux paramètres. Vu que la fréquence a un rôle important dans l'activation des mécanorécepteurs, comme illustré dans la section 2.4.2, elle est beaucoup plus utilisée dans la conception des signaux vibrotactiles que l'amplitude (voir Tableau 2.1). En conséquence, pour les expériences que nous avons réalisées dans le chapitre 3 nous avons retenu la fréquence des signaux comme paramètre variable avec une amplitude physique constante, fixée pour tous les signaux.

Néanmoins, nous rappelons que les termes *amplitude* et *intensité* ne sont pas équivalents. L'amplitude est une caractéristique physique des signaux, alors que l'intensité est une propriété perceptuelle induite par les signaux. Ainsi, deux signaux vibrotactiles ayant la même amplitude physique peuvent être perçus comme ayant des intensités différentes, en fonction des autres paramètres : fréquence, durée, forme d'onde, etc. Dans ces conditions, il est utile d'évoquer la *loi de puissance de Stevens* [Stevens 1957], considérée comme une des lois fondamentales de la psychophysique, qui relie la *magnitude physique* à son

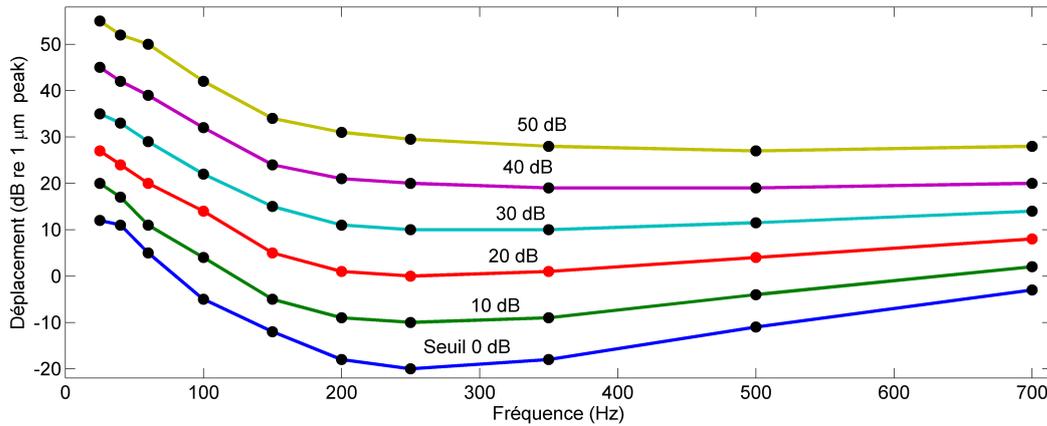


FIGURE 2.8 – Contours de sensations égales pour 6 niveaux d'amplitudes : le seuil de détection (courbe 0 dB) en bleu. Résultats de [Verrillo 1969].

intensité *subjective* (perçue) :

$$\Psi = kS^a \quad (2.3)$$

ou Ψ est la magnitude perçue et S la magnitude physique, mesurée d'un stimulus ; k est une constante de proportionnalité, et a est l'exposant de liaison. Dans la littérature nous retrouvons soit l'amplitude, soit l'énergie du stimulus pour définir la magnitude physique.

Concernant l'exposant a , plusieurs études [Stevens 1968, Franzén 1969, Verrillo 1975] montrent que pour les signaux vibrotactiles, celui-ci n'est pas fixe, mais qu'il diminue avec la fréquence du signal, c.à.d. $a = a(f)$. Cet effet est synthétisé dans la figure 2.9, où les résultats de trois études sur les valeurs des exposants pour les signaux vibratoires sont représentés pour l'amplitude (lignes continues) et pour l'énergie (lignes pointillées). Les résultats d'études plus poussées [Stevens 1968] indiquent que l'exposant pour l'amplitude, va de $a(30\text{Hz}) = 1.2$ à $a(250\text{Hz}) = 0.68$. Notons que les valeurs tracées pour l'énergie et pour l'amplitude sont identiques à un facteur 2 près, c.à.d. $\text{Amp}^{2a(f)} = \text{En}^{a(f)}$.

La loi de Stevens, avec les bonnes valeurs pour les exposants $a(f)$, permet donc d'extraire une mesure subjective à partir d'une magnitude physique, et constitue un pas important vers une analyse *psychophysique* des signaux vibratoires.

2.4.4 Autres facteurs influant sur la perception tactile

Outre la fréquence et l'amplitude, plusieurs facteurs influant sur la perception tactile sont rapportés dans la littérature. Dans cette section nous passons brièvement en revue les plus importants d'entre eux :

- *aire de contact* – une zone de contact plus grande entre la peau et la vibration à des fréquences au-dessus de 40 Hz permet de réduire le seuil de détection, grâce à une activation supérieure des corpuscules de Pacini (voir 2.4.6) [Forta 2009]

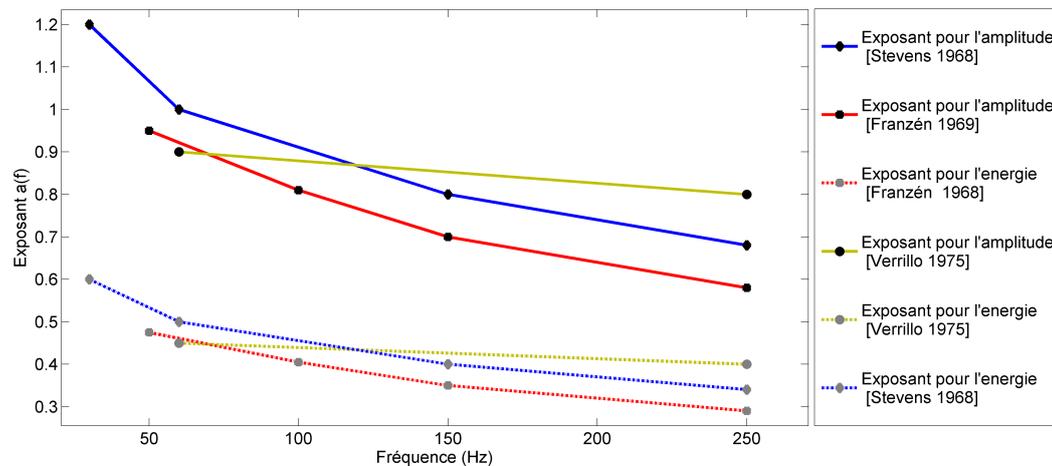


FIGURE 2.9 – Exposants reliant la magnitude physique à l’intensité subjective en fonction de la fréquence. Résultats pour l’amplitude (traits pleins) et pour l’énergie (lignes pointillées). Résultats de [Stevens 1968, Franzén 1969, Verrillo 1975].

- *l’âge* – le seuil absolu de détection pour des fréquences au-dessus de 40 Hz augmente avec l’âge de la personne, en raison d’une réduction de l’élasticité de la peau et aussi d’une diminution de la densité des corpuscules de Pacini [Verrillo 1980]; d’autre part, pour des fréquences au-dessous de 40 Hz, les seuils de détection ne changent pas avec l’âge [Verrillo 1980];
- *durée* – le troisième paramètre en ordre d’importance, après la fréquence et l’amplitude, la durée a une influence non négligeable sur la perception des signaux vibrotactiles; pour des fréquences au-dessus de 40 Hz, une durée plus élevée de la vibration entraîne une réduction du seuil de détection; ce phénomène est appelé *sommation temporelle* et sera analysé en détail dans la section 2.4.6;
- *sexe* – même si les femmes sont capables de mieux distinguer les patterns tactiles que les hommes, ce phénomène n’est pas attribué directement au sexe *per se*, mais plutôt à une densité supérieure des mécanorécepteurs du doigt [Peters 2009]; dans une autre étude, le seuil de détection des signaux vibrotactiles est indiqué comme étant légèrement plus petit pour les femmes que pour les hommes [Chauvelin 2014]; ces résultats amènent donc à une conclusion importante : *la perception tactile augmente avec la diminution de la taille du doigt* [Peters 2009];
- *orientation* – la perception des signaux vibrotactiles est influencée par la direction de la vibration [Hwang 2011, Morioka 2006] : à hautes fréquences, nous sommes plus sensibles aux vibrations verticales, c.à.d. sur l’axe normal, alors qu’à basses fréquences un mouvement des vibrations “d’avant en arrière”, c.à.d. axe tangentiel, crée les sensation les plus intenses, c.à.d. facilement détectables;
- *masquage* – défini comme le phénomène par lequel la perception d’un stimulus nor-

malement détectable est entravée par un deuxième stimulus (le masque) [Forta 2009], le masquage influe donc sur la détectabilité des signaux vibrotactiles ; afin d'éviter ce phénomène, nous devons nous assurer que le stimulus et le masque activent deux classes différentes de mécanorécepteurs et/ou que la magnitude du stimulus est bien supérieure à celle du masque (voir [Coni 2011]) ;

- *température* – selon [Harazin 2007] la température n'affecte pas la perception des vibrations à basses fréquences (4 Hz et 25 Hz), mais à haute fréquences (125 Hz) le seuil de détection augmente lorsque la température de la main diminue de 35 °C à 15 °C ; cet effet indique une réduction des corpuscules de Pacini aux basses températures ;

Retenons pour conclure que la perception tactile est fortement influencée par la fréquence de la vibration et, à travers elle, par l'activation des différents types de mécanorécepteurs de la peau. C'est pourquoi une analyse psychophysique plutôt qu'anatomique, est présentée dans la section 2.4.5 sur les mécanorécepteurs, afin d'identifier leur propriétés perceptuelles.

2.4.5 La théorie des quatre canaux

Les caractéristiques des vibrations, fréquence, amplitude, durée, etc., en relation avec les facteurs externes, température, sexe, aire de contact, etc., expliquent les sensations induites par les signaux vibrotactiles. Même si l'intégration de tous ces facteurs (internes et externes) dans un concept unitaire, *la perception*, est réalisée à haut niveau par le cortex somatosensoriel, un traitement intermédiaire des informations vibratoires est accompli en amont au niveau des mécanorécepteurs de la peau, c.à.d. corpuscules de Pacini et Meissner, disques de Merkel et terminaisons de Ruffini.

Les premières études sur la psychophysique du sens tactile ont essayé d'associer chaque unité de mécanorécepteurs à un canal psychophysique, qui est défini dans [Gescheider 2004] comme étant une unité de traitement d'information, expérimentalement déduite, et qui répond de façon unitaire à un stimulus donné.

Ainsi, dans [Verrillo 1968, Verrillo 1969] Verrillo constate, par des mesures de seuils absolus, l'existence d'un comportement dual dans la perception des signaux vibrotactiles en fonction de la fréquence. Il propose donc une théorie basée sur deux canaux psychophysiques : *le canal de Pacini*, lié aux corpuscules Paciniens et responsable de la perception à hautes fréquences, c.à.d. la forme en "U" dans la figure 2.7, et un *canal Non-Pacini*, responsable de la perception à basses fréquences. Ensuite, la présence d'un troisième canal psychophysique, nommé *canal Non-Pacini II* est mise en évidence dans [Gescheider 1985] en réduisant la surface de contact entre la peau et les vibrations tactiles. Quelques années plus tard, l'existence d'un modèle de perception tactile composé de quatre canaux psychophysiques (le canal de Pacini – P et trois canaux Non-Paciniens – NP I, II, III) est montrée dans [Bolanowski 1988]. Le modèle proposé par Bolanowski *et al.* est connu sous le nom de *la théorie des quatre canaux*. Ce modèle propose une représentation psychophysique *complète* de la perception tactile et il est encore très utilisé de nos jours.

Dans la théorie des quatre canaux, chaque canal psychophysique est associé à un des quatre types de mécanorécepteurs de la peau (voir section 2.4.1), comme indiqué dans le Tableau 2.2. Cette correspondance complète entre les unités anatomiques de la peau et les canaux permet une sorte d'abstraction de l'information vers un niveau où elle est plus facile à comprendre, permettant ainsi le développement d'expériences et mesures psychophysiques pour concevoir des signaux tactiles.

Les descriptions des canaux psychophysiques de la peau sont synthétisées dans le Tableau 2.2 selon les critères suivants : type de mécanorécepteurs associé, gamme de fréquences, taux d'adaptation au stimulus (voir section 2.4.1), surface de contact nécessaire à l'activation, sommation temporelle et spatiale (voir section 2.4.6) et la sensation créée.

Notons que parmi ces critères, seulement deux gouvernent l'activation des canaux : la sensibilité en fréquence et la surface de contact. Dans le contexte de ces travaux, relatifs aux interfaces tactiles activées par l'appui du doigt, la zone de contact entre la peau et la source de vibrations est représentée par la surface de l'ellipse du bout du doigt. La valeur approximative de cette surface est de $2 \text{ cm}^2 - 3 \text{ cm}^2$. Donc l'activation du canal NP II, qui nécessite des surfaces de contact de l'ordre de 0.01 cm^2 (voir Tableau 2.2), n'est pas possible à travers les interfaces haptiques qui nous intéressent.

En ce qui concerne la réponse en fréquence, les seuils de détection *déplacement-fréquence* sont présentés dans la figure 2.10 pour chaque canal psychophysique. Nous pouvons donc constater que le canal NP III est dominant dans la gamme des très basses fréquences, c.à.d. 0.3 Hz–10 Hz. Étant donné que cette bande de fréquence n'est pas envisageable dans les cockpits automobiles ou aéronautiques (à cause des effets de masquage des vibrations environnementales), nous ne considérerons pas dans la suite l'activation du canal NP III.

Compte tenu de ce qui précède, nous considérons que la perception des signaux vibrotactiles issus des interfaces haptiques est uniquement le résultat de l'activation du canal Pacinien (P) et Non-Pacinien I (NP I). En conséquence, dans les sections suivantes, ces deux canaux sont analysés plus en détails pour déterminer les variables qui reflètent au mieux leur activation individuelle mais aussi leur couplage.

2.4.6 Le canal de Pacini et l'intégration neuronale de stimuli temporels

Comme nous pouvons le voir dans la figure 2.10, le canal de Pacini est le plus sensible parmi les quatre et il opère dans la plage [40 Hz, 800 Hz]. Son pic de sensibilité se confond avec le pic de sensibilité globale du sens tactile (voir figure 2.7), c.à.d. autour de 250 Hz.

Outre cette sensibilité supérieure, le canal de Pacini est le seul à posséder des capacités de sommation temporelle ou spatiale [Gescheider 2004], comme indiqué dans le Tableau 2.2. Vu que ces deux propriétés du canal P, que nous ne trouvons pas dans les autres canaux, vont s'avérer très importantes pour comprendre le fonctionnement de ce canal, nous les présentons ci-après.

La sommation spatiale, dans un contexte psychophysique, est le phénomène caractérisé par une augmentation de l'activité neuronale avec l'expansion spatiale du stimulus. Cela

⁶Les acronymes utilisés dérivent de l'anglais : *Rapidly Adapting (RA)* et *Slowly Adapting (SA)*.

TABLE 2.2 – Caractéristiques des quatre canaux psychophysiques de la peau. Synthèse des travaux de [Bolanowski 1988, Gescheider 1999, Gescheider 2004, McGlone 2010].

	P	NP I	NP II	NP III
Mécanorécepteur Associé	Corpuscules de Pacini	Corpuscules de Meisner	Terminaisons de Ruffini	Disques de Merkel
Réponse en Fréquence	40 Hz–800 Hz	10 Hz–100 Hz	15 Hz–400 Hz	0.3 Hz–100 Hz
Adaptation au Stimulus⁶	Rapide (RA I)	Rapide (RA II)	Lente (SA II)	Lente (SA I)
Surface Contact	$\sim 3 \text{ cm}^2$	$\sim 3 \text{ cm}^2$	$\sim 0.01 \text{ cm}^2$	$\sim 3 \text{ cm}^2$
Sommation Temporelle	Oui	Non	Non	Non
Sommation Spatiale	Oui	Non	–	Non
Sensation Créée	Vibration	Battement	<i>Inconnu</i>	Pression

signifie que l’augmentation de la surface de contact pour les vibrations dans la plage de fréquence du canal P, entraîne un accroissement de la sensation tactile, c.à.d. le même signal transmis par une surface plus large est perçu comme plus intense. Bien qu’importante pour déterminer l’activation du canal P, cette propriété n’influence pas la perception *relative* des signaux vibrotactiles dans le contexte des interfaces tactiles car une surface identique de contact est utilisée pour percevoir les stimuli, c.à.d. le bout du doigt.

De manière analogue, *la sommation temporelle* est le phénomène psychophysique caractérisé par une augmentation de l’activité neuronale avec l’augmentation de la durée physique du stimulus⁷. Vu que la durée physique est un paramètre important pour la conception des signaux vibrotactiles, comme indiqué dans la section 2.3.2, on s’attend à ce que des durées différentes entraînent des sommations temporelles différentes et donc induisent des sensations tactiles différentes.

Comme illustré dans le Tableau 2.2, un consensus existe dans la littérature sur le fait que le canal P est capable de sommation temporelle. Ainsi, dans [Gescheider 1999] les auteurs montrent que le canal P présente une “intégration quasi-parfaite de l’énergie du stimulus” au fil du temps, pour des signaux vibrotactiles mono-fréquence à 250 Hz. Cette intégration est illustrée par le fait que l’énergie nécessaire pour la détection de deux impulsions présentées après un intervalle de 13 ms est la moitié de l’énergie nécessaire pour la détection d’une impulsion unique. Dans la figure 2.11 nous pouvons voir le décalage du seuil de détection pour deux et pour quatre impulsions mono-fréquence dans la gamme du canal P, en fonction du temps entre les impulsions. Ainsi, nous pouvons remarquer que si le temps entre les impulsions se rapproche de zéro (les paires de points à l’extrême gauche

⁷Notons que la durée n’est pas liée qu’au nombre de période (*rythme*) du signal, mais aussi à la *fréquence* du stimulus : pour un nombre identique de période, une augmentation de la fréquence entraîne une diminution de la durée du signal et *vice-versa*.

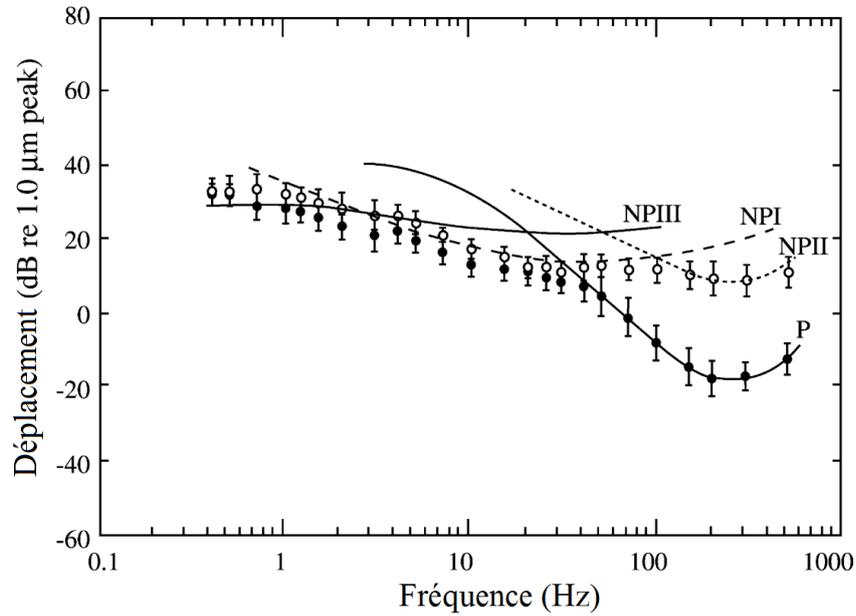


FIGURE 2.10 – Caractéristiques déplacement-fréquence pour les canaux psychophysiques (points noirs – aire de contact grande ; points blancs – aire de contact petite). Graphique extrait depuis [Gescheider 2004].

de l'abscisse), le décalage du seuil de détection est -3 dB pour deux impulsions (moitié de l'énergie) et -6 dB pour quatre impulsions (quart de l'énergie).

La sommation temporelle du canal P est cohérente avec *la théorie de l'intégration neuronale des stimuli temporels* développée par Zwillocki pour le sens auditif [Zwillocki 1960], et qui indique que la réponse neuronale R d'une paire de stimuli séparés par t secondes, avec les réponses neuronales S_1 et S_2 , est :

$$R = S_2 + S_1 e^{-5t} \quad (2.4)$$

Selon 2.4, l'importance de S_1 dans la réponse neuronale R , diminue avec le temps t entre les deux stimuli. Par exemple, pour $t = 0.5$ s l'effet du stimulus S_1 est négligeable :

$$\begin{aligned} R &= S_2 + S_1 e^{-2.5} \\ R &= S_2 + 0.08S_1 \approx S_2 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Le même comportement peut être vu dans la figure 2.11 pour le canal P, obtenu à partir des données expérimentales [Gescheider 1999].

Grâce à la sommation temporelle, le canal P est capable de discriminer les signaux vibrotactiles en fonction de leurs énergies relatives. Ainsi, dans [Bensmaia 2000], les auteurs montrent que la discrimination des signaux vibrotactiles bi-harmoniques avec des compositions de fréquence *similaires*, dans la gamme de sensibilité du canal P, est possible *seulement* sur la base de leur différences d'énergie, et que leurs différences de phase ne sont pas perçues.

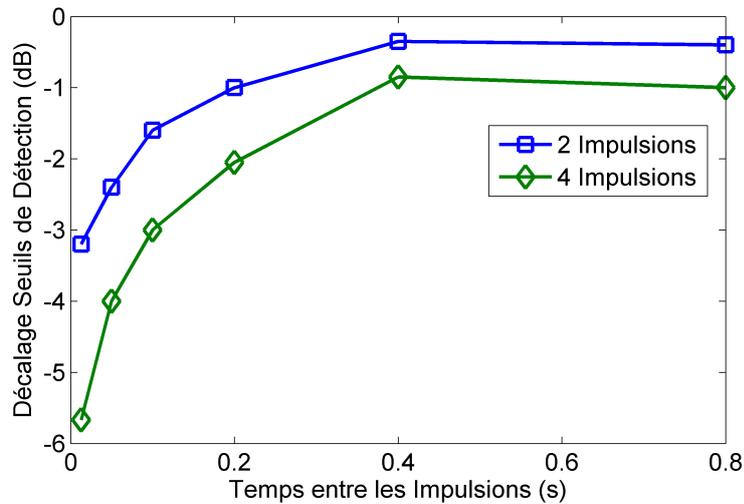


FIGURE 2.11 – Décalage du seuil de détection en fonction du temps pour deux et quatre impulsions mono-fréquence à 250 Hz. Résultats de [Gescheider 1999].

Cependant, des études plus récentes [Bensmaia 2005, Muniak 2007] montrent les limites de l'énergie pour la discrimination de stimuli vibrotactiles dans la gamme de sensibilité du canal P. Ainsi, la dissimilarité perceptuelle entre deux signaux vibrotactiles avec des spectres de fréquence *différents* ne peut pas être prédite *uniquement* sur la base de l'énergie des signaux, même si c'est la principale variable qui l'influence. En conséquence, dans [Bensmaia 2005] il est montré que des stimuli vibrotactiles ayant la même énergie Pacinienne, c.à.d. énergie accumulée dans la gamme de fréquence du canal P, sont discriminés par les utilisateurs de manière fiable sur la base de leur complexité spectrale, e.g. sinusoïdes simples vs signaux bi-harmoniques. Ceci suggère qu'une mesure externe au canal P, fondée sur la complexité spectrale globale des signaux peut être considérée pour résoudre ces ambiguïtés de discrimination.

Sur la base des connaissances sur le canal P que nous venons de présenter, nous considérons que la variable qui reflète le mieux l'activation du canal Pacinien est l'énergie du signal vibrotactile accumulée dans sa gamme de fréquence. Néanmoins, l'importance et le rôle d'une variable supplémentaire représentant la complexité spectrale globale des signaux sont discutés dans la section 2.4.8.

2.4.7 Le canal Non-Pacini I et la vitesse du stimulus

Le canal Non-Pacini I, associé aux corpuscules de Meisner, commande la perception tactile pour des vibrations à basse fréquence ([10 Hz, 100 Hz]), avec un pic de sensibilité dans la gamme 30 – 50 Hz [Gescheider 2004]. Notons qu'un chevauchement non négligeable existe entre les réponses en fréquence des canaux P et NP I. L'intervalle de chevauchement entre les deux canaux est :

$$\left[\min_f \{P^f\}, \max_f \{NPI^f\} \right] \iff [40\text{Hz}, 100\text{Hz}]; \quad (2.6)$$

où P^f et NPI^f sont les ensembles de sensibilité en fréquence pour les canaux P et NP I, respectivement. Étant donné l'équation 2.6, nous avons considéré que la limite entre les deux canaux est :

$$L_{P-NPI} = \frac{\min_f \{P^f\} + \max_f \{NPI^f\}}{2} = 70\text{Hz} \quad (2.7)$$

Contrairement au canal P, le canal NP I ne possède pas de capacité de sommation temporelle ou spatiale. On peut donc supposer que le canal NP I n'encode pas l'énergie du stimulus de la même manière que le canal P. En conséquence, d'autres variables doivent être recherchées afin de refléter l'activation neuronale du canal NP I. Notons que, pour le canal NP I, il n'y a pas un consensus dans la littérature sur la variable qui reflète le mieux son activation.

Ainsi, dans [Looft 1996], l'auteur propose de chercher ces variables parmi les propriétés dynamiques de la vibration, c.à.d. déplacement, vitesse, accélération, et il définit un modèle basé sur leur combinaison linéaire :

$$T = k_1 x(t) + k_2 x^{(1)}(t) + k_3 x^{(2)}(t) + \eta(t) \quad (2.8)$$

$\eta(t) \equiv$ bruit aléatoire

ou T est le seuil requis pour produire la propagation de l'information du canal NP I vers le cortex ; $x(t)$, $x^{(1)}(t)$ et $x^{(2)}(t)$ sont, respectivement, le déplacement, la vitesse et l'accélération de la vibration, k_1, k_2, k_3 représentent la sensibilité du canal aux trois propriétés. Dans la même étude, l'auteur suggère d'utiliser des valeurs positives pour k_1 et k_2 , et $k_3 = 0$, vu que les corpuscules de Meisner ne sont pas sensibles à l'accélération.

Le modèle de Looft a été ensuite raffiné par Bensmaia [Bensmaia 2002], qui propose de prendre en compte uniquement les vitesses positives du stimulus, correspondant à un mouvement de la surface tactile *vers* le doigt.

Compte tenu du fait que la vitesse et le déplacement sont liés par une relation de dérivation, c.à.d. sont interdépendants, afin de simplifier les modèles proposés par Looft et Bensmaia, nous avons considéré uniquement la vitesse positive du stimulus comme principale variable reflétant l'activation neuronale du canal NP I.

La vitesse positive sera ultérieurement (cf. chapitre 3) normalisée par l'énergie délivrée au canal NP I, afin de prendre en compte les contributions relatives des deux canaux, c.à.d. P et NP I, dans une sensation tactile unitaire. Dans les études décrites précédemment, cette étape de normalisation n'est pas réalisée, essentiellement parce que les signaux vibrotactiles utilisés sont choisis tels qu'ils stimulent uniquement le canal NP I. Cependant, dans la suite de ces travaux nous la considérons nécessaire puisque les signaux que nous utilisons activent les canaux P et NP I.

2.4.8 Interaction inter-canaux

Selon la théorie de quatre canaux [Bolanowski 1988], la perception tactile est le résultat de l'activation des canaux psychophysiques de la peau mais aussi de leur interaction. Dans les sections précédentes nous avons étudié les activations des canaux P et NP I de manière séparée.

Après activation, un canal psychophysique transmet l'information sensorielle vers le cortex somatosensoriel. La transmission se fait par la moelle épinière (colonne médiale lemniscus), et avant d'arriver au niveau du cortex, l'information issue de mécanorécepteurs arrive d'abord dans le *thalamus* (voir la figure 2.12). Ici, une première intégration des informations tactiles dans une sensation unitaire est réalisée, du fait que le thalamus a le rôle d'ajustement de l'échelle affective [McGlone 2010]. Après le thalamus, l'information sensorielle est transmise au cortex somatosensoriel primaire et secondaire, c.à.d. *S I* et *S II*. Dans ces deux zones du cerveau, les information vibratoires *brutes* sont transformées en sensations tactiles *conscientes et unitaires* [Forta 2009].

Ainsi, les activations neuronales des canaux psychophysiques sont unifiées et synthétisées dans le thalamus et dans le cortex somatosensoriel. La manière exacte dont cette interaction inter-canaux est réalisée n'est pas encore connue, mais dans [Gescheider 2004] l'hypothèse d'une combinaison linéaire à haut-niveau entre les magnitudes perceptuelles de chaque canal a été étudiée et partiellement confirmée. Ceci indique que les canaux psychophysiques convertissent l'information vibratoire, chacun dans sa bande spectrale, dans une magnitude perceptuelle. Ces magnitudes perceptuelles sont ensuite intégrées par le cortex dans une sensation tactile unitaire.

Les magnitudes perceptuelles individuelles des canaux sont représentées par les variables qui reflètent leur activation neuronale, c.à.d. l'énergie du stimulus pour le canal P et la vitesse positive normalisée pour le canal NP I, comme indiqué dans les sections 2.4.6 et 2.4.7. Toutefois, dans l'idée de modéliser une sensation tactile unitaire, nous proposons l'ajout d'une troisième variable proportionnelle à la complexité spectrale *globale* des signaux, comme nous l'avons déjà mentionné dans 2.4.6. En conséquence, ce paramètre couvre la plage de fréquence des deux canaux, et peut être considéré comme une variable *compensatrice et complémentaire* qui reflète le *couplage* entre les deux canaux.

2.4.9 Synthèse sur le sens tactile

L'étude psychophysique du sens tactile a permis de mieux comprendre comment les caractéristiques physiques des vibrations, à savoir fréquence, durée, surface de contact, etc., sont prises en compte par les mécanorécepteurs ou par les canaux psychophysiques dans un ensemble d'informations abstraites. Comme présenté dans la section 2.4.5 le duo fréquence–surface de contact commande l'activation de chaque canal. Sur la base de ces deux critères, nous avons mis en évidence que, dans le cas de signaux vibrotactiles issus d'une interface haptique, les seuls canaux potentiellement activés sont les canaux P et NP I.

Pour modéliser les informations acheminées par ces canaux nous avons retenu l'énergie du stimulus au cours du temps pour le canal Pacini et la vitesse positive normalisée pour le canal Non-Pacini I. Nous proposons aussi de compléter ces deux variables par une

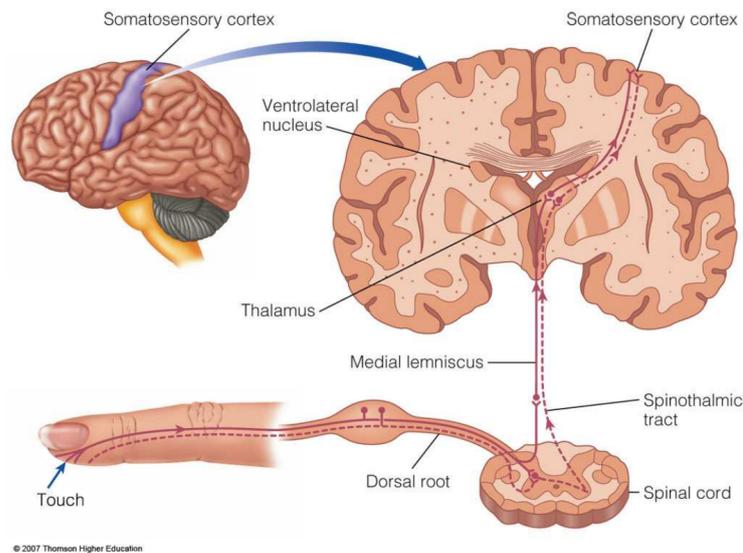


FIGURE 2.12 – Transmission des information tactiles (ligne continue) et de douleur (ligne pointillée) à partir du doigt vers le cortex somatosensoriel. Source de l'image : http://courses.washington.edu/psy333/lecture_pdfs/Week10_Day2.pdf

variables globale, de couplage, décrivant la complexité spectrale de la vibration. Ce schéma est représenté dans la figure 2.13, et basé sur l'hypothèse que les trois variables sont fusionnées et intégrées au niveau du cortex somatosensoriel pour produire une sensation tactile unitaire de la vibration.

Notons également que, comme discuté dans la section 2.4.3, l'énergie du signal vibrotactile étant assimilée à une mesure de magnitude physique, elle doit se conformer à la loi de Stevens, ce qui signifie qu'elle est transformée, selon l'équation 2.3, en magnitude perceptuelle.

Dans les sections suivantes nous allons introduire des techniques adéquates pour extraire ces trois variables à partir du signal d'accélération ainsi qu'un aperçu sur les méthodes de type *computational intelligence* qui pourraient être utilisées pour reproduire le mécanisme d'intégration de ces variables dans une sensation unitaire.

2.5 Analyse Temps-Fréquence de Signaux Vibrotactiles

Comme indiqué dans les sections 2.4.2 et 2.4.5, la gamme de fréquence des signaux vibrotactiles contrôle l'activation des différents canaux de la peau, ainsi que plusieurs aspects perceptuels, tel que la liaison amplitude-fréquence, les contours des sensations égales, etc.. En dehors de la fréquence, les sensations tactiles sont aussi sensibles à l'effet de la durée du stimulus, qui contrôle les aspects de sommation temporelle, particulièrement pour le canal Pacinien.

En effet, comme présenté dans la section 2.4.6, le canal P intègre l'énergie des stimuli au cours du *temps*, dans sa plage de *fréquences*. Cela suggère qu'une technique d'analyse

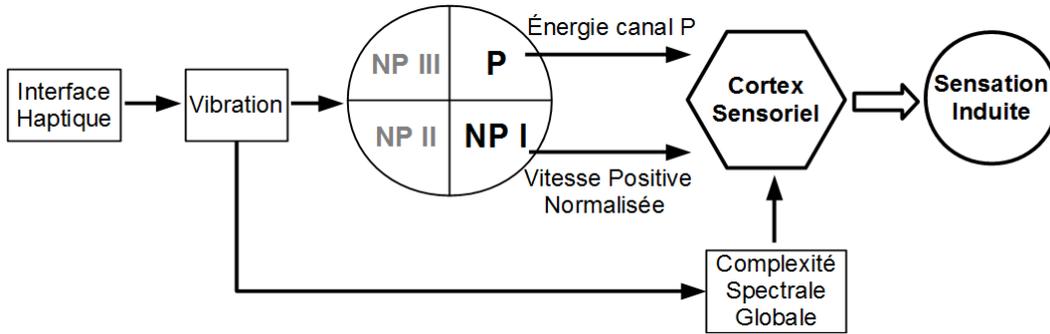


FIGURE 2.13 – Synoptique du sens tactile, avec les trois variables intégrées dans le cortex somatosensoriel pour produire une sensation tactile unitaire.

temps-fréquence pourrait être utilisée afin de déterminer la quantité d'énergie délivrée au canal P. C'est pourquoi nous présentons ci-après les techniques les plus communes pour l'analyse temps-fréquence des signaux.

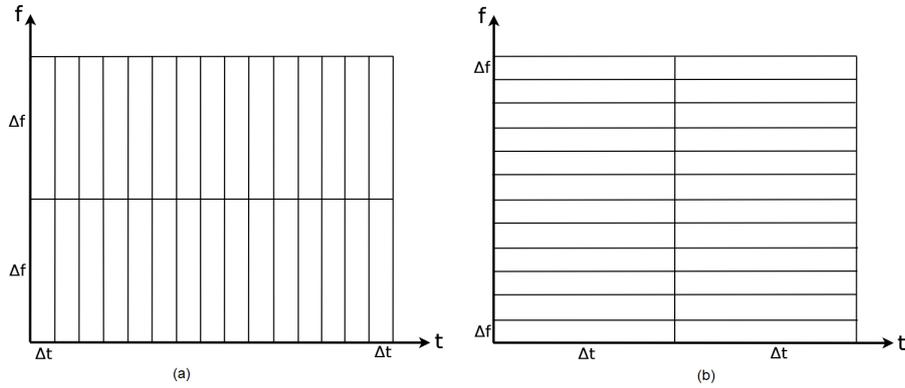
2.5.1 La Transformée de Fourier à Court Terme

La transformée de Fourier standard permet de retrouver la décomposition fréquentielle pour un signal exprimé dans le domaine temporel. Dans une telle représentation, la localisation en fréquence est optimale et on peut donc retrouver l'information contenue dans le signal à une fréquence donnée avec une précision maximale. Cependant, la transformée de Fourier ne permet pas de retrouver facilement l'information sur l'instant où les événements ont eu lieu. Pour cette raison, la transformée de Fourier n'est pas adaptée à l'étude des signaux vibrotactiles où l'information fréquentielle doit être accompagnée par une information temporelle complémentaire.

Afin de pallier cet inconvénient, une extension de la transformée de Fourier standard, appelée *transformée de Fourier à court terme (TFCT)* a été introduite par Gabor dans [Gabor 1946]. Elle consiste à diviser le signal à analyser en plusieurs tranches temporelles et à appliquer la transformée de Fourier classique sur chaque tranche. La division du signal est réalisée par multiplication avec une fenêtre glissante h qui est appliquée au long du signal. Cela permet d'obtenir une représentation *temps-fréquence* du signal. L'hypothèse qui sous-tend cette technique est que, dans chaque tranche, le signal est considéré comme stationnaire. Ainsi, la TFCT d'un signal $x(\tau)$ est [Rioul 1992] :

$$TFCT_{x(\tau)}(f, t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h^*(\tau - t)e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (2.9)$$

Si la TFCT permet de décrire le contenu fréquentiel en fonction du temps, la précision de la localisation des événements dans l'espace temps-fréquence est limitée. En effet, on ne peut pas avoir une très bonne résolution dans le domaine temporel (Δt) et dans le domaine fréquentiel (Δf), puisque leur produit est borné inférieurement selon le principe d'incertitude de Heisenberg [Rioul 1991] :

FIGURE 2.14 – Résolutions temps-fréquence de la TFCT pour : a) n grand ; b) n petit.

$$\Delta t \Delta f \geq \frac{1}{4\pi} \quad (2.10)$$

Les deux résolutions définies ci-dessus dépendent strictement du choix de la fenêtre, c.à.d. le type et la longueur. Dans [Gabor 1946] il est démontré que la condition d'égalité dans 2.10 est satisfaite pour une fenêtre Gaussienne, qui présente le meilleur compromis entre les compacités en temps et en fréquence. Dans la littérature, ce cas particulier de la TFCT est généralement appelé *transformée de Gabor (GT)*, définie comme suit [Szmajda 2010] :

$$GT_{x(\tau)}(f, t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\tau-t}{\sigma}\right)^2} e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (2.11)$$

Cependant, d'autres types de fenêtres peuvent être utilisées si elles offrent des bonnes propriétés pour une application donnée, tels que Hanning, Hamming, Blackman, etc.. Une fois le type de fenêtre choisi, il ne reste qu'à définir sa longueur, qui est généralement proportionnelle à la durée du signal :

$$W_L = \frac{N}{n} \quad (2.12)$$

où N est le nombre d'échantillons du signal, et n est un paramètre d'équilibre entre Δt et Δf . Une valeur élevée pour n , c.à.d. fenêtres courtes, offre une bonne résolution temporelle, mais une mauvaise résolution en fréquence (voir figure 2.14.a), et une valeur petite pour n , c.à.d. fenêtres longues, offre une bonne résolution en fréquence, mais une mauvaise résolution en temps (voir figure 2.14.b). En pratique, le choix de n est un compromis entre Δt et Δf , afin d'obtenir une résolution *moyenne* pour les deux. Une fois n choisi, les deux résolutions, Δt et Δf , restent *fixes* pour tout l'espace temps-fréquence, puisque *la même* fenêtre est utilisée à chaque fois [Rioul 1991], comme nous pouvons le voir dans la figure 2.14.

De manière analogue avec la transformée de Fourier, le carré du module de la TFCT représente la distribution de l'énergie du signal dans l'espace temps-fréquence, c.à.d. *spectrogramme*. Il peut être démontré que la TFCT préserve l'énergie du signal [Rioul 1992] :

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |TFCT_x(f, t)|^2 df dt \quad (2.13)$$

si $\|h(t)\|^2 = 1$ (pour plus d'informations voir [Vetterli 1995]).

Les spectrogrammes d'un signal synthétique composé de cinq modes Gaussiens, dont deux sont proches en temps et deux en fréquence, sont représentées dans la figure 2.15 pour une fonction de pondération de Hamming et différentes valeurs du paramètre n . Les deux spectrogrammes du haut représentent les cas extrêmes pour la longueur de la fenêtre et les deux du bas les cas de compromis entre Δt et Δf . Remarquons que aucune représentation ne réussit pas à bien délimiter en temps et en fréquence *simultanément* tous les modes.

Nous pouvons déjà constater les deux défauts majeurs de la TFCT : a) la difficulté de choisir une bonne valeur pour le paramètre n , c.à.d. la longueur de la fenêtre d'analyse, et b) la résolution fixe pour tout l'espace temps-fréquence, qui ne permet pas de bien délimiter le contenu en fréquence et en temps simultanément.

Une alternative à la TFCT qui offre une meilleure résolution temps-fréquence est la distribution de Wigner-Ville (et ses variantes) que nous présentons ci-après.

2.5.2 La Distribution de Wigner-Ville

La résolution temps-fréquence *fixe et faible* de la TFCT limite son applicabilité dans le contexte des signaux vibrotactiles. Une décomposition quadratique, directement dans l'espace de l'énergie du signal, pourrait être utilisée afin d'améliorer la résolution *jointe* temps-fréquence de la représentation. Ces approches qui décomposent l'énergie du signal dans l'espace temps-fréquence sont communément dénommées *représentations temps-fréquence quadratiques*. Un sous-ensemble restreint de représentations quadratiques qui présentent les propriétés d'invariance en temps et en fréquence s'inscrivent dans une catégorie spéciale, appelée *classe de Cohen* [Cohen 1989]⁸. Une étude approfondie sur les distributions de la classe de Cohen et sur les représentations quadratiques en générale est disponible dans [Hlawatsch 1992].

Parmi les membres de la classe de Cohen se distingue la distribution de Wigner-Ville, qui a ses origines dans les travaux de Wigner dans le domaine de la mécanique quantique, et qui a été ensuite *transférée* dans le domaine du traitement du signal par Ville [Jaffard 2001]. Ainsi, la distribution de Wigner-Ville (DWV) d'un signal $x(t)$ est [Boashash 1988] :

$$DWV_{x(t)}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} z\left(t + \frac{\tau}{2}\right) z^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (2.14)$$

où $z(t)$ est le signal *analytique* associé à $x(t)$:

$$z(t) = x(t) + jH[x(t)]; \quad (2.15)$$

et $H[x(t)]$ est la transformée de Hilbert de $x(t)$, définie comme suit [Staszewski 1997] :

$$H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2.16)$$

⁸Notons que la spectrogramme, c.à.d. le module carré de la TFCT, fait partie aussi de la classe de Cohen, puisque elle satisfait les propriétés d'invariance en temps et en fréquence [Hlawatsch 1992]. Néanmoins elle présente une faible résolution temps-fréquence par rapport à d'autres membres de la classe.

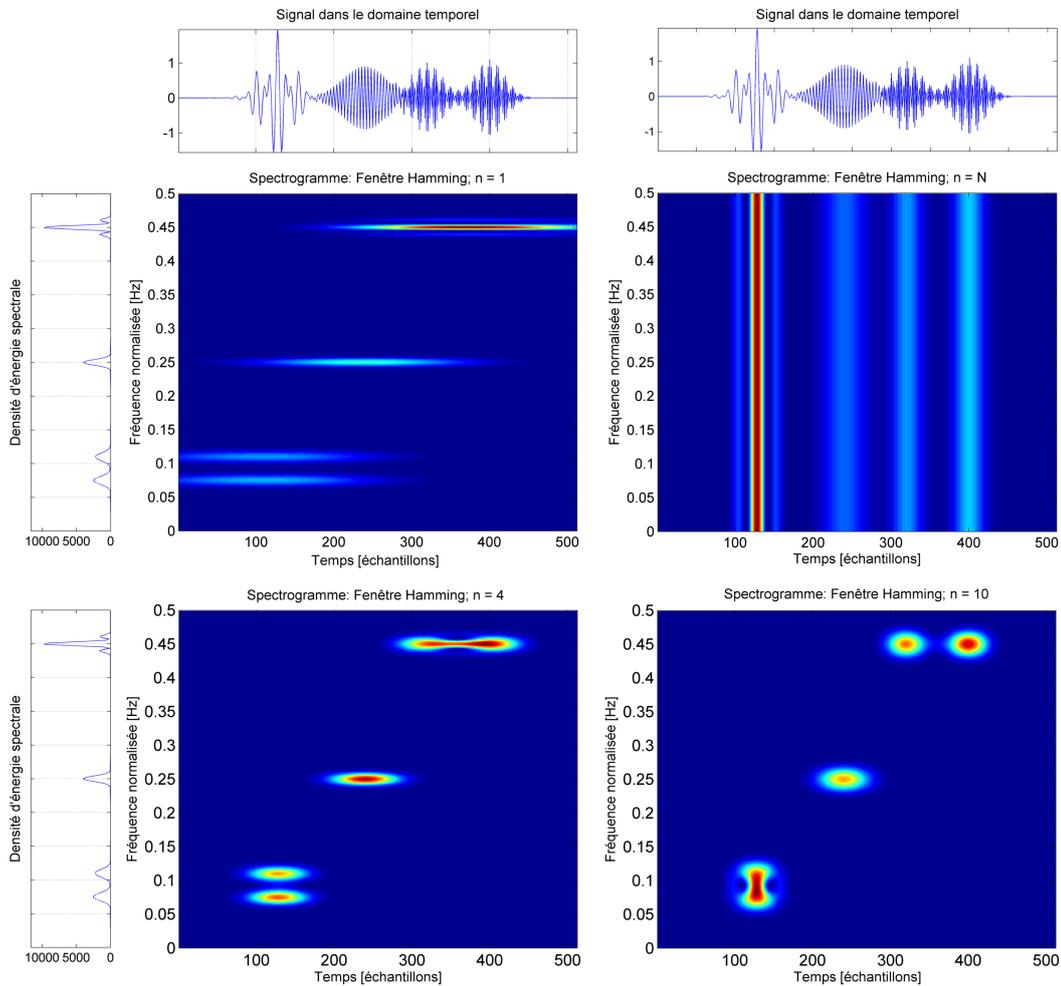


FIGURE 2.15 – Spectrogrammes d’un signal synthétique composé de cinq modes Gaussiens pour différentes valeurs de n . *En haut à gauche* : $n = 1$, résolution en fréquence maximale mais résolution temporelle mauvaise ; *En haut à droite* : $n = N$, résolution temporelle maximale mais résolution en fréquence mauvaise ; *En bas à gauche* : $n = 4$, les modes proches en fréquence sont bien délimités, mais pas les modes proches temporellement ; *En bas à droite* : $n = 10$, les modes proches temporellement sont bien délimités, mais pas les modes proches en fréquence ; Représentations obtenues avec la *Toolbox Temps-Fréquence* de Matlab [Auger 1996]. Le code couleur est le suivant : faible énergie en bleu foncé ; haute énergie en rouge foncé.

où l'intégrale est considérée en valeur principale.

Exprimée en fréquence, l'équation 2.15 devient l'équation 2.17 [Boashash 1988], ce qui définit le signal analytique comme étant un signal qui ne contient pas d'information pour des fréquences négatives.

$$Z(f) = \begin{cases} 2X(f) & f > 0 \\ X(f) & f = 0 \\ 0 & f < 0 \end{cases} \quad (2.17)$$

Telle que définie par l'équation 2.14 la DWV est le membre principal de la classe de Cohen. En effet, toutes les autres distributions peuvent être obtenues à partir de la DWV par des opérations de corrélation [Rioul 1992]. Ainsi, elle satisfait un grand nombre de propriétés théoriques utiles (voir [Hlawatsch 1992]).

Bien qu'intéressantes, ce ne sont pas ces propriétés mathématiques qui incitent à utiliser la DWV plutôt que la TFCT ou la GT, mais sa résolution temps-fréquence supérieure, qui permet une excellente concentration de l'énergie dans l'espace temps-fréquence [Hlawatsch 1992, Szmajda 2010]. Cependant, la nature quadratique de la DWV entraîne des interférences dans l'espace temps-fréquence pour les signaux avec plusieurs composants ou avec modulation non-linéaire en fréquence [Hlawatsch 1992].

Une comparaison entre les représentations énergétiques temps-fréquence obtenues avec le spectrogramme (équation 2.13) et la DWV (équation 2.14) pour des signaux modulés linéairement et non-linéairement en fréquence est illustrée dans la figure 2.16. Nous pouvons ainsi constater que pour le signal modulé linéairement en fréquence la DWV offre une résolution optimale et une représentation quasi-ponctuelle de l'énergie, par rapport à la représentation plus grossière du spectrogramme. Néanmoins, pour le signal modulé non-linéairement en fréquence, les effets d'interférence de la DWV sont facilement visibles, ce qui limite la lisibilité, la clarté et l'utilité de la représentation DWV. Afin de réduire les interférences de la DWV, le signal pourrait être multiplié, dans le domaine temporel, par une fonction fenêtre $h(\tau)$, créant ainsi une version à court terme de la DWV par analogie avec la TFCT, appelé *pseudo distribution de Wigner-Ville (PDWV)* [Flandrin 1998]. La PDWV d'un signal analytique $z(t)$ est [Gonçalves 1998] :

$$PDWV_{z(t)}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) z\left(t + \frac{\tau}{2}\right) z^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (2.18)$$

L'équation 2.18 peut être vue comme une version lissée de la DWV qui supprime dans une certaine mesure les interférences dans la direction de la fréquence [Gonçalves 1998]. Les interférences qui oscillent dans la direction temporelle peuvent être aussi supprimées par convolution avec une fonction passe-bas q . Ainsi, nous obtenons la *pseudo distribution de Wigner-Ville lissée (SPDWV)*⁹ [Gonçalves 1998] :

$$SPDWV_{z(t)}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} q(u-t) \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) z\left(u + \frac{\tau}{2}\right) z^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau du \quad (2.19)$$

⁹Ang. : Smooth Pseudo Wigner-Ville Distribution

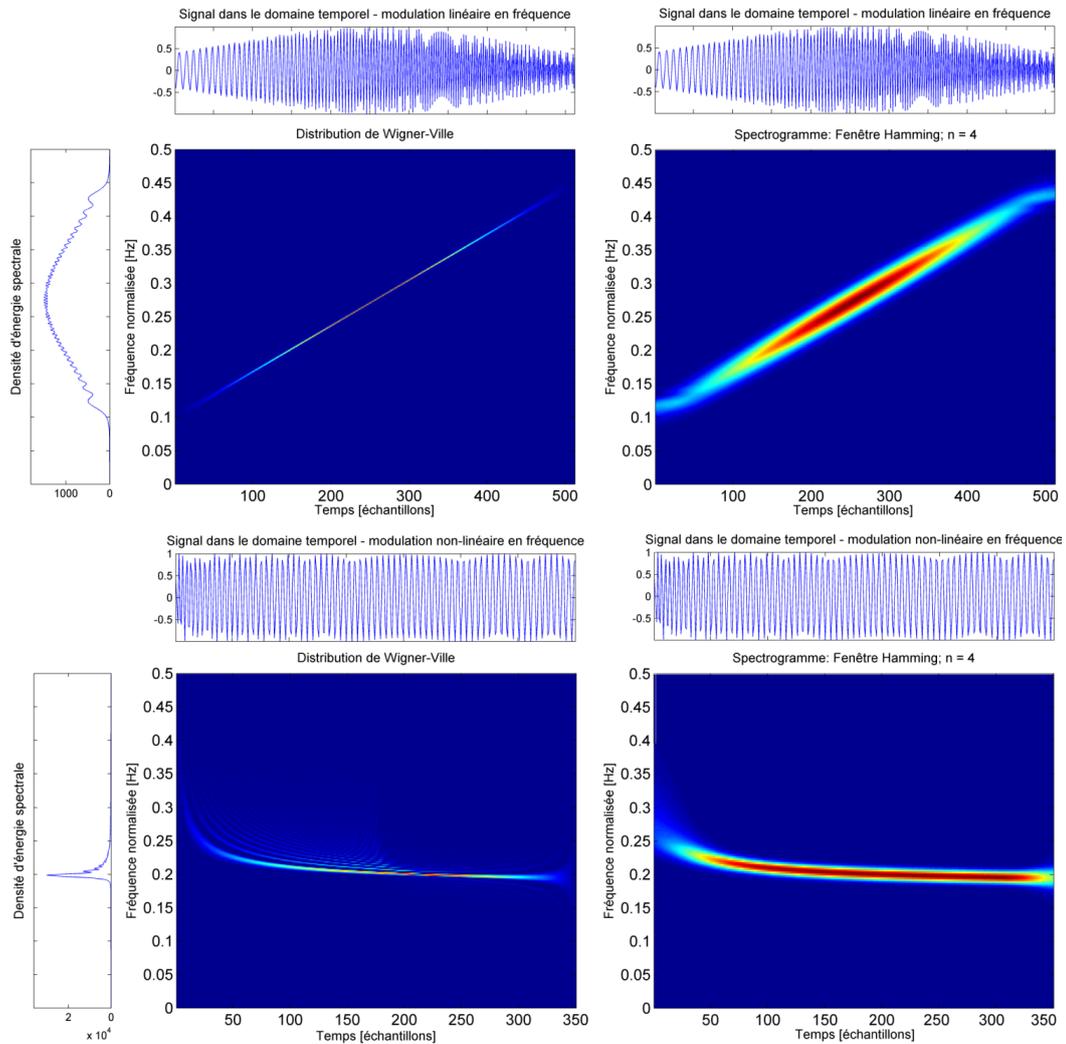


FIGURE 2.16 – Comparaison entre les spectrogrammes et les DWV pour un signal modulé en fréquence linéairement (haut) et un signal modulé en fréquence non-linéairement (bas). Représentations obtenues avec la *Toolbox Temps-Fréquence* de Matlab [Auger 1996].

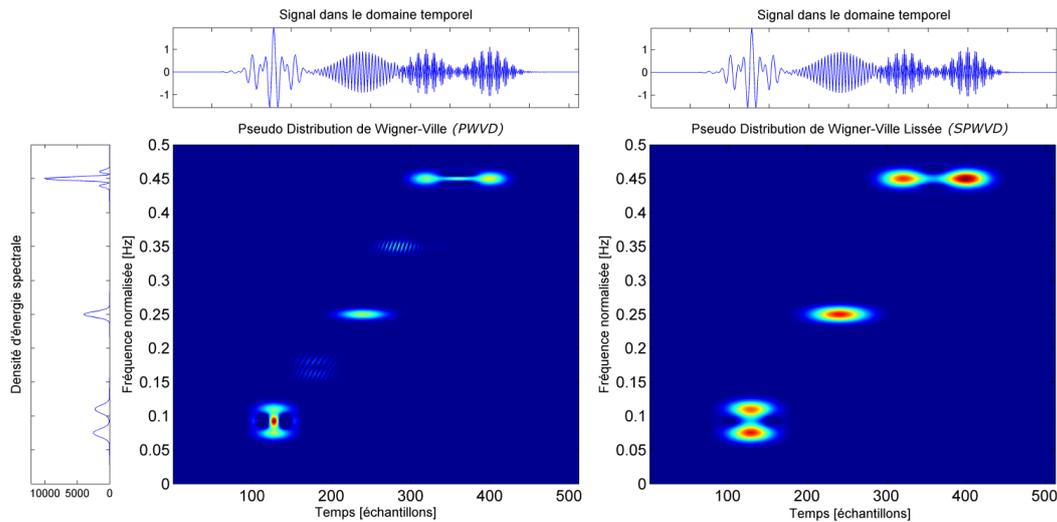


FIGURE 2.17 – Représentations PDWV et SPDWV pour le signal synthétique avec cinq modes gaussiens utilisé aussi dans la figure 2.15. Les noyaux considérés sont des fonctions fenêtre de type *Hamming*. Illustrations obtenues avec la *Toolbox Temps-Fréquence* de Matlab [Auger 1996].

Le lissage temps-fréquence avec des noyaux *séparés*, c.à.d. h et q , permet d’ajuster les résolutions en temps, c.à.d. Δt , et en fréquence, c.à.d. Δf , de manière indépendante, et donc offre une flexibilité supérieure par rapport à la TFCT [Hlawatsch 1992]. Cependant, ce lissage, bien qu’il mène à la suppression des interférences (voir la figure 2.17), conduit aussi à une perte de résolution ou de précision dans la localisation des patterns d’énergie [Staszewski 1997, Hlawatsch 1992] et donc un compromis entre le niveau des interférences et la résolution temps-fréquence doit être fait. Finalement, notons qu’une transition progressive peut être établie entre la TFCT, c.à.d. spectrogramme, et la DWV, comme montré dans [Stankovic 2014]. Cette transition vise à trouver également le meilleur compromis entre la concentration de l’énergie, c.à.d. résolution, et la présence des interférences.

2.5.3 Représentations Temps-Échelle

Dans le cadre des signaux vibrotactiles, une résolution faible et fixe, pour la TFCT, et pour la SPDWV un compromis entre les interférences quadratiques et la résolution de la représentation, limitent la précision et l’interprétabilité des résultats. Pour améliorer ces points, nous proposons de considérer une représentation des signaux dans l’espace temps-échelle par la *transformée en ondelettes continue (TOC)*¹⁰. La différence fondamentale par rapport aux deux autres méthodes réside dans le fait que la TOC décompose le signal à l’aide d’une fonction d’énergie finie, qui oscille dans le domaine temporel, appelée *ondelette*. La représentation temps-échelle est ainsi obtenue en balayant la fonction ondelette le long du signal (de manière analogue avec les fonctions fenêtres pour la TFCT et la DWV), *mais*,

¹⁰Ang. – Continuous Wavelet Transform

l'échelle de l'ondelette change après chaque balayage du signal.

Dans cette sous-section, nous nous limitons à souligner les principales différences de la TOC par rapport à la TFTC et la DWV, différences qui justifient notre choix dans le contexte de nos travaux (le détail de nos développements avec la TOC sera présenté dans le chapitre 3). La TOC repose sur une représentation linéaire. Elle ne présente pas l'inconvénient des interférences quadratiques et offre généralement des représentations très lisibles [Farge 1992, Bouchikhi 2011]. D'autre part, grâce à la flexibilité des atomes temps-fréquence, la TOC offre une meilleure localisation des patterns d'énergie que la TFTC. Ainsi, grâce à ces avantages, dans le cas des signaux auditifs, la TOC s'est révélée offrir simultanément une bonne résolution des représentations, c.à.d. une bonne précision, et une bonne atténuation des interférences, c.à.d. une bonne lisibilité [Tognola 1997].

Un autre avantage de la TOC est la flexibilité conférée par le choix de l'ondelette. En effet, pour calculer la TOC d'un signal, nous avons la liberté de choisir, parmi un nombre potentiellement infini d'ondelettes, celle qui correspond le mieux au signal considéré. Par ailleurs, dans le cas où plusieurs représentations TOC doivent être comparées entre elles, la fonction ondelette joue aussi le rôle de *référence*.

Compte tenu de ces caractéristiques, la TOC nous paraît ainsi mieux adaptée pour faire l'analyse des patterns vibrotactiles dans le chapitre 3.

2.6 Aperçu des techniques de *Computational Intelligence*

2.6.1 Computational Intelligence et Soft Computing

Comme nous l'avons vu tout au long de la section 2.4, la perception tactile est un processus complexe, décrit par plusieurs variables en interaction, et qui a ses racines dans le cortex somatosensoriel. En essayant de modéliser un tel phénomène, nous sommes confrontés au principe de l'incompatibilité, énoncé par Lotfi A. Zadeh dans [Zadeh 1975a], affirmant que "entre la complexité d'un système et la précision avec laquelle il peut être analysé, il existe une relation approximativement inverse". Ce que Zadeh voulait dire, c'est qu'il est futile de chercher des solutions *exactes* à un problème complexe et qu'on devrait plutôt essayer des méthodes approximatives, capables de généraliser et abstraire la connaissance, et qui tolèrent la présence d'un certain degré d'*imprécision*.

Nous pouvons constater que la description ci-dessus correspond assez bien à la définition d'un *système intelligent*. C'est sur ces bases et avec le développement des unités de calcul qu'un ensemble de techniques essayant de se rapprocher de ce *desideratum*, c.à.d. émuler l'intelligence naturelle, sont apparues sous le terme générique de *computational intelligence*. L'intelligence présumée de ces techniques est vue en antithèse avec les méthodes *brute-force* qui ne comptent que sur la puissance de calcul pour résoudre un problème.

En conséquence, d'après [Engelbrecht 2007], les méthodes de type *computational intelligence* (CI) comprennent : les réseaux de neurones artificiels, les systèmes flous, les algorithmes évolutionnaires, les systèmes immunitaires artificiels et les méthodes basées sur l'intelligence collective (Ang. – Swarm Intelligence). Notons aussi que toutes les méthodes hybrides, obtenues par la fusion de deux ou plusieurs paradigmes de CI sont aussi considérées comme des méthodes de CI.

Étroitement lié avec le concept de CI, nous retrouvons le concept de *soft computing* (SC), introduit par Zadeh dans [Zadeh 1994] en contraste avec les techniques classiques de *hard computing* (HC) qui mettent l'accent sur "la précision, la certitude et la rigueur" [Zadeh 1994], et qui visent à trouver des modèles *précis*. Le point de départ de Zadeh est que la précision recherchée par les techniques HC est souvent trop coûteuse, en termes de temps et puissance de calcul, et que des méthodes plus souples, qui visent à trouver des modèles *approximatifs*, doivent être utilisées afin d'exploiter la tolérance à l'imprécision et à l'incertitude [Zadeh 1994].

Ainsi, Zadeh divise les techniques SC en trois catégories selon leur principal intérêt [Zadeh 1994] : réseaux de neurones, concernés par *l'apprentissage*, la logique floue, concernée par *l'imprécision* et le raisonnement probabiliste, concerné par *l'incertitude*. Dans la dernière catégorie, il discerne principalement les fonctions de croyance et les algorithmes génétiques. Une vue d'ensemble sur les différentes techniques SC et leurs combinaisons est présentée dans [Bonissone 1997].

En conséquence, les techniques mentionnées ci-dessus, qui sont toutes inspirées du comportement humain, nous paraissent envisageables pour modéliser la perception de patterns vibrotactiles par l'être humain. C'est pourquoi nous présenterons ci-après les trois principales méthodes situées à l'intersection entre le CI et le SC : les algorithmes évolutionnaires et génétiques, les réseaux de neurones, et la logique floue.

2.6.2 Algorithmes génétiques

Inspirés par l'évolution des organismes vivants, les algorithmes évolutionnaires (AE) sont des méthodes stochastiques, c.à.d. non-déterministes, employées pour la recherche d'une solution optimale à un problème dans un espace de solutions possibles [Engelbrecht 2007]. Plusieurs classes d'AE qui traitent de cette problématique en imitant la procédure d'évolution naturelle, c.à.d. Darwinienne, ont été proposées dans la littérature (pour une étude complète voir [Engelbrecht 2007]). Les trois classes qui ont suscité le plus grand intérêt dans la communauté sont : *les stratégies évolutives* (SE), généralement utilisées pour l'optimisation des fonctions continues, les techniques de *programmation évolutionnaire* (PE), originellement conçues pour l'évolution d'automates à états finis puis modifiées pour traiter des nombres réels [Jones 1998] et *les algorithmes génétiques* (AG) inspirés par les systèmes adaptatifs recevant des stimuli sensoriels binaires de l'environnement [Bäck 1993]. Étant donnée la similarité méthodologique et terminologique entre les trois techniques mentionnées, nous ne présenterons dans cette section qu'un bref aperçu sur les AG. Le lecteur intéressé peut se reporter à [Engelbrecht 2007] pour plus de détails sur les autres méthodes.

Les éléments constitutifs des AG sont [Mitchell 1998] :

- une population de *chromosomes*, c.à.d. solutions possibles pour le problème considéré ; plusieurs types de codage peuvent être utilisés pour représenter les chromosomes, tels que un codage binaire par des suites de 1 et des 0, et codage réel où les chromosomes sont vus comme des tableaux de nombres réels ; ainsi les AG sont capables de résoudre des problèmes booléens ou continus ;
- la fonction de *fitness* : associe un score numérique pour chaque chromosome de

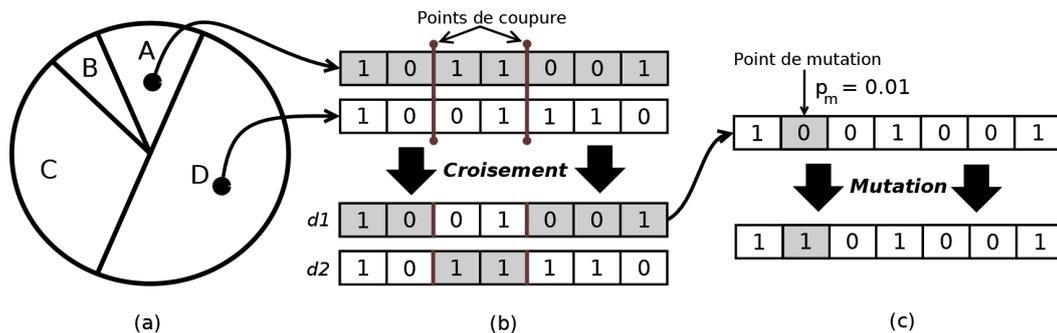


FIGURE 2.18 – Illustration des opérateurs génétiques pour un codage binaire de chromosomes. a) *Sélection par roulette* : la probabilité qu'un chromosome soit retenu augmente avec le score qu'il obtient en optimisant la fonction de fitness ; b) *Croisement* avec deux points de coupure pour les chromosomes retenus par la sélection ; deux descendants, c.à.d. $d1$ et $d2$, sont créés par le croisement des parents ; c) *Mutation* d'un bit avec probabilité $p_m = 0.01$ pour un des descendants.

la population ; dans le contexte de l'optimisation, elle est généralement égale à la fonction à minimiser, e.g. l'erreur du système ; les chromosomes pour lesquels la fonction de fitness prend les valeurs les plus faibles sont ainsi considérés comme les meilleurs¹¹ ;

- l'opérateur de *sélection* : mécanisme stochastique imitant la sélection naturelle pour choisir les chromosomes qui peuvent se reproduire, c.à.d. combiner entre eux ; le choix est déterminé par le score des chromosomes, c.à.d. plus le score est élevé, plus la probabilité d'être choisi augmente ; un des premiers algorithmes développés est *la sélection par roulette* (figure 2.18a), mais d'autres algorithmes populaires ont été proposés, e.g. sélection par tournoi, Boltzmann, élitisme, etc. [Mitchell 1998] ;
- l'opérateur de *croisement* : définit le cadre dans lequel les chromosomes sélectionnés vont se reproduire afin d'en créer des nouveaux et, espérons-le, des meilleurs chromosomes ; il existe des techniques de croisement adaptées au codage binaire et réel [Engelbrecht 2007] ; les méthodes de croisement binaires impliquent l'échange de gènes (segments de longueur fixe contenant des bits), entre les parents pour créer les descendants ; les gènes à permuter sont choisis en déterminant aléatoirement un ou plusieurs points de coupure dans les chromosomes ; le croisement binaire par deux points de coupure est illustré dans la figure 2.18b.
- l'opérateur de *mutation* : défini comme un opérateur secondaire pour les AG, il complète le croisement en altérant aléatoirement la structure d'un chromosome afin d'introduire du matériel génétique nouveau dans la population [Engelbrecht 2007], comme le montre la figure 2.18c ; comme le croisement, la mutation est définie pour

¹¹Notons que si la fonction de fitness représente la performance du système plutôt que l'erreur, les meilleurs chromosomes sont ceux qui maximisent cette fonction.

le codage binaire et réel ; la probabilité de mutation est usuellement fixe et très faible, de l'ordre de 0.01 à 0.1 par bit pour le codage binaire ; le rôle de la mutation est de prévenir le blocage de la population dans un endroit de l'espace de recherche [Mitchell 1998] en s'assurant que d'autres zones sont aussi explorées ; ce mécanisme permet ainsi aux AG d'éviter le piège des minima locaux ;

L'itération des étapes illustrées dans la figure 2.18 pour une population donnée de chromosomes est nommée *génération* et généralement les AG sont itérés pour au moins 50 générations [Mitchell 1998]. Après, le chromosome le plus adapté, selon le score obtenu sur la fonction de fitness, est choisi comme la *meilleure solution* pour le problème considéré. Enfin, notons que les AG peuvent être aussi utilisés pour *l'optimisation multi-objectifs*, pour laquelle le but est de trouver la solution optimale à un problème avec plusieurs fonctions de fitness, qui sont souvent contradictoires. Pour une analyse détaillée de ces méthodes voir [Konak 2006].

Les AG et les AE restent en fait *uniquement* des méthodes d'optimisation et sont rarement utilisés pour modéliser un système ou un processus¹². Dans cette catégorie de méthodes, nous rappelons aussi le *recuit simulé* [Kirkpatrick 1983] et les algorithmes basés sur *l'intelligence collective* [Engelbrecht 2007]. Souvent ces méthodes sont employées à un niveau inférieur afin d'ajuster les paramètres pour des techniques plus générales, telles que réseaux de neurones ou systèmes flous.

2.6.3 Réseaux de neurones artificiels

Les réseaux de neurones (RN), constituent une classe de techniques inspirées par le fonctionnement non-linéaire et parallèle du cerveau. Les RN ont été utilisés avec succès pour différentes catégories d'applications [Engelbrecht 2007] : classification, reconnaissance de formes, contrôle, optimisation, approximation et data mining.

Comme mentionné dans la section 2.6.1, les RN sont principalement concernés par l'apprentissage. Ainsi, nous distinguons trois paradigmes d'apprentissage pour les RN [Engelbrecht 2007] :

- apprentissage *supervisé* – le RN est entraîné à partir d'un ensemble de données *étiquetées* entrée-sortie, en minimisant l'erreur de prédiction ou de classification sur l'ensemble des données ; l'exemple le plus connu d'apprentissage supervisé est l'algorithme par *rétropropagation de l'erreur*, décrit en détails dans [Haykin 1999] ;
- apprentissage *non-supervisé* – le RN n'est pas initialisé avec des données étiquetées, et il doit classifier *sans supervision externe* les données d'entrée selon leur similitudes, par un algorithme itératif ; l'exemple classique est la *carte auto adaptative* de Kohonen qui est caractérisée par la constitution, sur un treillis de neurones, d'une carte topographique pour les patterns d'entrée [Haykin 1999] ;

¹²Dans ce manuscrit, par le terme *modèle* nous entendons un système capable de fournir en *sortie* la classification ou la prédiction sur un paramètre donné pour les stimuli présentés en *entrée*, e.g. le confort induit par un signal vibrotactile caractérisé par un ensemble de variables d'entrée. Dans cette vision, la modélisation d'un processus est plutôt centrée sur la relation entrée/sortie.

- apprentissage par *renforcement* – ce paradigme d'apprentissage est souvent employé quand les données d'entrée ne sont pas étiquetées, mais il est cependant possible d'évaluer la performance par un évaluateur externe ; ainsi le RN doit découvrir l'action à prendre par un processus d'essais et d'erreurs guidé par l'évaluateur qui récompense les bonnes actions et pénalise les mauvaises [Engelbrecht 2007] ;

L'élément central d'un RN est le neurone artificiel (NA), défini comme l'unité fondamentale de traitement d'information [Haykin 1999] et qui représente un modèle mathématique simplifié d'un neurone biologique. Il collecte les informations qui lui parviennent sur la voie d'entrée et fournit la sortie numérique comme suit [Haykin 1999] :

$$y = \varphi\left(\sum_{j=1}^m \omega_j x_j + b\right) \quad (2.20)$$

où x_j est l'entrée j ; ω_j est le poids associé à cette entrée ; b est un *biais* externe utilisé pour ajuster la sortie y et φ est une fonction monotone croissante, dénommée *fonction d'activation*. Une étude détaillée sur les différents types de fonction d'activation utilisés en pratique est présentée dans [Engelbrecht 2007].

L'architecture définie ci-dessus correspond ainsi au type le plus simple de RN, c.à.d. *le perceptron mono-couche*. En choisissant soigneusement les poids ω_j pour un problème donné, le perceptron mono-couche se comporte comme un classifieur linéaire binaire, c.à.d. peut correctement classer deux classes d'objets qui sont linéairement séparables.

Cette architecture peut être facilement étendue en organisant les NA sur plusieurs couches, comme illustré dans la figure 2.19. Ainsi nous retrouvons l'entrée et la sortie sur deux couches séparées, et une ou plusieurs couches de neurones *cachées* entre les deux. Un tel type de RN est appelé *perceptron multi-couches*. Il peut être montré qu'en utilisant l'algorithme d'apprentissage supervisé par *rétropropagation de l'erreur*, un perceptron multi-couches avec une seule couche cachée est capable d'approximer une fonction continue quelconque $F(x)$ avec une précision arbitraire [Haykin 1999]. De plus, sous la supervision de la rétropropagation, les neurones cachés permettent l'identification des caractéristiques saillantes par une transformation non-linéaire de l'espace d'entrée [Haykin 1999].

Notons qu'un perceptron multi-couches employé pour la classification aura autant de neurones de sortie que de classes d'objets, et qu'un perceptron utilisé pour la prédiction aura un seul neurone de sortie. Dans les deux cas, le nombre de neurones d'entrée est dicté par la dimensionnalité du problème à traiter, c.à.d. le nombre de variables d'entrée à disposition. Cependant, il n'y a pas de moyen analytique pour déterminer le nombre de couches et neurones cachés. Un perceptron multi-couches avec un nombre trop petit de neurones cachés n'arrivera pas à faire converger l'algorithme de rétropropagation, et un réseau avec trop de neurones cachés peut surapprendre les données d'entraînement [Gardner 1998]. En pratique la valeur optimale pour le nombre de neurones et/ou couches cachés est déterminée en essayant plusieurs valeurs et en retenant celle qui offre la meilleure généralisation, c.à.d. la plus faible erreur sur l'ensemble de test.

Une fois son architecture déterminée, le perceptron multi-couches est totalement défini par l'ensemble de poids entre les neurones sur les différentes couches. Ce point limite l'interprétabilité des résultats, parce que le RN n'offre aucune relation *directe*, paramétrique

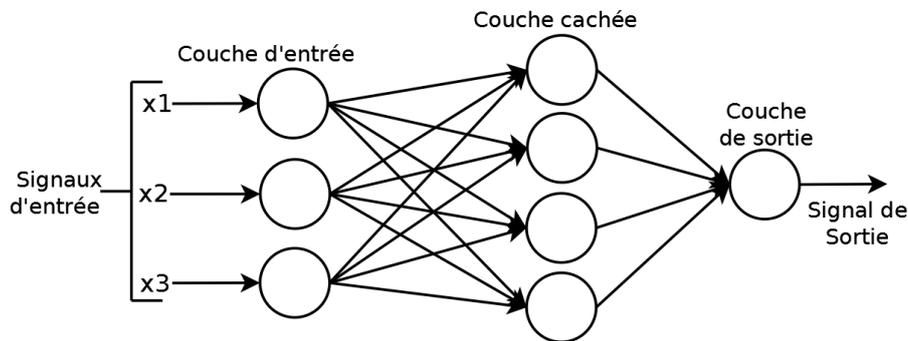


FIGURE 2.19 – Perceptron multi-couches avec une couche cachée.

ou linguistique, entre l'entrée et la sortie. Il se comporte ainsi comme une *boite noire* qui ne permet pas de comprendre comment la relation entre l'entrée et la sortie reflète la connaissance du phénomène étudié.

En conclusion, notons que, même si d'autres extensions du perceptron multi-couches ont été proposées dans la littérature et utilisées avec succès dans de nombreux domaines, e.g. RN à fonctions de base radiale, machine à vecteurs de support¹³, etc, il sont tous limités dans leur pouvoir de représenter la connaissance et d'extraire un modèle interprétable par l'utilisateur.

Dans le contexte du projet MISAC, qui regroupe des industriels et chercheurs provenant de domaines assez différents, la production d'un modèle de perception qui soit intelligible et compréhensible est une condition préalable essentielle pour une bonne coopération entre les différents partenaires. Ainsi, des techniques plus souples et facilement interprétables doivent être considérées afin d'expliquer la perception vibrotactile.

2.6.4 Généralités sur la logique floue

Une des techniques capables d'offrir une telle souplesse et ainsi de fournir un modèle compréhensible, basé sur des relations directes entrée-sortie est la *logique floue (LF)*. Elle est décrite par son fondateur, Lotfi A. Zadeh, comme une technique qui exploite la tolérance à l'imprécision afin d'atteindre des solutions maniables, robustes, moins chères et en relation avec la réalité [Zadeh 1996]. En tolérant, dans une certaine mesure, l'imprécision, la LF offre le cadre idéal pour le *raisonnement approximatif* concerné par la recherche de solutions *approximatives* pour un système d'équations relationnelles [Zadeh 1975b]. La principale source d'inspiration pour le raisonnement approximatif et pour la LF est *l'esprit humain* et sa capacité remarquable à prendre des décisions rationnelles basées sur des informations imprécises et incertaines [Zadeh 1988], qui n'exigent aucune mesure ou calcul exact, comme garer une voiture ou rouler à vélo [Zadeh 1999].

¹³Même si les machines à vecteurs de support n'ont pas la même structure qu'un perceptron, elles peuvent être vues comme une généralisation de ce dernier [Vapnik 2014], et ainsi rentrent dans cette catégorie. Le lecteur intéressé peut se reporter à [Haykin 1999] pour une description détaillée.

La tolérance pour l'imprécision et le raisonnement approximatif constituent l'originalité de la LF et la différencient d'autres techniques de CI, tels que réseaux de neurones. L'avantage principal de la LF est l'interprétabilité dans la modélisation d'un processus. En effet, la LF fournit des relations *directes* entre l'entrée et la sortie sous forme de variables linguistiques. Ainsi, elle a été largement utilisée pour modéliser les informations subjectives ou perceptuelles [Bouchon-Meunier 2013], pour lesquelles le besoin d'un modèle compréhensible est plus critique que dans d'autres domaines.

La modélisation de données subjectives est généralement caractérisée par une stratification de l'information sur deux niveaux : le niveau objectif, c.à.d. les caractéristiques physiques de l'objet, et le niveau subjectif, c.à.d. les sensations ou perceptions suscitées par l'objet. Dans ce domaine, le rôle de la LF est de représenter les relations entre les deux niveaux et par là même de définir un modèle de la perception. Dans la suite, nous présentons les notions principales de la théorie des sous-ensembles flous, le concept de variable linguistique, les règles floues et les principales classes de systèmes flous, que nous utiliserons ultérieurement.

Théorie des sous-ensembles flous. Les bases mathématiques de la LF sont rigoureusement ancrées dans la *théorie des sous-ensembles flous*, développée par Zadeh dans [Zadeh 1965], et qui étend la notion mathématique d'un ensemble, en permettant l'*appartenance partielle* d'un objet à l'ensemble. De manière analogue, un objet x peut appartenir à *plusieurs* ensembles flous avec différents degrés d'appartenance. Par exemple, une personne de 30 ans peut être considérée en partie *jeune* et en partie *d'âge moyen*.

Un ensemble flou A est caractérisé par une *fonction d'appartenance (FA)* μ_A , définie sur un *univers de discours* U et qui prend des valeurs dans l'intervalle $[0, 1]$:

$$\mu_A : U \mapsto [0, 1] \quad (2.21)$$

Pour un objet $x \in U$, $\mu_A(x)$ représente le degré d'appartenance de x dans A .

Afin de formaliser la notion d'ensemble flou, définissons d'abord les *singletons flous* comme un cas particulier d'ensembles flous définis sur un seul point $x \in U$. Soit A^x le singleton flou associée à x , défini par la notation suivante [Zadeh 1973] :

$$A^x = \mu_A(x)/x \quad (2.22)$$

Alors, l'ensemble flou A est défini par l'*union* des tous ses singletons [Zadeh 1973], notée :

$$A = \int_U \mu_A(x)/x \quad (2.23)$$

où le symbole de l'intégrale représente un opérateur d'union.

Un ensemble flou est totalement défini par sa FA. Plusieurs classes de FA ont été proposées dans la littérature, allant des fonctions linéaires par morceaux, tels que triangulaire ou trapézoïdales, à des fonctions non-linéaires, par exemple gaussiennes.

Entre deux sous-ensembles flous A et B , avec les FA associées μ_A et μ_B , définis sur le même univers de discours U , des opérations similaires à celles employées pour les ensembles classiques sont définies dans [Zadeh 1965] :

- *égalité* : $A = B \Leftrightarrow \mu_A = \mu_B$;
- *inclusion* : A est contenu dans B , c.à.d. A est un sous-ensemble de B iff $\mu_A \leq \mu_B, \forall x$;
- *complément (NON)* : soit \bar{A} le complément de A ; alors $\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A$;
- *intersection (ET)* : soit C un sous-ensemble flou qui représente l'intersection de A et B , c.à.d. $C = A \cap B$; la fonction d'appartenance de C est :

$$\mu_C(x) = \top(\mu_A(x), \mu_B(x)), \forall x \in U \quad (2.24)$$

ou $\top(a, b)$ est une *t-norme* ; les t-normes les plus utilisées en pratique sont [Gupta 1991] :

$$\begin{aligned} \top_1(a, b) &= \min(a, b); \\ \top_2(a, b) &= a * b; \\ \top_3(a, b) &= \max(a + b - 1, 0); \end{aligned} \quad (2.25)$$

- *union (OU)* : soit D le sous-ensemble flou représentant l'union de A et B , c.à.d. $D = A \cup B$; la fonction d'appartenance de D est :

$$\mu_D(x) = \perp(\mu_A(x), \mu_B(x)), \forall x \in U \quad (2.26)$$

ou $\perp(a, b)$ est une *t-conorme* ; les t-conormes correspondantes aux t-normes définies dans par les équations 2.25 sont [Gupta 1991] :

$$\begin{aligned} \perp_1(a, b) &= \max(a, b); \\ \perp_2(a, b) &= a + b - a * b; \\ \perp_3(a, b) &= \min(a + b, 1); \end{aligned} \quad (2.27)$$

Notons que \top_1 et \perp_1 sont respectivement les opérateurs t-normes et t-conormes introduits par Zadeh dans son article fondateur des ensembles flous [Zadeh 1965].

Variables linguistiques. Une extension naturelle des ensembles flous est la notion de *variable linguistique*, introduite en 1975 par Zadeh dans [Zadeh 1975a]. Une variable linguistique est une variable qui prend des mots comme valeurs. Par exemple, la variable linguistique *Âge* peut prendre des valeurs comme : *très jeune (TJ)*, *jeune (J)*, *âge moyen (AM)*, *vieux (V)*, *très vieux (TV)*. L'idée sous-jacente au concept de variable linguistique est encore une fois le raisonnement approximatif des êtres humains qui expriment souvent leur jugements par des mots, et non par des nombres, e.g. "Michael est *jeune*", "Jean est *grand*", "Paul est *mince*".

L'ensemble des valeurs d'une variable linguistique définit son *ensemble de termes (EdT)* et le cardinal de cet ensemble définit sa *granularité*. Même si les variables linguistiques traitent des mots, elles sont généralement définies sur un univers de discours numérique U , par exemple l'âge en années pour la variable linguistique *Âge*.

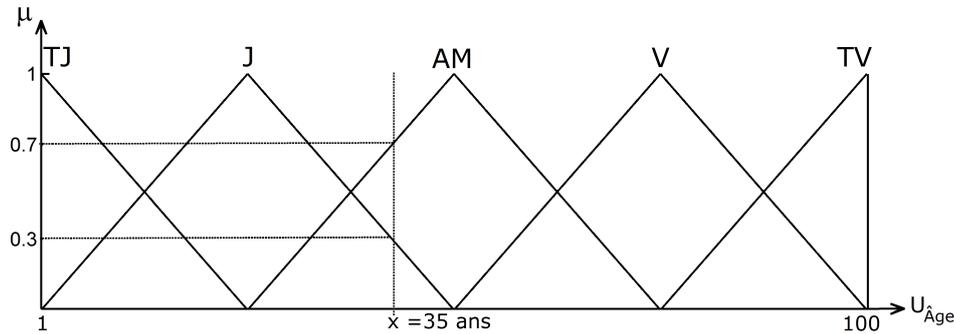


FIGURE 2.20 – Partition uniforme en cinq sous-ensembles flous, caractérisés par des FA triangulaires, pour la variable linguistique $\hat{A}ge$.

Le lien entre les ensembles flous et les variables linguistiques est que chaque mot-valeur, par exemple *jeune*, est défini dans U par un sous-ensemble flou qui définit la signification du mot. Ainsi, l'univers du discours de la variable linguistique, est partitionné en autant de sous-ensembles flous que le cardinal de $l'EdT$ de la variable, comme illustré dans la figure 2.20 pour la variable linguistique $\hat{A}ge$. Remarquons que les mots-valeurs de la variable deviennent des *étiquettes linguistiques* associées aux sous-ensembles flous. L'utilisation de ces étiquettes est un aspect important de la LF et lui confère une *interprétabilité* élevée par rapport à d'autres techniques.

Comme nous pouvons le voir dans la figure 2.20, n'importe quelle valeur x dans l'espace numérique U peut être transposée dans l'espace de la variable linguistique en déterminant son degré d'appartenance dans *chaque* sous-ensemble flou. On obtient ainsi la *description linguistique floue* de x comme suit :

$$\Phi\{x = 35\} = 0.0/TJ + 0.3/J + 0.7/AM + 0.0/V + 0.0/TV \quad (2.28)$$

ou “+” représente l'union de sous-ensembles.

En ajustant la position et la forme des FA sur l'univers du discours, ou la granularité de la variable linguistique, e.g. utiliser trois mots-valeurs au lieu de cinq, il est possible de coder *notre propre vision* sur la connaissance à modéliser. Par exemple, si nous considérons qu'à 35 ans une personne est plutôt *jeune* que *d'age moyen*, il suffit de déplacer les FA à droite. En conséquence, la théorie des sous-ensembles flous est un outil mathématique puissant et souple, capable de représenter la connaissance de manière *intuitive* et *interprétable*.

Règles floues. Souvent, une ou plusieurs variables d'entrée sont utilisées pour modéliser le paramètre de sortie d'un processus, comme par exemple le confort. Afin de représenter la connaissance *jointe* entrée-sortie, la LF s'appuie sur des règles *SI-ALORS* dans lesquelles interviennent des variables linguistiques floues :

$$SI A \text{ est } a \text{ ALORS } S \text{ est } s \quad (2.29)$$

où A et S sont respectivement des variables linguistiques d'entrée et sortie, et a et s sont des mots-valeurs. Par exemple, pour modéliser la valeur d'une automobile sur le marché, les règles floues suivantes peuvent être proposées :

$$\begin{aligned} & \text{SI Voiture est récente ALORS Valeur est élevée;} \\ & \text{SI Voiture est vieille ALORS Valeur est faible;} \\ & \text{SI Voiture est de collection ALORS Valeur est très élevée;} \end{aligned} \quad (2.30)$$

La partie située avant le mot-clé *ALORS* dénote la *prémisse* de la règle, e.g. “Voiture est récente”, et la partie située après dénote la *conclusion*, e.g. “Valeur est élevée”.

Dans le cas général, plusieurs variables d'entrée sont combinées pour modéliser la sortie d'un système. Cette *combinaison* au niveau de règles floues est réalisée par un *connecteur ET* ou *OU* entre les entrées :

$$\begin{aligned} & \text{SI Voiture est agée OU État est mauvais ALORS Valeur est faible;} \\ & \text{SI Voiture est ancienne ET État est bon ALORS Valeur est très élevée;} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Mathématiquement, le connecteur *ET* est défini par une t-norme (voir les équations 2.25), et le connecteur *OU* par une t-conorme (voir les équations 2.27). Ces opérateurs agissent au niveau des FAs. Un exemple numérique est :

Si $\mu_{Age}^{TV}(x) = 0.5$ et $\mu_{Etat}^{Bon}(y) = 0.8$ sont respectivement les degrés d'appartenance de $x \in U_{Age}$ et de $y \in U_{Etat}$ aux sous-ensembles flous *très vieux* et *bon*, alors le degré de la prémisse “Âge est très vieux ET État est bon”, en utilisant la t-norme \top_1 , est :

$$\min(\mu_{Age}^{TV}(x), \mu_{Etat}^{Bon}(y)) = \min(0.5, 0.8) = 0.5; \quad (2.32)$$

En s'appuyant sur le concept de variable linguistique, les règles floues représentent l'essence d'un modèle flou. Dans leur présentation, les règles floues n'emploient que des mots, même si beaucoup de calculs numériques sont réalisés en arrière-plan, et mettent ainsi en évidence une connaissance générale. Elles forment ainsi les bases pour la méthodologie du *Computing with Words* [Zadeh 1996, Zadeh 1999], où les mots remplacent les nombres, offrant un cadre robuste et compréhensible pour traiter les données linguistiques fournies par les êtres humains. Notons que la méthodologie du *Computing with Words* est à la base de la *Théorie Computationnelle des Perceptions* [Zadeh 1999, Zadeh 2001], un domaine de recherche en pleine évolution (voir [Trivino 2013] pour une application qui porte sur la génération automatique des factures en langage naturel).

Systèmes à base de règles floues (SBRF). Les règles floues synthétisent des relations linguistiques directes entre l'entrée et la sortie. La formalisation de cette connaissance intrinsèque est une étape essentielle pour la modélisation d'un processus. Fondamentalement, un système flou est une fonction non-linéaire qui relie l'entrée à la sortie [Engelbrecht 2007]. Cette relation n'est pas sous forme d'un système d'équations, comme pour les RN, mais sous forme d'une base de règles floues.

La conception d'un SBRF implique deux étapes : a) la définition de la *base de connaissance*, qui inclue la base de règles floues et les propriétés des variables linguistiques employées ; b) le choix des *opérateurs d'inférence floue*, c.à.d. fonctions mathématiques impliquées dans les calculs numériques réalisés en arrière plan par les SBRF. Ces deux étapes

seront détaillées dans le chapitre 4, où un modèle psychophysique flou de la perception tactile sera présenté, mais nous présentons ci-après les types de système flou les plus utilisés :

- *les Systèmes flous de Mamdani* [Mamdani 1975] – sont caractérisés par l’emploi de variables linguistiques en entrée *et* en sortie, et ainsi la structure des règles floues utilisées est complètement linguistique ; la base de règles est fournie par un expert humain ou apprise automatiquement à partir des données ; il représente aussi le premier type de système flou développé pour des applications en automatique.
- *les Systèmes flous de Takagi-Sugeno* [Takagi 1985] – contrairement au systèmes de Mamdani, ils sont caractérisés par une base de règles floues dont la sortie est *numérique*, c.à.d. “*SI A est a ALORS S est s*”, ou $s \in \mathfrak{R}$; il est ainsi adapté à modéliser les systèmes impliquant des mesures objectives plutôt que subjectives ; la base de règles est généralement apprise à partir des données entrée-sortie en utilisant des méthodes d’apprentissage automatique comme les AG, le filtre de Kalman, RN, etc.
- *les Systèmes flous symboliques* [Foulloy 1994, Mauris 1994] – s’appuie sur des règles floues complètement linguistiques, mais contrairement au système de Mamdani, les étiquettes linguistiques utilisés en sortie ne sont pas forcément associés à un sous-ensemble flou numérique ; la base de règles est généralement fournie par un expert humain ; la valeur symbolique floue de sortie peut être défuzzifiée en associant une valeur numérique appelée *valeur modale* à chaque mot ; les valeurs modales peuvent être déterminées par des techniques d’optimisation, e.g. AG, recuit simulé, etc.

Chaque type de SBRF est adapté aux connaissances disponibles sur le problème considéré. Dans le chapitre 4, après une présentation approfondie du contexte de nos travaux, nous détaillerons nos choix pour un modèle psychophysique flou de la perception tactile, ainsi que pour un modèle expert du confort.

2.7 Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons présenté le contexte des études réalisées, les particularités de la problématique traitée et les différentes techniques de traitement de signal et de *computational intelligence* envisageables. Nous avons vu que le développement des interfaces tactiles est devenu très important ces dernières années dans les domaines où une interaction homme-machine est requise. Cependant, leur handicap majeur, à savoir le manque de retour après l’interaction, a forcé les équipementiers automobiles et aéronautiques à chercher des solutions viables afin de rendre l’interaction plus sûre.

C’est pourquoi une rétroaction de ces interfaces sous la forme de signaux vibrotactiles envoyés directement au doigt a été récemment expérimentée. Les avantages conférés par la rétroaction vibratoire ont été présentés dans la section 2.3.1, dans laquelle nous avons vu que l’ajout de la modalité haptique pour compléter la modalité visuelle permet une diminution du temps de réalisation d’une tâche et une réduction de la charge cognitive associée. Les résultats sont confirmés pour des dispositifs portables, tels que smartphone ou PDA, mais aussi pour les interfaces tactiles montées à bord d’un véhicule. Les caractéristiques

physiques les plus utilisées dans la littérature pour concevoir ces patterns vibratoires ont été présentées dans la section 2.3.2. Nous avons retenu la fréquence, la durée et la forme d'onde comme les principaux paramètres, capables d'offrir des taux de discrimination élevés (voir Tableaux 2.1).

Dans le but de modéliser la perception de ces signaux vibrotactiles, une analyse psychophysique du sens tactile a été présentée dans la section 2.4. Nous en avons retenu l'existence de quatre canaux psychophysiques responsables du pré-traitement et de la transmission de l'information vers le cortex. Étant donné que leur activation est dictée par la combinaison fréquence–surface de contact, nous avons déduit dans la section 2.4.5 que, dans le contexte des interfaces haptiques usuelles, la perception tactile est uniquement le résultat de l'activation des canaux Pacini (P) et Non-Pacini I (NP I). Nous avons retenu les variables suivantes pour représenter l'activation de chaque canal : l'énergie du stimulus au cours du temps pour le canal P et la vitesse positive normalisée pour la canal NP I. Une variable complémentaire, décrivant la complexité spectrale des vibrations a été ajoutée afin de modéliser *le couplage à haut niveau* de ces deux canaux.

La gamme de fréquence des vibrations commande l'activation des différents canaux et la durée détermine les aspects de sommation temporelle, spécialement pour le canal P. Ainsi, afin de déterminer la quantité d'énergie délivrée au canal P, ainsi que la complexité spectrale des vibrations, nous avons proposé d'employer une technique d'analyse temps-fréquence. Dans la section 2.5, les représentations temps-fréquence les plus usuelles ont été présentées, c.à.d. la transformée de Fourier à court terme (TFCT) et la distribution de Wigner-Ville (DWV). Comme nous l'avons indiqué, les deux présentent des inconvénients qui perturbent la qualité des représentations. Ainsi, nous nous sommes orientés vers la *transformée en ondelettes continue* qui offre un bon compromis entre la résolution temps-fréquence et la présence d'interférences. Le principe de la méthode a été brièvement décrit dans la section 2.5.3 et une présentation détaillée sera proposée dans chapitre 3.

La dernière partie de ce premier chapitre a présenté une description des différentes techniques de *Computational Intelligence* pouvant être utilisées pour définir un modèle de perception tactile, c.à.d. les algorithmes génétiques, les réseaux des neurones et la logique floue. Étant donné le cadre hétérogène et pluridisciplinaire du projet *MISAC*, la définition d'un modèle interprétable et compréhensible est très importante pour une bonne coopération de l'ensemble des intervenants de la chaîne de conception d'une interface tactile à retour vibratoire. Nous avons ainsi retenu les *règles floues* comme principale technique pour la modélisation de la perception des signaux vibrotactiles, que nous présenterons dans le chapitre 4.

Caractérisation des Signaux Vibrotactiles

Sommaire

3.1	Introduction	50
3.2	Tâche d'évaluation de dissimilarité perceptuelle	50
3.2.1	Dispositif expérimental	50
3.2.2	Procédure expérimentale	51
3.2.3	Résultats	52
3.3	Mesures de l'accélération de la surface tactile	54
3.3.1	Motivation et contexte	54
3.3.2	Le signal d'accélération de la surface	55
3.3.3	Rapport signal-bruit pour les mesures d'accélération	56
3.4	Transformée en ondelettes continue	58
3.4.1	Motivation et présentation de la méthode	58
3.4.2	Le scalogramme	61
3.5	Quantification de l'activation du canal Pacinien	66
3.6	Quantification de l'activation du canal Non-Pacini I	68
3.7	Index de complexité du scalogramme	70
3.7.1	Définition	71
3.7.2	La divergence de Kullback-Leibler	72
3.8	Validation des variables caractéristiques	74
3.8.1	Procédure de comparaison	75
3.8.2	Résultats et discussions	75
3.8.3	Matrice de dissimilarité unifiée P-NP I	79
3.9	Tâche d'évaluation hédonique de signaux vibrotactiles	80
3.9.1	Dispositif expérimental – Le banc <i>MISAC</i>	81
3.9.2	Procédure expérimentale et confort global	82
3.10	Conclusion	86

3.1 Introduction

Dans le deuxième chapitre nous avons décrit les signaux vibrotactiles d'un point de vue *ergonomique* et *psychophysique*. L'analyse effectuée nous a conduit à retenir trois variables pour caractériser les signaux : l'énergie du stimulus au cours du temps pour le canal P, la vitesse positive normalisée pour le canal NP I et la complexité spectrale globale des vibrations qui reflète le couplage entre les deux canaux susmentionnés. L'objectif principal du chapitre 3 est de développer plus en avant la caractérisation des signaux vibrotactiles en proposant une quantification des trois variables sur la base d'un traitement avancé du signal d'accélération, et de valider *l'existence d'un lien* entre le niveau de représentation objective correspondant à ces variables et le niveau de représentation subjective correspondant à l'évaluation globale du confort par un utilisateur. Ces deux caractérisations des signaux vibrotactiles ne sont ni indépendantes, ni équivalentes, mais plutôt *complémentaires*. La différence majeure entre les deux réside dans la manière de les obtenir : la représentation objective ne nécessite que des mesures physiques alors que la représentation subjective nécessite la mise en œuvre d'expériences psychophysiques impliquant plusieurs participants et s'étendant généralement sur plusieurs jours.

Nous commençons ainsi par présenter une première expérience psychophysique consistant à évaluer la dissimilarité perceptuelle entre des signaux vibrotactiles. Elle vise à offrir une première phase d'introspection dans la caractérisation subjective des signaux, les résultats obtenus servant de *vérité terrain subjective*. Ensuite, les trois variables retenues dans la section 2.4 seront une par une définies à l'aide de techniques de traitement du signal, puis validées par des mesures de corrélation avec la dissimilarité perceptuelle entre les signaux. Le chapitre se termine par la description d'une deuxième expérience psychophysique qui traite les aspects *hédoniques*¹ des signaux vibrotactiles, ouvrant ainsi la voie à la détermination d'un modèle psychophysique pour l'évaluation hédonique de signaux vibrotactiles présenté dans le chapitre 4.

3.2 Tâche d'évaluation de dissimilarité perceptuelle

Cette première expérience, traitant les aspects de discrimination tactile et de distance perceptuelle entre les signaux, a été réalisée par l'équipementier automobile *Valeo* en collaboration avec le laboratoire *EMC*. L'expérience a eu lieu au sein du laboratoire de recherche de *Valeo Annemasse*, sur une version *préliminaire* du banc haptique qui n'offre pas autant de flexibilité dans le choix de paramètres que le nouveau banc MISAC utilisé par la suite, mais qui était suffisant pour comprendre le fonctionnement du sens tactile et les lois générales qui caractérisent la perception des stimuli tactiles.

3.2.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé pour produire les signaux vibrotactiles dans cette expérience a été développé en interne par *Valeo*. Il est composé d'un actionneur à bobine

¹Le mot "*hédonique*" provenant du mot grec "*hedonikos*" est utilisé dans ce manuscrit pour indiquer la notion de confort. Par "évaluations hédoniques" nous désignons une évaluation sur le confort perçu.

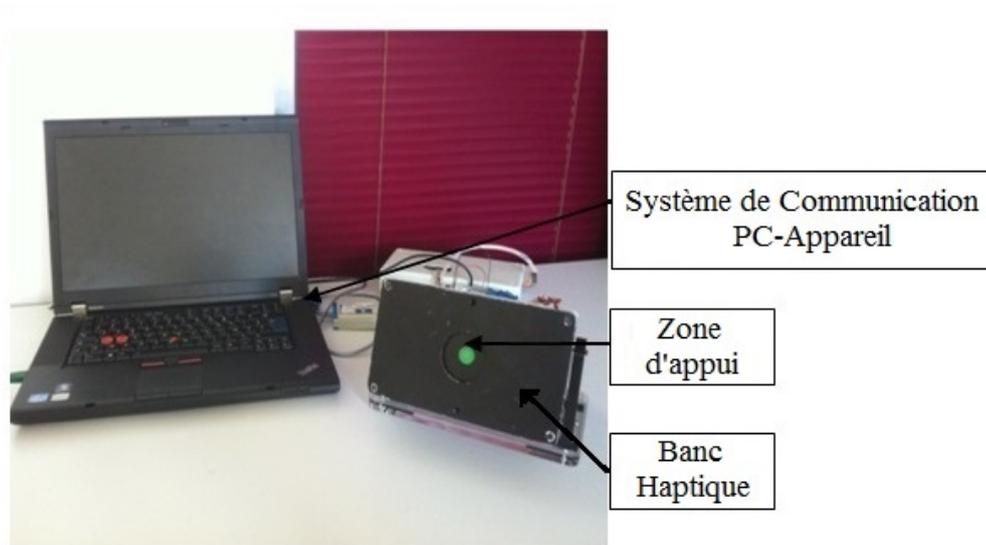


FIGURE 3.1 – Le banc préliminaire utilisé pour produire les signaux vibrotactiles.

mobile² disposé sous un écran résistif agissant comme surface tactile. Les caractéristiques des signaux vibrotactiles produits sont déterminées par les différents stimuli électriques envoyés pour contrôler l'actionneur. Comme nous le verrons dans la section 3.2.2, les paramètres *électriques* des signaux varient en fréquence, durée et forme d'onde. Afin de déclencher le retour vibrotactile, un appui sur une zone bien délimitée de la surface tactile est requis. Plus de détails sur la constitution de ce banc peuvent être consultés dans [Tissot 2012].

Le banc est relié à un PC via le logiciel *E-Prime 2.0*, qui gère la communication bidirectionnelle avec l'actionneur et l'utilisateur, c.à.d. l'envoi des paramètres pour les stimuli électriques et l'enregistrement des réponses données par les participants. Le dispositif expérimental est illustré dans la figure 3.1.

Un appui sur la surface tactile du banc haptique entraîne le déclenchement d'un signal vibrotactile. Simultanément, le dispositif génère aussi un bruit mécanique à basse fréquence qui peut perturber la perception *tactile* des signaux. Afin de filtrer ce bruit, les participants ont été équipés d'un casque anti-bruit qu'ils portaient tout au long de l'expérience.

3.2.2 Procédure expérimentale

Vingt-quatre sujets droitiers, avec une moyenne d'âge de 25 ans, ont participé volontairement à cette expérience. En utilisant l'index de la main droite, ils ont évalué la dissimilarité *perceptuelle* entre 18 signaux vibrotactiles dont les stimuli électriques associés couvrent trois fréquences, deux durées et trois formes d'onde (Cf. Tableau 3.1). Notons que les trois paramètres électriques considérés dans cette expérience pour générer les signaux vibrotactiles sont en correspondance avec ceux utilisés dans des études similaires, évoquées dans la section 2.3.2.

²Ang. – *Voice-coil actuator*.

TABLE 3.1 – Paramètres électriques pour les 18 signaux vibrotactiles employés.

Code Signal	Forme d'onde	Fréquence	Durée
1	sinus	60 Hz	7.8 ms
2	sinus	60 Hz	23.4 ms
3	sinus	130 Hz	7.8 ms
4	sinus	130 Hz	23.4 ms
5	sinus	200 Hz	7.8 ms
6	sinus	200 Hz	23.4 ms
7	carré	60 Hz	7.8 ms
8	carré	60 Hz	23.4 ms
9	carré	130 Hz	7.8 ms
10	carré	130 Hz	23.4 ms
11	carré	200 Hz	7.8 ms
12	carré	200 Hz	23.4 ms
13	triangle	60 Hz	7.8 ms
14	triangle	60 Hz	23.4 ms
15	triangle	130 Hz	7.8 ms
16	triangle	130 Hz	23.4 ms
17	triangle	200 Hz	7.8 ms
18	triangle	200 Hz	23.4 ms

Chaque signal a été comparé avec lui-même et avec les 17 autres signaux présentés dans un ordre pseudo-aléatoire. Un nombre total de 171 paires de signaux ont été ainsi considérées. Pour chaque paire, les sujets ont évalué la dissimilarité perceptuelle entre les deux signaux sur une échelle de Likert [Likert 1932] allant de 1 à 7, où 1 correspond à “les signaux sont très similaires” et 7 à “les signaux sont très dissimilaires.”. Les utilisateurs ont donné leurs évaluations par l’intermédiaire du logiciel E-Prime. L’ordre dans lequel les deux signaux d’une paire sont présentés a été contrebalancé entre les participants afin d’éviter des biais potentiels. Une description détaillée de l’expérience est disponible dans [Dabic 2013].

3.2.3 Résultats

Les évaluations de dissimilarité pour chaque paire de signaux ont été ensuite moyennées sur les 24 sujets. Une *matrice de dissimilarité perceptuelle* D_P , avec 18×18 éléments est ainsi obtenue dans [Dabic 2013], et peut être consultée dans l’annexe A.2. Chaque élément $D_P(i, j)$ contient la distance perceptuelle entre les signaux i et j , telle qu’évaluée par les participants.

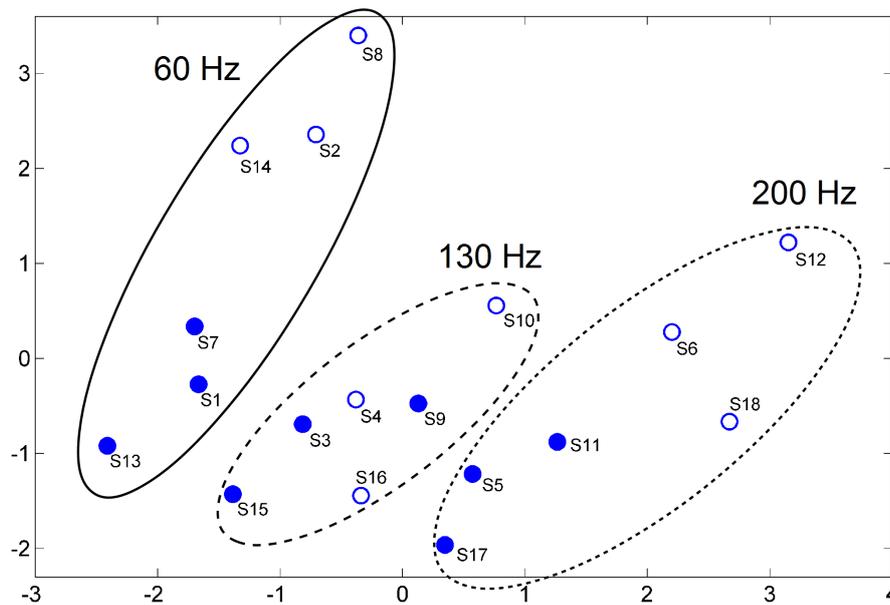


FIGURE 3.2 – Représentation MDS des distances perceptuelles entre les 18 signaux. Les ronds blancs représentent les signaux “longs” à 23.4 ms et les ronds noirs les signaux “courts” à 7.8 ms. La représentation de la forme d’onde a été omise afin d’améliorer la clarté. Les axes n’ont pas de signification et l’orientation est arbitraire. *Stress* : 0.1022.

En utilisant D_P , une représentation visuelle 2D de la dissimilarité entre les signaux, basée sur la technique du Multi-Dimensional Scaling (voir Annexe A.1), peut être effectuée (voir figure 3.2). Sur cette représentation, nous pouvons remarquer que les trois groupes de fréquences, c.à.d. 60 Hz, 130 Hz et 200 Hz, sont clairement séparés. Ceci nous conforte dans l’idée que la gamme de fréquence, responsable de l’activation des différents canaux, est le principal facteur de discrimination entre les signaux. De plus, un effet important de la durée, associé à la sommation temporelle dans le canal P, peut être observé surtout pour les signaux à 60 Hz et 200 Hz. Un léger effet de la forme d’onde est aussi noté, vu que les signaux *carrés*, i.e. $S_7 - S_{12}$, sont toujours un peu éloignés des autres signaux.

La représentation MDS offre ainsi une première confirmation de l’existence d’un lien entre les caractérisations subjective et objective des signaux. Cependant, ce lien n’est basé que sur une analyse visuelle de la MDS et il s’appuie sur les paramètres électriques qui contrôlent l’actionneur. Dans les sections suivantes, une analyse plus robuste, basée sur l’explicitation des trois variables psychophysiques sera détaillée. Dans cette analyse, la matrice de dissimilarité perceptuelle D_P servira de vérité terrain *subjective* pour quantifier directement la pertinence de ce lien, et indirectement, l’utilité des variables choisies.

3.3 Mesures de l'accélération de la surface tactile

3.3.1 Motivation et contexte

Les paramètres électriques envoyés pour contrôler l'actionneur offrent une première caractérisation objective des signaux vibrotactiles. Néanmoins, en raison des multiples couches qui existent entre l'actionneur et la surface tactile, ces paramètres vont être *transformés* par la mécanique du banc avant d'arriver à la couche tactile. Vu la complexité architecturale d'un banc haptique, la déformation subie par les paramètres est non-linéaire et difficile à déterminer. Ainsi, il est clair que deux signaux vibrotactiles avec des paramètres électriques *identiques*, mais qui sont produits par deux dispositifs différents, induiront des sensations tactiles *différentes*.

Nous considérons donc que la généralité de ces paramètres est spécifique à l'actionneur et à l'architecture du dispositif. Dans le but d'obtenir un modèle *générique*³ de la perception tactile, il est ainsi évident qu'une nouvelle manière de caractériser les signaux vibrotactiles doit être employée.

Dans le cadre de ces travaux, nous proposons d'utiliser les données objectives *d'accélération* des signaux vibrotactiles, mesurées sur la surface tactile. Ce choix est motivé par les raisons suivantes :

- étant mesurées directement sur la surface tactile, à l'endroit où les utilisateurs appuient avec le doigt, elles nous fournissent une image des signaux vibrotactiles proche de celle perçue par les utilisateurs ;
- les mesures d'accélération sont indépendantes du dispositif utilisé ; ainsi, elles sont adaptées à l'obtention d'un modèle générique de la perception tactile ;
- les données d'accélération permettent d'extraire, à l'aide des techniques de traitement de signal que nous allons décrire plus tard, les trois variables caractéristiques pour les signaux vibrotactiles, telles qu'énoncées dans la section 2.4.

Notons que l'accélération des signaux vibrotactiles a été auparavant utilisée dans d'autres études sur le sens tactile afin d'analyser ses propriétés psychophysiques : par exemple, dans [Morioka 2006] l'accélération des stimuli vibrotactiles est utilisée pour exprimer les seuils absolues de détection en fonction de la fréquence et pour plusieurs orientations.

Signalons qu'en considérant les paramètres électriques de l'actionneur comme des variables d'entrée, et l'accélération sur la surface tactile comme une variable de sortie, nous pourrions aussi obtenir un modèle *mécanique* du banc haptique considéré. Un tel modèle pourrait aider à expliquer par exemple comment les stimuli électriques utilisés en entrée sont déformés par l'architecture du banc, ou quelle sont les fréquences de résonance de l'actionneur. Bien qu'intéressantes, ces approches ne font pas l'objet de nos travaux.

En conséquence, les sections suivantes seront dédiées à l'étude de l'accélération des signaux vibrotactiles, en mettant l'accent sur l'enregistrement, les propriétés et l'intégrité des mesures obtenues.

³La vision de l'auteur est qu'un modèle *générique* doit être en mesure de dépasser le cadre expérimental dans lequel il a été créé, afin de pouvoir révéler la *connaissance générale* pour un phénomène donné.

3.3.2 Le signal d'accélération de la surface

En utilisant le dispositif expérimental décrit dans la section 3.2.1, des mesures d'accélération ont été enregistrées pour chacun des 18 signaux vibrotactiles. Les données ont été collectées à l'aide d'un accéléromètre placé directement sur la surface tactile du banc haptique (voir l'étiquette “*Zone d'appui*” dans la figure 3.1). Pour éviter que le doigt en contact avec la surface tactile altère les mesures réalisées, les signaux vibrotactiles ont été déclenchés automatiquement, c.à.d. sans contact du doigt.

Chaque acquisition comprend deux déclenchements successifs du même signal vibratoire et s'étend sur une durée de 5 s, y compris la pause entre les vibrations. La fréquence d'échantillonnage de l'accéléromètre est :

$$F_s = 5 \text{ kHz} \quad (3.1)$$

Une capture complète d'accélération pour le cinquième signal vibrotactile, i.e. sinus à 200 Hz avec une durée électrique de 7.8 ms, est représentée dans la figure 3.3 en haut. L'amplitude de l'accélération est mesurée en G (nous rappelons que $1 G \approx 9.8 \text{ m/s}^2$). Un *zoom* du premier déclenchement du signal, c.à.d. le rectangle rouge, est illustré dans la même figure en bas. Étant pratiquement identique au premier, le deuxième déclenchement du signal n'est pas représenté. Notons aussi que les données d'accélération sont pré-traitées en soustrayant leur moyenne, i.e. composante continue.

Les deux points de coupure, D et F , dans la figure 3.3 en bas, représentent respectivement le début et la fin de la vibration et distinguent l'accélération *effective* des signaux vibrotactiles. Ils ont été déterminés manuellement à partir des captures complètes de l'accélération en respectant les consignes suivantes :

- le point de début D est visuellement choisi comme le premier échantillon de la vibration ; son amplitude $A(D)$ est enregistrée ;
- le point de fin F est choisi comme l'échantillon de la vibration pour lequel tous les modes avec une amplitude crête-à-crête supérieure à 20 % de l'amplitude maximale de l'accélération sont inclus entre D et F ; le seuil à 20 % a été choisi en conformité avec le seuil relatif du sens tactile (détaillé dans la section 2.4.2), afin que l'accélération effective retenue corresponde à la perception des utilisateurs ;
- enfin, afin de limiter les effets de bords, la position exacte de F est ensuite raffinée de manière à ce que $A(F) \approx A(D)$;

A travers l'accélération effective comprise entre les points D et F , une caractérisation de l'évolution *temporelle* des signaux vibrotactiles peut être fournie. Nous pouvons ainsi constater que cette représentation est beaucoup plus robuste que celle basée sur les paramètres électriques vu qu'elle nous permet de facilement identifier l'amplitude à chaque instant et aussi la durée de sortie *effective*⁴ des signaux.

Les mesures d'accélération effective pour les six signaux vibrotactiles considérés comme les plus représentatifs pour l'ensemble utilisé, sont illustrées dans l'annexe B. Ces mesures

⁴Par exemple, pour le signal illustré dans la figure 3.3, la durée *électrique* d'entrée est de 7.8 ms, alors que sa durée *effective* (durée en intervalle de temps entre les points D et F) est de 24.6 ms.

sont accompagnées, dans le Tableau B.1, de la position des points D et F et de la durée réelle de chaque signal.

Notons que des tentatives préliminaires ont été effectuées dans le cadre du consortium du projet pour extraire des propriétés temporelles à partir des données d'accélération, telles que l'amplitude pic-à-pic, le nombre de passages par zéro, etc.. Cependant, en absence d'informations mixte temps-*fréquence*, ces indicateurs n'ont pas permis d'expliquer les sensations induites par les signaux vibrotactiles.

Dans les sections suivantes, l'accélération effective servira de point de départ pour définir les variables caractéristiques des signaux vibrotactiles. Néanmoins, avant de poursuivre cette analyse, dans la section 3.3.3 ci-après, une étude sur l'intégrité des données d'accélération est proposée à l'aide du rapport signal-bruit.

3.3.3 Rapport signal-bruit pour les mesures d'accélération

Comme nous pouvons le constater dans la figure 3.3, un signal parasite, c.à.d. *le bruit*, est superposé aux mesures d'accélération. Afin de s'assurer que le bruit présent n'affecte pas significativement le signal utile, une analyse du rapport signal-bruit (RSB) pour les mesures d'accélération est nécessaire.

Le RSB est défini comme le ratio entre les énergies du signal utile pur et du bruit superposé sur les mesures. Exprimé en décibels, le RSB est défini comme suit :

$$RSB = 10 \log_{10} \left(\frac{E_S}{E_B} \right) \quad (3.2)$$

où E_S et E_B représentent, respectivement, l'énergie du signal utile et celle du bruit. Étant donné que nous ne pouvons pas directement déterminer l'énergie du signal utile, nous proposons de l'approximer, sous hypothèse de décorrélation, comme suit :

$$E_S \approx E_{SC} - E_B \quad (3.3)$$

où E_{SC} indique l'énergie du signal utile *corrompu*, i.e. l'accélération entre les points D et F .

En supposant que le bruit est stationnaire, nous pouvons conclure que la puissance du bruit dans une fenêtre de longueur constante est la même que pendant toute la durée d'acquisition. Ainsi, l'énergie du bruit superposé au signal utile entre les points D et F est égale à l'énergie du signal dans une fenêtre de longueur $L = (F - D)$, centrée dans une zone où seul le bruit est présent, c.à.d. à l'extérieur du patch $D - F$.

En utilisant la théorème de Parseval⁵, l'énergie du bruit et du signal utile corrompu sont déterminées à l'aide de leur transformée de Fourier. Ainsi le RSB devient :

$$RSB = 10 \log_{10} \left(\frac{E_{SC} - E_B}{E_B} \right) = 10 \log_{10} \frac{\sum_{\omega} |\widehat{SC}(\omega)|^2 - \sum_{\omega} |\widehat{B}(\omega)|^2}{\sum_{\omega} |\widehat{B}(\omega)|^2} \quad (3.4)$$

où $\widehat{SC}(\omega)$ est la transformée de Fourier du signal utile corrompu entre les points D et F , et $\widehat{B}(\omega)$, celle du bruit dans une fenêtre de longueur $L = (F - D)$. Comme indiqué dans la section 3.3.2, les données d'accélération considérées sont de moyenne nulle.

⁵La somme des modules au carré de la transformée de Fourier d'un signal pour toutes les fréquences est égale à l'énergie du signal.

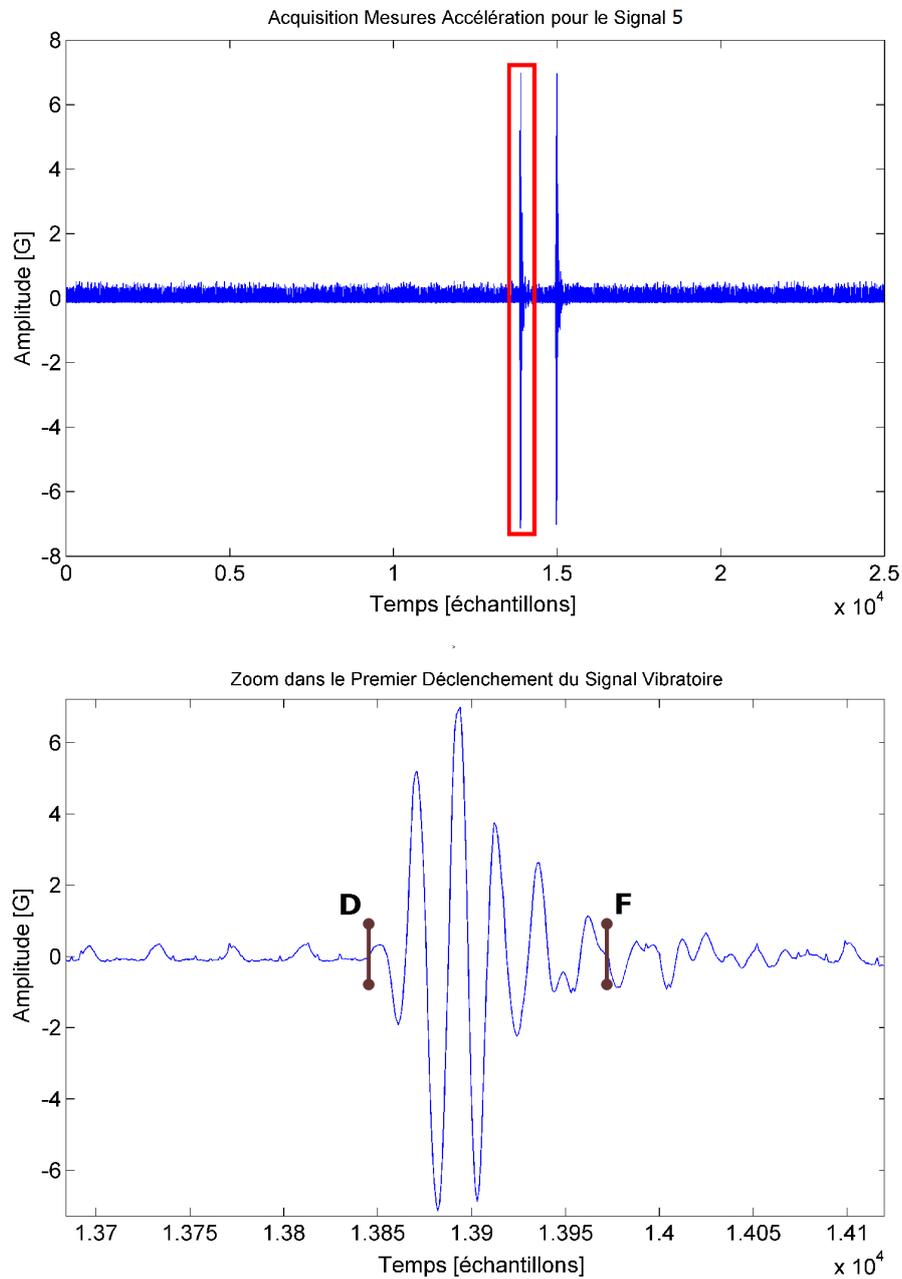


FIGURE 3.3 – Mesures d'accélération pour le cinquième signal vibrotactile (voir Tableau 3.1). *En haut* : acquisition complète de 5 s comprenant deux déclenchements successifs du signal. *En bas* : zoom sur le premier déclenchement ; les points *D* et *F* marquent respectivement le début et la fin du signal.

TABLE 3.2 – Valeurs du rapport signal sur bruit pour les 18 signaux vibrotactiles décrites dans le Tableau 3.1. Les valeurs obtenues représentent la moyenne et l'écart-type pour cinq estimations du bruit, c.à.d. pour cinq fenêtres différentes de longueur L .

Code Signal	RSB	Écart-type
1	16.4 dB	0.29 dB
2	22.9 dB	0.27 dB
3	19.5 dB	0.41 dB
4	20.0 dB	0.13 dB
5	25.9 dB	0.52 dB
6	28.7 dB	0.28 dB
7	18.1 dB	0.46 dB
8	23.3 dB	0.32 dB
9	24.4 dB	0.70 dB
10	23.0 dB	0.49 dB
11	28.7 dB	0.57 dB
12	29.9 dB	0.40 dB
13	13.5 dB	1.10 dB
14	19.5 dB	0.05 dB
15	17.8 dB	0.44 dB
16	18.0 dB	0.43 dB
17	23.5 dB	0.19 dB
18	26.9 dB	0.39 dB

Les valeurs moyennes du rapport signal-bruit pour les 18 signaux vibrotactiles présentées dans la section 3.2.2 sont regroupées dans le Tableau ci-dessus. Comme nous pouvons le voir, les valeurs individuelles sont assez élevées pour tous les signaux, ce qui nous assure que le bruit n'a pas une influence significative sur les mesures. De plus, les valeurs relativement faibles pour l'écart-type confirment l'hypothèse de la stationnarité du bruit pendant la durée de la mesure.

3.4 Transformée en ondelettes continue

3.4.1 Motivation et présentation de la méthode

Le canal de Pacini (P), associé aux corpuscules Paciniens, est le plus sensible des quatre canaux psychophysiques de la peau, contrôlant les sensations tactiles dans la plage des hautes et moyennes fréquences. De plus, grâce à sa propriété de *sommation temporelle*, il

est capable d'intégrer l'énergie du stimulus au fil du temps (cf. section 2.4.6).

Au vu de ces constatations, nous avons conclu qu'une variable qui reflète bien l'activation neuronale est proportionnelle à l'énergie du signal vibrotactile au fil du *temps*, et accumulée dans la gamme de *fréquences* du canal P.

Étant donné que les signaux vibrotactiles sont caractérisés par leur mesures d'accélération, nous proposons de faire une analyse temps-fréquence de ces données pour déterminer l'activation du canal P. Dans les sections 2.5.1 et 2.5.2 les techniques d'analyse temps-fréquence les plus connues ont été présentées, à savoir la transformée de Fourier à court terme (TFCT) et la distribution de Wigner-Ville (DWV). Comme nous l'avons indiqué, les deux techniques présentent des inconvénients importants qui portent sur une résolution fixe et faible pour la TFCT et sur la présence d'interférences quadratiques pour la DWV. Celles-ci peuvent considérablement réduire la qualité des représentations et, par là même, la capacité d'extraire correctement l'énergie des signaux.

C'est pourquoi nous proposons d'analyser les données d'accélération par une *transformée en ondelettes continue* qui, grâce à ses atomes de temps-fréquence *flexibles*, présente une bonne lisibilité sans produire d'interférences (cf. section 2.5.3).

La transformée en ondelettes continue (TOC) est une technique employée pour décomposer un signal sur une base de fonctions appelées *ondelettes*. Le concept est en quelque sorte similaire à la transformée de Fourier, où des sinusoides sont utilisées pour décomposer un signal par son spectre de fréquences.

Cependant, contrairement aux sinusoides, les ondelettes sont des fonctions réelles ou complexes *d'énergie finie*, bien localisées en temps *et* en fréquence, et qui permettent ainsi de réaliser l'analyse temps-fréquence d'un signal. Elles sont obtenues à partir d'une fonction prototype appelée *ondelette mère*, par des translations temporelles, ou par des opérations de mise à l'échelle, e.g. dilatation ou compression de l'ondelette mère. En conséquence, dans le contexte de l'analyse en ondelettes, le concept de *fréquence* est remplacé par la notion *d'échelle*. Même si, dans le principe, ces deux concepts sont différents, une relation d'équivalence, que nous présenterons plus tard, existe pour les relier.

Ainsi, la transformée en ondelettes continue peut être considérée comme le produit scalaire entre un signal d'énergie finie $f(t) \in L^2(\mathcal{R})$, et des versions translattées et mises à l'échelle d'une ondelette mère ψ :

$$C_f(\sigma, b) = \frac{1}{\sqrt{|\sigma|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{\sigma} \right) dt \quad (3.5)$$

où σ représente l'échelle, b la translation temporelle, ψ^* la conjuguée de l'ondelette mère ψ , et $1/\sqrt{|\sigma|}$ est un facteur de normalisation de l'énergie de l'ondelette [Farge 1992]. Il convient de noter que des valeurs du paramètre d'échelle $\sigma < 1$ entraînent une *compression* de l'ondelette, alors que des valeurs $\sigma > 1$ entraînent une *dilatation*.

En faisant varier le paramètre d'échelle σ et la translation temporelle b , nous obtenons la représentation, dans l'espace temps-échelle, de la similarité entre le signal $f(t)$ et les différentes versions de l'ondelette ψ . Notons aussi, que l'équation 3.5 peut être interprétée comme une opération de filtrage linéaire avec des noyaux *passes-bande* [Rioul 1991].

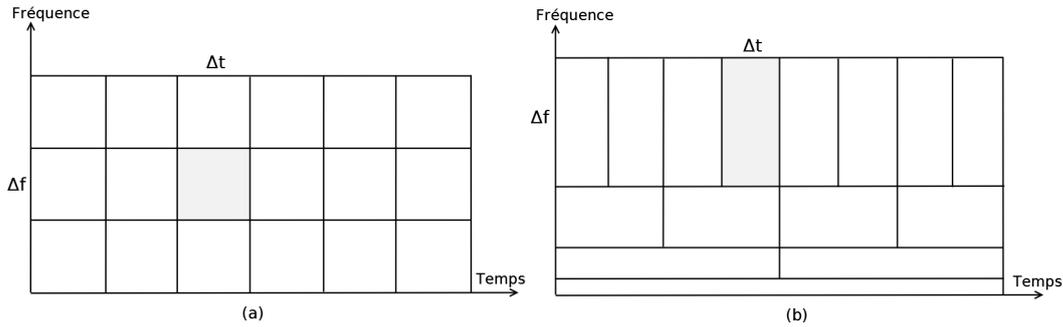


FIGURE 3.4 – Résolution temps-fréquence pour la TFCT (a) et la TOC (b).

Les dilatations et compressions de l'ondelette mère conduisent à une altération simultanée de ses caractéristiques fréquentielles *et* temporelles (voir figure 3.7). Ainsi, les versions mises à l'échelle de l'ondelette mère agissent comme des fenêtres d'analyse caractérisées par une résolution temps-fréquence *flexible*, c.à.d. la résolution temps-fréquence de la fenêtre d'analyse change avec σ . Cette résolution flexible de la TOC, illustrée dans la figure 3.4 en la comparant avec la résolution fixe de la TFCT, permet donc une analyse temporelle précise à hautes fréquences (au détriment d'une résolution en fréquence faible) et une analyse fréquentielle précise à basses fréquences (au prix d'une mauvaise résolution temporelle).

Condition d'admissibilité d'une ondelette. Comme nous l'avons déjà mentionné, l'ondelette est essentiellement une fonction d'énergie finie, i.e. $\psi \in L^2(\mathbb{R})$. Néanmoins, cette restriction n'est pas suffisante pour permettre la reconstruction du signal $f(t)$ à partir de ses coefficients TOC, condition fondamentale pour que la transformée en ondelettes continue soit *inversible*.

Ainsi, pour être considérée comme ondelette, une fonction ψ doit satisfaire la condition d'admissibilité énoncée ci-dessous [Vetterli 1995] :

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (3.6)$$

où $\omega = 2\pi\nu$ [rad/s] est la pulsation correspondante à la fréquence ordinaire ν [Hz], $\hat{\psi}$ est la transformée de Fourier de ψ , et C_ψ est appelée *constante d'admissibilité de l'ondelette*.

L'équation 3.6 implique que, pour que ψ soit considérée comme une ondelette, sa transformée de Fourier doit s'annuler à l'origine, ou autrement dit, que ψ est une fonction de moyenne nulle :

$$\int \psi(t) dt = 0; \quad (3.7)$$

Notons néanmoins que, pour des raisons pratiques, il est parfois utile d'accepter comme ondelettes des fonctions qui ne respectent pas cette condition avec une *faible* marge, si elles possèdent des propriétés intéressantes pour une application considérée.

3.4.2 Le scalogramme

Nous rappelons que notre objectif est de représenter la répartition de l'énergie des signaux vibrotactiles dans l'espace temps-fréquence. Une fois que le choix de l'ondelette est fait, ces représentations peuvent être facilement obtenues à l'aide des coefficients de la transformée en ondelette continue, c.à.d. l'équation 3.5.

La condition d'admissibilité d'une ondelette nous garantit que le signal original $f(t)$ peut être reconstruit à partir de ces coefficients TOC. Ainsi, il peut être démontré qu'en utilisant une ondelette *admissible*, la TOC conserve l'énergie du signal [Grossmann 1984, Farge 1992]. A cet égard, il est important de préciser que même si l'ensemble des fonctions $\psi\left(\frac{t-b}{\sigma}\right)$, $\forall \sigma, b$, sur lesquelles le signal est décomposé, ne constitue pas une base orthonormée *per se* (en raison de sa redondance élevée), il se comporte comme tel, ce qui permet à la TOC de préserver l'énergie du signal [Rioul 1991].

La conservation de l'énergie par la TOC se traduit par les équations suivantes :

$$E_f = \int |f(t)|^2 dt = \frac{1}{C_\psi} \iint |C_f(\sigma, b)|^2 \frac{d\sigma db}{\sigma^2} \quad (3.8)$$

Ainsi, $|C_f(\sigma, b)|^2$, $\forall \sigma, b$ représente la distribution d'énergie du signal dans l'espace temps-échelle, et est appelé *scalogramme* par analogie avec le spectrogramme de la TFCT. La figure 3.5 illustre le scalogramme d'un signal synthétique composé de cinq modes Gaussiens, utilisé aussi dans les figures 2.15 et 2.17. Comme nous pouvons le constater, contrairement aux représentations 2.15 et 2.17, la TOC, grâce à ses atomes temps-fréquence flexibles, arrive à bien séparer les cinq modes en temps *et* en fréquence, et la représentation ne présente pas d'interférences. Le scalogramme d'un signal d'accélération issu du banc haptique est représenté dans la figure 3.6, dans laquelle la distribution de ses patterns d'énergie dans l'espace temps-échelle est clairement visible.

La conservation de l'énergie présentée dans l'équation 3.8 est une relation *globale*, définie sur l'ensemble de l'espace temps-échelle. Cependant, la TOC permet aussi de retrouver l'énergie *locale*, répartie à chaque échelle σ , comme suit [Farge 1992] :

$$E(\sigma) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} |C_f(\sigma, b)|^2 \frac{db}{\sigma^2} \quad (3.9)$$

En conséquence, à l'aide de cette relation *locale* de conservation, le scalogramme permet l'extraction de l'énergie du signal à une échelle donnée, ou dans un intervalle *continu* $[\sigma_{min}, \sigma_{max}]$. Étant donné que l'échelle et la fréquence sont reliées par une relation directe, nous disposons ainsi d'un outil mathématique robuste pour extraire sélectivement l'énergie des signaux dans une certaine bande de fréquences *et* pour tout le domaine temporel. On peut noter aussi que l'extraction de l'énergie à l'aide de la TOC a été déjà utilisée pour le diagnostic des machines tournantes, et a permis d'en améliorer la détection des défauts [Yan 2009].

En ce qui concerne l'extraction d'énergie, il est important de préciser que l'analyse *continue* effectuée par la TOC pour n'importe quelle échelle $\sigma \in \mathfrak{R} \setminus \{0\}$, la distingue des autres techniques d'analyse temps-échelle, telles que la transformée en ondelette discrète (TOD) ou la transformée en ondelette stationnaire (TOS) [Mallat 1999]. Ces deux

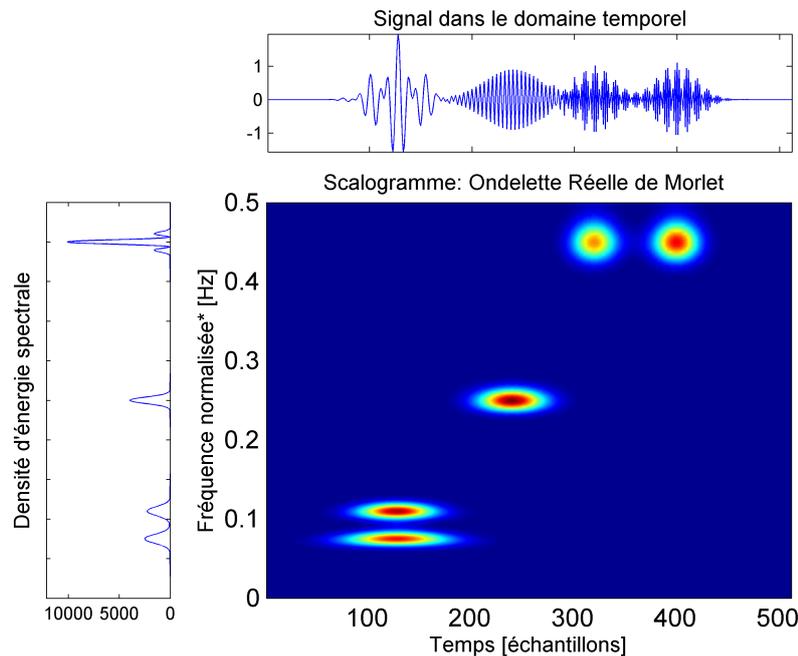


FIGURE 3.5 – Scalogramme d’un signal composé de cinq modes Gaussiens en utilisant la fonction d’ondelette de *Morlet*. (*) L’axe vertical est donné en fréquence normalisée et non en échelle pour faciliter la comparaison avec les figures 2.15 et 2.17. La fréquence normalisée est obtenue avec la relation échelle-fréquence (équation 3.11). Représentations obtenues avec la *Toolbox Temps-Fréquence* de Matlab [Auger 1996]. Le code couleur est le suivant : faible énergie en bleu foncé ; haute énergie en rouge foncé.

dernières techniques emploient généralement des échelles dyadiques⁶, i.e. $\sigma = 2^i \sigma_0, \forall i$, qui, bien que conduisant à une décomposition orthogonale, ne permettent pas l’extraction de l’énergie dans une bande de fréquences arbitrairement choisie. Ainsi, nous considérons que ces techniques ne sont pas adaptées pour l’étude des signaux vibrotactiles pour lesquels une analyse *continue* de l’évolution temps-fréquence est requise.

Choix de l’ondelette. Par les conditions définies dans l’équation 3.6, l’ondelette peut être décrite comme une fonction oscillante de moyenne nulle et qui est aussi localisée en fréquence, i.e. de bande limitée. Ainsi, il est clair qu’il existe un nombre potentiellement infini de fonctions qui peuvent être considérées comme des *ondelettes*. Les ondelettes les plus utilisées en pratique incluent, sans être exhaustif, les ondelettes de *Daubechies*, l’ondelette de *Meyer*, l’ondelette de *Morlet*, les *Coiflets*, l’ondelette de *Haar*, le *Chapeau Mexicain* [Truchetet 1998].

Se pose alors la question du choix de la meilleure ondelette pour une application donnée. Une manière de répondre à cette question est de choisir l’ondelette qui ressemble le

⁶La TOD est dyadique en échelle *et* en temps, alors que la TOS est dyadique en échelle, mais continue en temps.

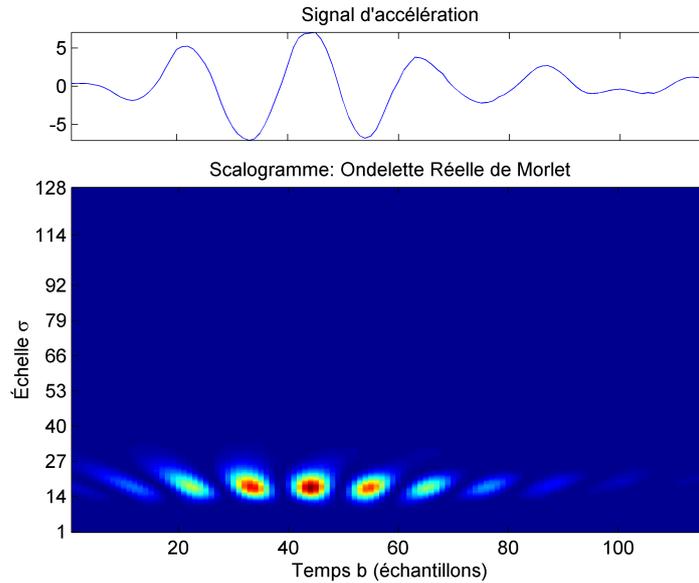


FIGURE 3.6 – Scalogramme du signal d’accélération *effective* illustrée dans la figure 3.3 en utilisant l’ondelette de *Morlet* pour l’échelle $\sigma \in [1, 128]$.

plus aux signaux à analyser. En effet, vu que la TOC, définie par l’équation 3.5, mesure le degré de similarité entre $f(t)$ et les différentes versions de ψ , une ondelette qui ressemble aux signaux sera capable de mieux les représenter dans l’espace temps-échelle.

Pour cette raison, dans le contexte de nos travaux nous avons choisi l’ondelette réelle de *Morlet*, définie par l’équation 3.10. Néanmoins, nous devons noter que le choix de l’ondelette n’est pas vraiment crucial et que des représentations *qualitativement* similaires sont obtenues avec différentes ondelettes [Torrence 1998].

$$\psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} \cos(5t) \quad (3.10)$$

L’ondelette réelle de *Morlet* est illustrée à l’échelle $\sigma = 1$ dans la figure 3.7 a. Une dilatation par $\sigma = 2$ et une compression par $\sigma = 0.5$ sont aussi représentées, respectivement dans les figures 3.7 b et 3.7 c. Il est intéressant de noter la ressemblance entre l’ondelette mère de *Morlet* et les données d’accélération du banc haptique devant être analysées (voir figure 3.3). Cependant, il faut préciser que même si l’ondelette réelle de *Morlet* ne respecte pas la condition 3.7 par une *très faible* marge, en pratique elle peut être considérée *admissible* et donc peut être employée pour l’analyse des signaux discrétisés.

Relation échelle-fréquence. Sur les scalogrammes obtenus par la TOC, l’axe vertical est lié aux dilatations et compressions appliquées à l’ondelette ψ pour analyser le signal à différentes *échelles*. Comme nous pouvons le constater dans la figure 3.7, la compression de l’ondelette correspond à un accroissement de sa fréquence centrale, et la dilatation de l’ondelette correspond à une diminution. On peut donc dire que les notions *d’échelle* et *fréquence* sont dans une relation *inverse*.

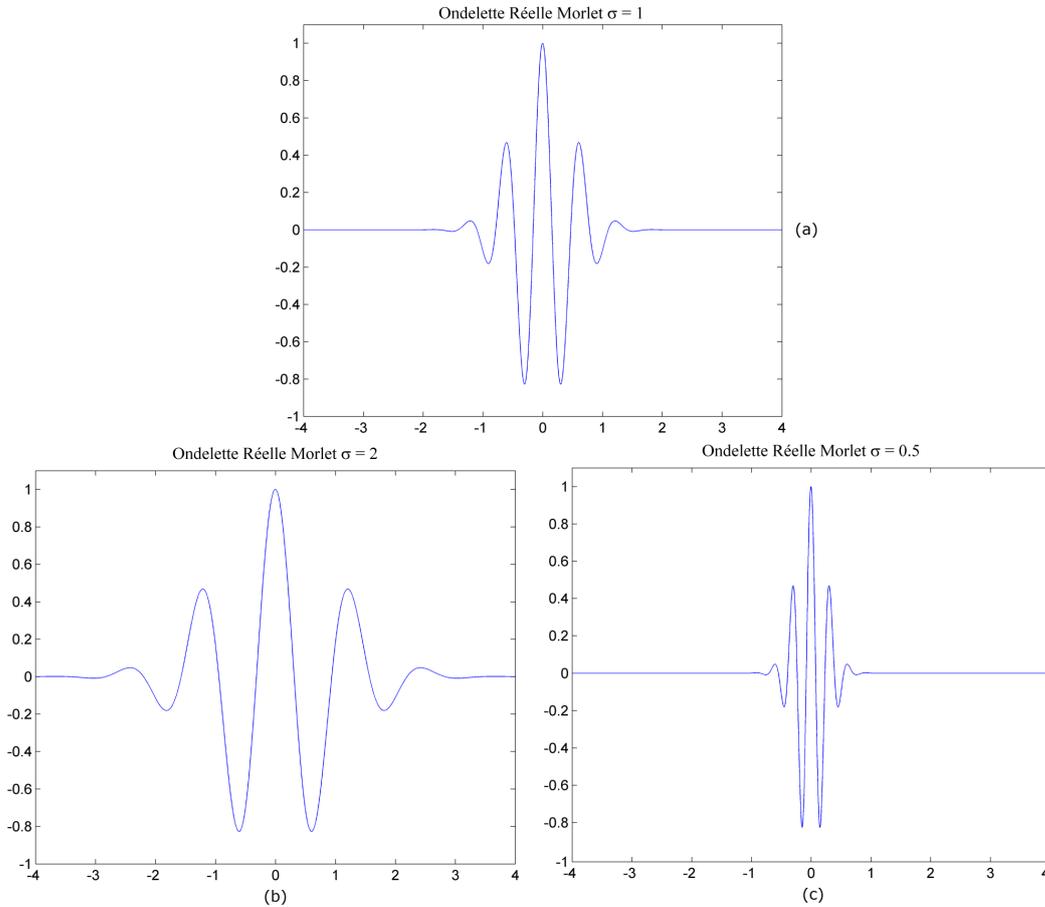


FIGURE 3.7 – Illustration de l'ondelette de *Morlet* pour différentes échelles : (a) l'ondelette mère, i.e. $\sigma = 1$; (b) dilatation de l'ondelette mère par $\sigma = 2$; (c) compression de l'ondelette mère par $\sigma = 0.5$.

Dans le cas de la TOC discrétisée⁷, la fréquence approximative F_σ correspondant à l'échelle σ est donnée par la relation suivante [Misiti 1997] :

$$F_\sigma = \frac{F_c}{\sigma\Delta} \quad (3.11)$$

où, Δ représente la période d'échantillonnage, et F_c est la fréquence centrale de l'ondelette, définie par :

$$F_c = \arg \max_{\omega} \{|\hat{\psi}(\omega)|\} \quad (3.12)$$

où $\hat{\psi}$ la transformée de Fourier de ψ .

Notons néanmoins que cette relation dépend à la fois de l'ondelette mère utilisée (ψ) et de la fréquence d'échantillonnage des données (Δ). Ainsi pour les mêmes données analysées, des valeurs ($F_\sigma \leftrightarrow \sigma$) différentes peuvent être obtenues avec différentes ondelettes.

⁷La TOC *discrétisée* est une version approchée de la TOC utilisée pour l'analyse des signaux réels discrets, i.e. échantillonnés. Elle *ne doit pas* être confondue avec la transformée en ondelette discrète (TOD).

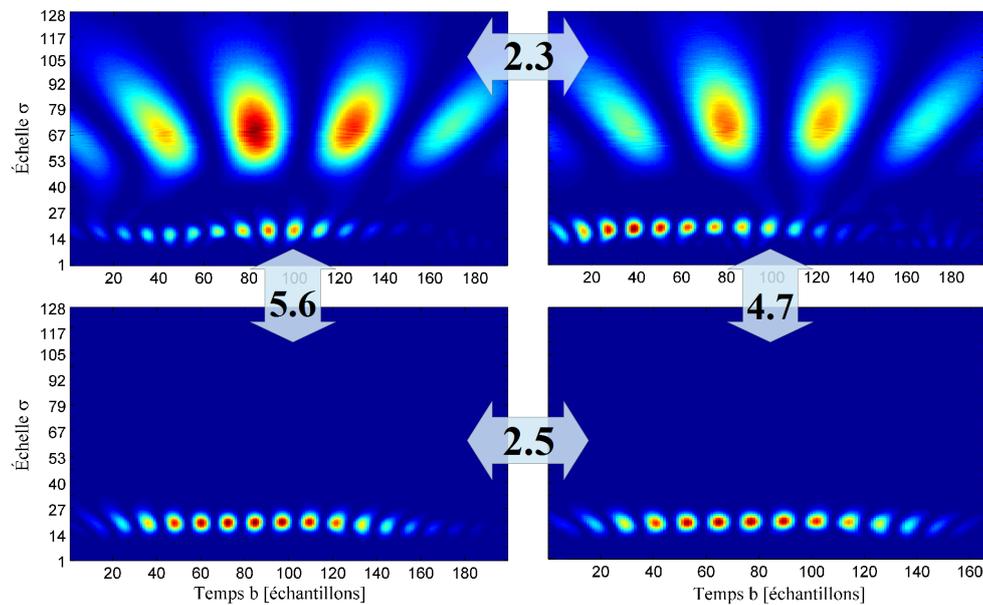


FIGURE 3.8 – Scalogrammes pour 4 signaux d’accélération du banc haptique, obtenus avec l’ondelette réelle de *Morlet* pour $\sigma \in [1, 128]$. La dissimilarité perceptuelle entre les signaux, telle qu’évaluée par les utilisateurs, est aussi affichée sur les flèches.

Intérêt du scalogramme. Les avantages de la TOC par rapport à d’autres techniques d’analyse temps-fréquence, telles que TFTC, DWV, ou temps-échelle, e.g. TOD, TOS, ont été brièvement discutés ci-dessus dans le contexte des signaux vibrotactiles. Le scalogramme, la représentation la plus pertinente de la TOC, peut être vu comme une sorte de *carte d’énergie* du signal, qui présente la répartition des patterns d’énergie dans l’espace temps-échelle.

La figure 3.8 présentent les scalogrammes de l’accélération effective pour 4 signaux vibrotactiles. L’index des signaux est le suivant : 1 (haut à gauche), 7 (haut à droite), 12 (bas à gauche), 6 (bas à droite). La distance perceptuelle entre les signaux (voir Annexe A.2 et Tableau A.2) est indiquée sur les flèches. Nous pouvons ainsi remarquer que la différence *visuelle* entre les scalogrammes est en conformité avec la dissimilarité *perceptuelle* entre les signaux vibratoires. Métaphoriquement parlant, le scalogramme peut être ainsi considéré comme *l’empreinte digitale* d’un signal.

Ainsi, l’analyse visuelle des scalogrammes révèle l’existence d’un certain lien entre les caractéristiques physiques des signaux vibrotactiles, c.à.d. leur accélération effective, et leurs propriétés perceptuelles. Dans la section suivante, le scalogramme sera utilisé pour quantifier l’activation neuronale du canal P.

3.5 Quantification de l'activation du canal Pacinien

Comme nous l'avons déjà mentionné dans la section 2.4.6, le canal P intègre l'énergie du stimulus au fil du temps et dans la plage de fréquences [40 Hz, 800 Hz]. Néanmoins, un certain chevauchement en fréquence existe entre le canal P et le canal NP I (voir la section 2.4.5). Afin de résoudre cette ambiguïté, le point-milieu de l'intervalle de chevauchement en fréquence a été retenu pour délimiter les deux canaux (voir la section 2.4.7). Ainsi, les plages de sensibilité en fréquence (PSF) des deux canaux sont :

$$\begin{aligned} PSF^P &\approx [70 \text{ Hz}, 800 \text{ Hz}]; \\ PSF^{NP I} &\approx [10 \text{ Hz}, 70 \text{ Hz}]; \end{aligned} \quad (3.13)$$

Pour pouvoir extraire, à l'aide du scalogramme, l'énergie des signaux vibrotactiles accumulée dans la plage de fréquence du canal P, les limites associées doivent être d'abord converties en échelles, en utilisant la relation échelle-fréquence décrite ci-dessus. A cette fin, la fréquence centrale (F_c) de l'ondelette de *Morlet* a été déterminée en utilisant l'équation 3.12 :

$$F_c^{Morlet} = \max_{\omega} \{|\hat{\psi}(\omega)|\} \approx 0.81 \text{ Hz}; \quad (3.14)$$

Ainsi, les limites en échelle du canal P, en utilisant l'ondelette de *Morlet*, sont :

$$\sigma_{70 \text{ Hz}} = 59; \quad \sigma_{800 \text{ Hz}} = 5; \quad (3.15)$$

où la période d'échantillonnage pour les données d'accélération est fixée à $\Delta = \frac{1}{F_s} = 0.2 \text{ ms}$ (voir l'équation 3.1).

Dans de telles conditions, en utilisant le scalogramme et une version numérisée de l'équation 3.9, l'énergie encodée par le canal P est :

$$E_P = \frac{1}{C_{\psi}} \sum_{\sigma=5}^{59} \left(\sum_b \frac{|C_f(\sigma, b)|^2}{\sigma^2} \right)^{a(\sigma)} \quad (3.16)$$

où C_{ψ} est la constante d'admissibilité de l'ondelette, définie par l'équation 3.6, et $a(\sigma)$ représente l'exposant de la loi de puissance de Stevens (voir la section 2.4.3), qui relie la magnitude physique à la magnitude perçue.

Comme indiqué dans la section 2.4.3, pour le sens tactile, l'exposant a diminue quasi-linéairement avec la fréquence, c.à.d. il augmente avec l'échelle. Les études que nous avons réalisées dans le contexte des signaux vibratoires issus des interfaces tactiles, ont révélés que l'exposant a augmente linéairement entre⁸ $a(\sigma = 5) = 0.4$ et $a(\sigma = 59) = 0.65$. Bien que les valeurs trouvées soient légèrement supérieures à celles rapportées dans la littérature et synthétisées dans la figure 2.9, elles restent dans le même ordre de grandeur ; l'écart peut être attribué à la différence entre les dispositifs expérimentaux utilisés ou entre les procédures expérimentales employées.

Le terme $1/C_{\psi}$, est un scalaire qui ne dépend que de l'ondelette d'analyse choisie. Pour cette raison, et afin de simplifier le calcul, il peut être ignoré.

⁸Les valeurs indiquées se réfèrent aux exposants pour l'énergie. Pour trouver les valeurs correspondant à l'amplitude il suffit de les multiplier par deux. Voir la section 2.4.3 pour plus de détails.

Validation par la matrice de dissimilarité. En modélisant les aspects psychophysiques du sens tactile par des techniques de traitement de signal, la relation 3.16 a été proposée pour déterminer la quantité d'énergie délivrée au canal P, variable qui est présumée refléter son activation neuronale.

Pour valider cette hypothèse, nous proposons de déterminer une *matrice de dissimilarité des scalogrammes*, ajustée pour le canal P, et de la comparer avec la matrice de dissimilarité perceptuelle D_P , déterminée expérimentalement (cf. section 3.2.3). Vu que cette matrice s'appuie sur la comparaison entre scalogrammes, il est important de préciser dans quelles conditions deux (ou plusieurs) scalogrammes sont directement comparables :

- le même axe d'échelles est utilisé, c.à.d. les limites et le pas de discrétisation ;
- la même ondelette est utilisée ;
- les signaux temporels associées aux scalogrammes ont *la même longueur* ;

Il est clair que dans le cadre de nos travaux les deux premières consignes sont automatiquement respectées. Cependant, la troisième *n'est pas* respectée, vu que la durée de l'accélération effective peut varier beaucoup d'un signal à un autre (voir Tableau B.1).

Ainsi, pour pouvoir les comparer, les scalogrammes sont ramenés à la même longueur nominale N par interpolation linéaire. Afin de préserver l'énergie du signal après cette normalisation, les coefficients TOC normalisés sont multipliés par le rapport entre la durée originale du signal (N_0) et la durée nominale N :

$$C_f^N(\sigma, b) = C_f^N(\sigma, b) \frac{N_0}{N} \quad (3.17)$$

où C_f^N représentent les coefficients TOC du signal f , normalisés à la durée nominale N .

Avec les coefficients TOC normalisés, et en appliquant une mesure de dissimilarité utilisée à cette fin dans [Bensmaia 2005], la matrice de dissimilarité des scalogrammes, adaptée pour le canal P, prend la forme suivante :

$$D_{En}(i, j) = \frac{\sum_{\sigma=5}^{59} \left(\sum_b \left| \frac{|C_i^N(\sigma, b)|^2}{\sigma^2} - \frac{|C_j^N(\sigma, b)|^2}{\sigma^2} \right| \right)^{a\sigma}}{E_P(i) + E_P(j)}; \quad \forall i, j \quad (3.18)$$

où $E_P(i)$ et $E_P(j)$ sont calculés avec l'équation 3.16, en utilisant respectivement les coefficients TOC normalisés, C_i^N et C_j^N .

La dissimilarité ci-dessus est appelée aussi dissimilarité de *Bray-Curtis*, et représente une mesure de ressemblance semi-métrique⁹, habituellement utilisée en écologie et sciences environnementales [Clarke 2006].

En conséquence, chaque élément $D_{En}(i, j)$ représente la dissimilarité entre les signaux i et j sur la base de leur énergie Paciniene. Étant donné que la dissimilarité *Bray-Curtis* est une semi-métrique, elle respecte l'axiome de séparabilité, c.à.d. $d(a, a) = 0$, et la propriété

⁹Comme la dissimilarité *Bray-Curtis* ne respecte pas l'inégalité triangulaire, c.à.d. $d(a, c) \leq d(a, b) + d(b, c)$, elle ne peut pas être une vraie métrique. Étant donné qu'elle respecte les autres propriétés d'une métrique (séparabilité et symétrie), c'est une semi-métrique.

de symétrie, c.à.d. $d(a, b) = d(b, a)$. Ces deux propriétés impliquent que la matrice D_{En} est *symétrique* et à *diagonale nulle*. Ainsi elle a la même structure que la matrice de dissimilarité perceptuelle D_P , et les deux peuvent être directement comparées. Cette comparaison sera détaillée dans la section 3.8.2 pour évaluer dans quelle mesure la variable E_P reflète l'activation neuronale du canal P.

3.6 Quantification de l'activation du canal Non-Pacini I

La vitesse des stimuli vibratoires est une des variables qui, selon [Looft 1996], reflète l'activation des corpuscules de Meissner, associés au canal Non-Pacini I (NP I), comme indiqué dans la section 2.4.5.

Étant donné que nous ne disposons pas des mesures de vitesse sur le banc haptique, elles sont obtenues, pour chaque signal vibrotactile, à partir des données d'accélération effective, par intégration numérique, comme nous pouvons le voir dans la figure 3.9 pour le signal vibrotactile numéro 5. Compte tenu du facteur élevé de suréchantillonnage, la méthode du trapèze a été employée pour réaliser l'intégration numérique de l'accélération.

Comme nous l'avons déjà évoqué dans la section 2.4.7, afin de raffiner ce modèle, Sliman Bensmaia propose dans [Bensmaia 2002] de ne prendre en compte que la vitesse *positive* du stimulus qui, dans notre cas, correspond à un mouvement de la dalle tactile vers le doigt de l'utilisateur.

Étant donné que les canaux P et NP I sont complémentaires en fréquence (voir la figure 2.10) et que les signaux vibrotactiles utilisés activent les deux canaux simultanément, nous proposons de normaliser la vitesse positive du stimulus par le pourcentage d'énergie qui est délivrée dans la plage de sensibilité du canal NP I, c.à.d. w_{NP} :

$$w_{NP} = \frac{E_{NP}}{E_P + E_{NP}} \quad (3.19)$$

où E_{NP} représente la quantité d'énergie accumulée dans la plage de fréquence du canal NP I, c.à.d. [10 Hz, 70 Hz].

Afin de calculer E_{NP} à l'aide du scalogramme, les limites en fréquences doivent être converties en échelles avec la relation échelle-fréquence. Pour l'ondelette de *Morlet*, avec la fréquence centrale définie ci-dessus et une période d'échantillonnage $\Delta = 0.2ms$, ces limites sont :

$$\sigma_{10 \text{ Hz}} = 375; \quad \sigma_{70 \text{ Hz}} = 59; \quad (3.20)$$

Pour le canal NP I, l'exposant $a(\sigma)$ est approximativement linéairement croissant entre $a(\sigma = 59) = 0.65$ et $a(\sigma = 375) = 0.75$. Il a été déterminé par une extension linéaire¹⁰ de l'intervalle déterminé pour le canal P. Dans ces conditions, E_{NP} devient :

$$E_{NP} = \sum_{\sigma=59}^{370} \left(\sum_b \frac{|C_f(\sigma, b)|^2}{\sigma^2} \right)^{a(\sigma)} \quad (3.21)$$

¹⁰L'extension linéaire réalisée est basée sur les limites en fréquence et non pour l'échelle.

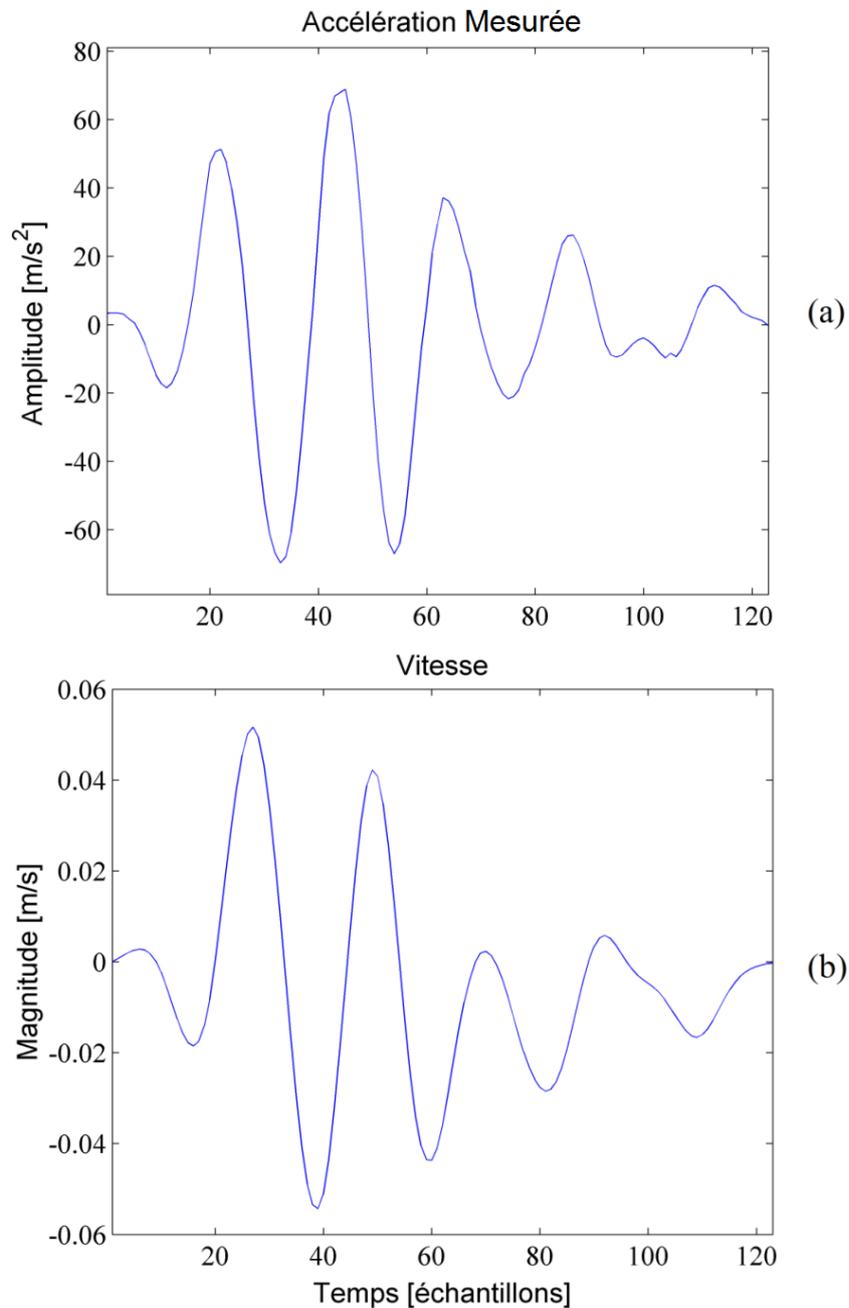


FIGURE 3.9 – Données d'accélération effective (a) et de vitesse (b) pour un signal vibrotactile issu du banc haptique. La représentation temporelle de la vitesse est obtenue par intégration numérique des données d'accélération.

L'énergie délivrée au canal P, i.e. E_P , est calculée à partir de l'équation 3.16 en utilisant les valeurs des exposants $a(\sigma)$ définies dans la section 3.5 pour le canal P, i.e. $a(\sigma = 5) = 0.4$ et $a(\sigma = 59) = 0.65$;

Ainsi, pour refléter l'activation neuronale du canal NP I, la somme des vitesses positives est normalisée par w_{NP} , comme indiqué dans l'équation 3.22. Cette normalisation fait que la contribution relative de chaque canal est respectée. Notons que pour le canal P, cette normalisation est déjà *incluse* dans la définition de sa variable caractéristique, i.e. E_P , qui est ciblée pour la gamme de fréquence du canal P.

$$\bar{V}^+ = w_{NP} \sum_t v(t); \quad \forall t \text{ tel que } v(t) > 0 \quad (3.22)$$

Afin de valider l'utilité de \bar{V}^+ comme variable caractéristique pour le canal NP I, nous avons construit une matrice de dissimilarité à partir de données de vitesses, par analogie avec la matrice de dissimilarité des scalogrammes déterminée par l'équation 3.18 pour le canal P. Cette matrice s'appuie sur des comparaisons entre les vitesses positives normalisées des signaux. Elle est définie comme suit :

$$D_V(i, j) = \frac{\sum_t |w_{NP}^i v_i(t) - w_{NP}^j v_j(t)|}{\bar{V}_i^+ + \bar{V}_j^+}; \quad \forall i, j \quad (3.23)$$

où w_{NP}^i et w_{NP}^j représente le pourcentage d'énergie délivrée au canal NP I pour les signaux i et j respectivement, calculé avec la relation 3.19, et les scalaires \bar{V}_i^+ et \bar{V}_j^+ sont déterminés avec l'équation 3.22.

Pour les calculs de dissimilarité, toutes les vitesses positives $v_i(t)$, $\forall i$ sont ramenées à la même durée nominale N par interpolation linéaire. L'étape d'interpolation est suivie d'une étape de conservation d'énergie, comme indiqué dans l'équation 3.17 pour les coefficients TOC.

Il est évident que D_V , est une matrice symétrique et à diagonale zéro, où $D_V(i, j)$ représente la dissimilarité entre les vitesses positives normalisées des signaux i et j . Ainsi, D_V est compatible avec la matrice de dissimilarité perceptuelle D_P , ce qui nous permet de les comparer facilement entre elles. Comme pour D_{En} , la comparaison entre D_V et D_P est présentée dans la section 3.8.2.

3.7 Index de complexité du scalogramme

Les quatre scalogrammes présentés dans la figure 3.8 montrent que la dissimilarité perceptuelle entre les signaux vibrotactiles semble être liée, dans une certaine mesure, à la *complexité* des scalogrammes sur tout l'axe des échelles couvrant les gammes des deux canaux P et NP I. Même si une partie importante de cette dissimilarité entre les signaux est prise en compte par les deux variables définies ci-dessus, i.e. E_P et \bar{V}^+ , plusieurs raisons incitent à considérer l'utilité d'une variable supplémentaire pour caractériser les signaux vibrotactiles :

- E_P et \bar{V}^+ , telles que définies par les équations 3.16 et 3.22, sont représentatives uniquement pour leur propre canal, et aucun *couplage* entre les deux canaux n'est reflété par ces variables ;

- E_P et \bar{V}^+ sont fondamentalement basées sur des mesures de magnitude, et elles ne distinguent pas la complexité spectrale des signaux ;
- plusieurs études disponibles dans la littérature (voir [Bensmaia 2005, Muniak 2007]) montrent que la complexité spectrale influe de manière non négligeable sur la discrimination des stimuli vibrotactiles ;

Ces trois arguments corroborent ainsi l'observation visuelle sur la figure 3.8. En conséquence, dans la section suivante, nous proposons un *index de complexité du scalogramme*, abrégé *ICS*, comme troisième variable caractéristique pour évaluer la complexité spectrale des signaux et aussi pour refléter le couplage cognitif à haut niveau entre les canaux P et NP I.

3.7.1 Définition

Pour définir l'index de complexité du scalogramme, nous proposons de déterminer l'entropie spectrale des signaux à l'aide de la TOC des données d'accélération. Vu que nous cherchons une mesure de complexité globale, l'entropie sera calculée sur tout l'axe des échelles, comme mentionné ci-dessus. Il est important de préciser qu'afin de pouvoir comparer les valeurs d'entropie spectrale pour différents signaux vibrotactiles, les mêmes limites et la même discrétisation de l'axe des échelles doivent être utilisées pour tous les signaux.

Notons que la mesure d'entropie spectrale, déterminée à partir de la TOC, a été déjà utilisée avec succès en médecine et neurosciences [Emre Cek 2010, Rosso 2001], et aussi en astronomie [Sello 2003].

L'entropie pour une séquence discrète X est définie comme suit :

$$H(X) = - \sum_i p_{x_i} \log_2(p_{x_i}) \quad (3.24)$$

où $H(X)$ est l'entropie de *Shannon* mesurée en *bits*, et p_{x_i} est la distribution de probabilité pour l'événement $x_i \in X$.

Nous rappelons que des valeurs faibles de l'entropie $H(X)$ caractérisent des processus ordonnés, moins complexes et réguliers, alors que des valeurs élevées sont caractéristiques des processus non ordonnés, complexes et irréguliers [Lay-Ekuakille 2014]. Ainsi, l'entropie reflète, dans une certaine mesure, le degré de complexité d'un processus défini par sa distribution de probabilité.

Comme nous l'avons déjà mentionné dans la section 3.4, le scalogramme représente la distribution d'énergie du signal dans l'espace temps-échelle. Ainsi, à partir du scalogramme nous pouvons obtenir une distribution de probabilité convenable par normalisation.

Soit E_σ l'énergie accumulée dans le scalogramme à l'échelle σ , définie par une version discrétisée de la relation 3.9 :

$$E_\sigma = \frac{1}{C_\psi} \sum_b \frac{|C_f(\sigma, b)|^2}{\sigma^2}; \quad (3.25)$$

L'axe des échelles considéré est le même pour tous les signaux, et couvre les gammes des canaux P et NP I, avec un pas de discrétisation $\Delta_\sigma = 1$:

$$\begin{aligned}\sigma_{min} &= \sigma_{800 \text{ Hz}} = 5; \\ \sigma_{max} &= \sigma_{10 \text{ Hz}} = 375;\end{aligned}\tag{3.26}$$

L'énergie totale accumulée dans le scalogramme, E_{Tot} , peut être définie comme la somme des énergies pour toutes les échelles :

$$E_{Tot} = \sum_{\sigma} E_{\sigma}; \quad \forall \sigma \in [\sigma_{min}, \sigma_{max}]\tag{3.27}$$

Dans ces conditions, en utilisant E_{σ} et E_{Tot} la fonction de masse de probabilité du scalogramme peut être définie comme :

$$P(\sigma) = \frac{E_{\sigma}}{E_{Tot}}; \quad \forall \sigma \in [\sigma_{min}, \sigma_{max}]\tag{3.28}$$

Mathématiquement, $P(\sigma)$ définit le pourcentage de l'énergie du signal accumulée à l'échelle σ . Il est donc évident que :

$$\sum_{\sigma_{min}}^{\sigma_{max}} P(\sigma) = 1\tag{3.29}$$

Notons encore une fois que la présence du terme $1/C_{\psi}$ dans l'identité 3.25 est superflue étant donné qu'il va être éliminé dans l'équation 3.28. Nous l'avons laissé afin que la définition de E_{σ} soit mathématiquement complète.

Ainsi, en utilisant la distribution de probabilité $P(\sigma)$, l'index de complexité du scalogramme (ICS) est défini à l'aide de l'entropie du Shannon comme suit :

$$H = ICS = - \sum_{\sigma_{min}}^{\sigma_{max}} P(\sigma) \log_2(P(\sigma)) \text{ [bits]}\tag{3.30}$$

Des valeurs élevées pour ICS sont caractéristiques des signaux à large bande, avec des scalogrammes complexes, alors que des valeurs faibles indiquent des signaux plus réguliers, à bande étroite.

Dans la figure 3.10 sont représentées les distributions de probabilité et leurs valeurs ICS pour les quatre scalogrammes présentés dans la figure 3.8. Comme nous pouvons le remarquer, la dissimilarité perceptuelle entre les signaux (affichée sur les flèches) est bien reflétée par la forme des fonctions de masse de probabilité, ainsi que par les valeurs ICS correspondantes. Ainsi, les deux courbes du haut présentent des fonctions masse de probabilité plus complexes et des valeurs pour l'indicateur ICS plus élevées, alors que les deux en bas sont plus ordonnées, et leur valeurs ICS sont plus faibles.

3.7.2 La divergence de Kullback-Leibler

L'index de complexité du scalogramme est défini ci-dessus comme une variable caractéristique complémentaire aux deux autres (E_P et \bar{V}^+), et qui reflète le couplage inter-canaux.

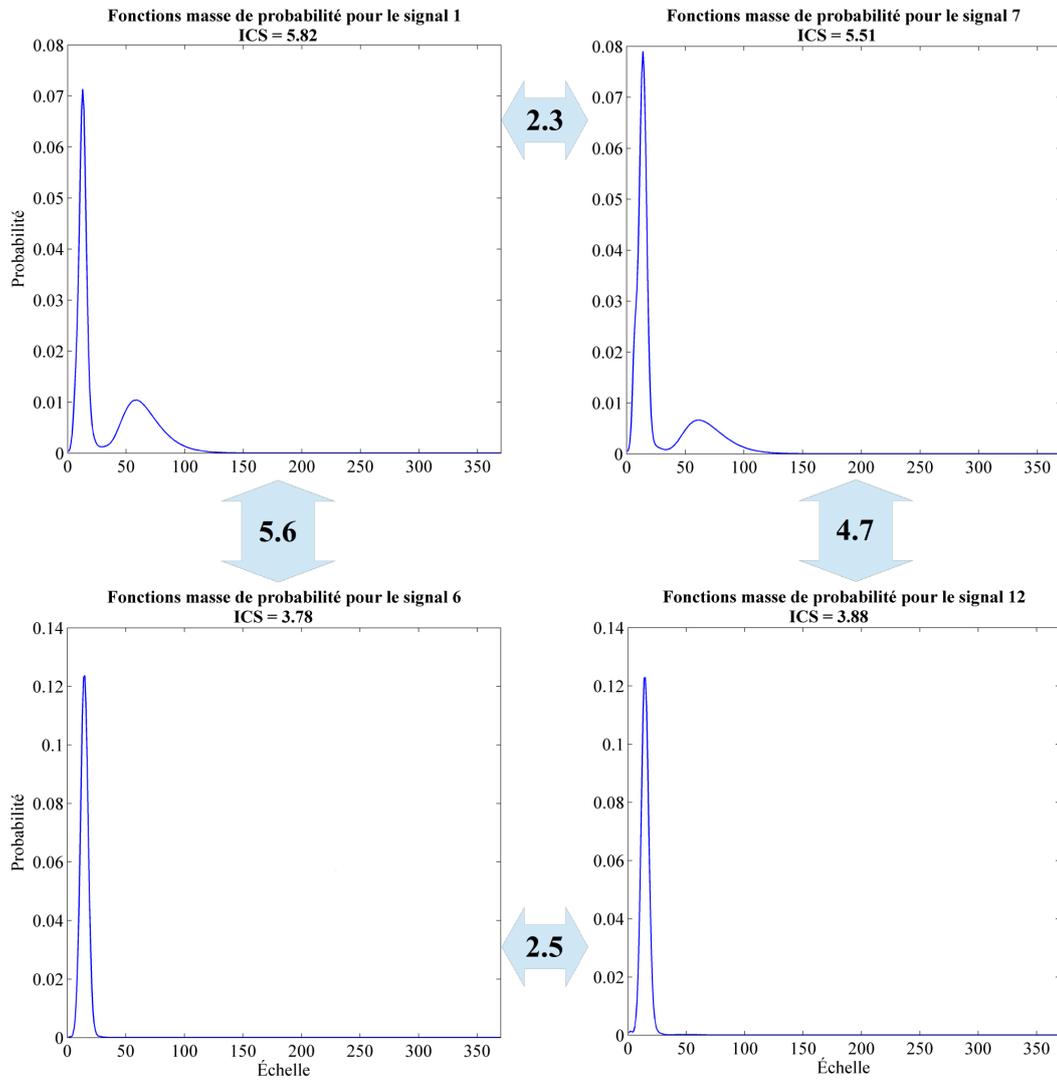


FIGURE 3.10 – Densité de probabilité et valeurs ICS associées pour les quatre scalogrammes illustrés dans la figure 3.8. La dissimilarité perceptuelle entre les signaux vibrotactile est indiquée sur les flèches.

Dans cette section, nous discuterons quelques aspects liés à la validation de cette variable pour les signaux vibrotactiles. L'objectif est donc de construire une matrice de dissimilarité, comme nous l'avons fait pour E_P et \bar{V}^+ , pour la comparer ensuite avec la matrice de dissimilarité perceptuelle D_P .

Ainsi, comme indiqué dans l'équation 3.30, ICS est défini à l'aide de la distribution de probabilité, $P(\sigma)$, $\forall \sigma \in [\sigma_{min}, \sigma_{max}]$, issue du scalogramme. Une manière d'évaluer la dissimilarité entre deux distributions de probabilité, $P(\sigma)$ et $Q(\sigma)$, définies sur le même univers de discours $\sigma \in [\sigma_{min}, \sigma_{max}]$, est d'utiliser la divergence de *Kullback–Leibler*, définie comme suit :

$$D_{KL}(P \parallel Q) = \sum_{\sigma_{min}}^{\sigma_{max}} \ln \left(\frac{P(\sigma)}{Q(\sigma)} \right) P(\sigma) \quad (3.31)$$

où $D_{KL}(P \parallel Q)$ représente la quantité d'information *perdue* si Q est utilisé pour approximer P [Burnham 2002].

Notons cependant que la divergence de *Kullback–Leibler* n'est pas une vraie distance au sens métrique, vue qu'elle n'est pas symétrique :

$$D_{KL}(P \parallel Q) \neq D_{KL}(Q \parallel P) \quad (3.32)$$

Cette limitation peut être dépassée en utilisant une version symétrisée de la divergence de *Kullback–Leibler*, définie comme suit [Moreno 2003] :

$$D_{KL}^S(P \parallel Q) = \sum_{\sigma_{min}}^{\sigma_{max}} \ln \left(\frac{P(\sigma)}{Q(\sigma)} \right) P(\sigma) + \sum_{\sigma_{min}}^{\sigma_{max}} \ln \left(\frac{Q(\sigma)}{P(\sigma)} \right) Q(\sigma) \quad (3.33)$$

L'équation ci-dessus implique :

$$D_{KL}^S(P \parallel Q) = D_{KL}^S(Q \parallel P), \quad \forall P, Q \quad (3.34)$$

De plus, il est évident que D_{KL}^S respecte l'axiome de séparabilité, vu que :

$$D_{KL}^S(P \parallel P) = \sum_{\sigma_{min}}^{\sigma_{max}} \ln(1) P(\sigma) = 0; \quad \forall P \quad (3.35)$$

Dans ces conditions, en calculant $D_{KL}^S(P_i \parallel P_j)$ pour toutes les distributions de probabilité des signaux vibrotactile, une matrice de dissimilarité *symétrique* et à *diagonale nulle* est obtenue ; elle sera appelé dorénavant D_{KL}^S .

Dans la section suivante, les trois matrices de dissimilarité *physique*, définies dans le cadre de ce chapitre, c.à.d. D_{En} , D_V et D_{KL}^S , seront directement comparées avec la matrice de dissimilarité *perceptuelle* D_P , afin d'évaluer la validité des trois variables caractéristiques des signaux vibrotactiles, c.à.d. E_P , \bar{V}^+ , et ICS .

3.8 Validation des variables caractéristiques

Les trois matrices de dissimilarité physiques ont la même structure que la matrice de dissimilarité perceptuelle, D_P , ce qui permet facilement de faire une comparaison directe entre elles. Nous rappelons que, comme mentionné dans la section 3.1, cette comparaison a deux objectifs principaux :

- un objectif *local* : de valider, une par une, les trois variables caractéristiques des signaux vibrotactiles ;
- un objectif *global* : de vérifier l'existence d'un lien entre les représentations subjective et objective des signaux ;

Il est évident que la validation du premier objectif implique le deuxième, mais la réciproque n'est pas vraie. En conséquence, afin d'atteindre ces *deux* objectifs, une validation locale des trois variables sera effectuée par une comparaison entre leurs matrices de dissimilarité et D_P .

3.8.1 Procédure de comparaison

Dans chaque matrice de dissimilarité physique, ainsi que dans D_P , les valeurs disposées sur la colonne i représentent la distance entre le signal i et tous les signaux de l'ensemble. Ainsi, notre procédure de comparaison sera fondée sur des corrélations colonne-par-colonne entre une matrice de dissimilarité physique, d'une part, et D_P , d'autre part, comme illustré dans la figure 3.11.

Dans le cadre de ces travaux, le coefficient de corrélation de *Pearson* a été utilisé pour mesurer la dépendance linéaire entre les caractéristiques objectives et les caractéristiques subjectives. Nous rappelons que le coefficient de corrélation de *Pearson* entre deux vecteurs $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ et $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ est :

$$r(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3.36)$$

où \bar{X} et \bar{Y} représentent respectivement les moyennes de vecteurs X et Y .

Ensuite, les corrélations individuelles pour chaque colonne, sont moyennées afin d'obtenir le degré global de dépendance entre les matrices. Une fonction moyenne pondérée peut être utilisée, si nous disposons d'informations *a priori* sur la typicité ou sur l'importance de certains signaux, pour les développements ultérieurs.

Exprimé en pourcentage, ce degré de dépendance offre une image quantitative du lien linéaire entre les deux représentation de signaux vibrotactiles : objective et subjective.

3.8.2 Résultats et discussions

Les résultats de corrélation entre les matrices de dissimilarité physiques, c.à.d. D_{En} , D_V et D_{KL}^S et la matrice de dissimilarité perceptuelle D_P sont groupés dans les Tableaux 3.3, 3.4 et 3.5 respectivement.

Étant donné que les trois matrices de dissimilarité présentées dans les sections précédentes s'appuient d'une manière ou d'une autre sur la TOC et sur le scalogramme, les résultats de corrélation ont été calculés pour plusieurs types d'ondelettes : *Morlet*, *Chapeau Mexicain*, *Coiflet 1*, *Meyer* et *Daubechies 4*. Dans ces conditions, pour chaque ondelette, l'échelle correspondante à la fréquence donnée est calculée avec la relation 3.11, sachant que la fréquence d'échantillonnage des données est $5kHz$.

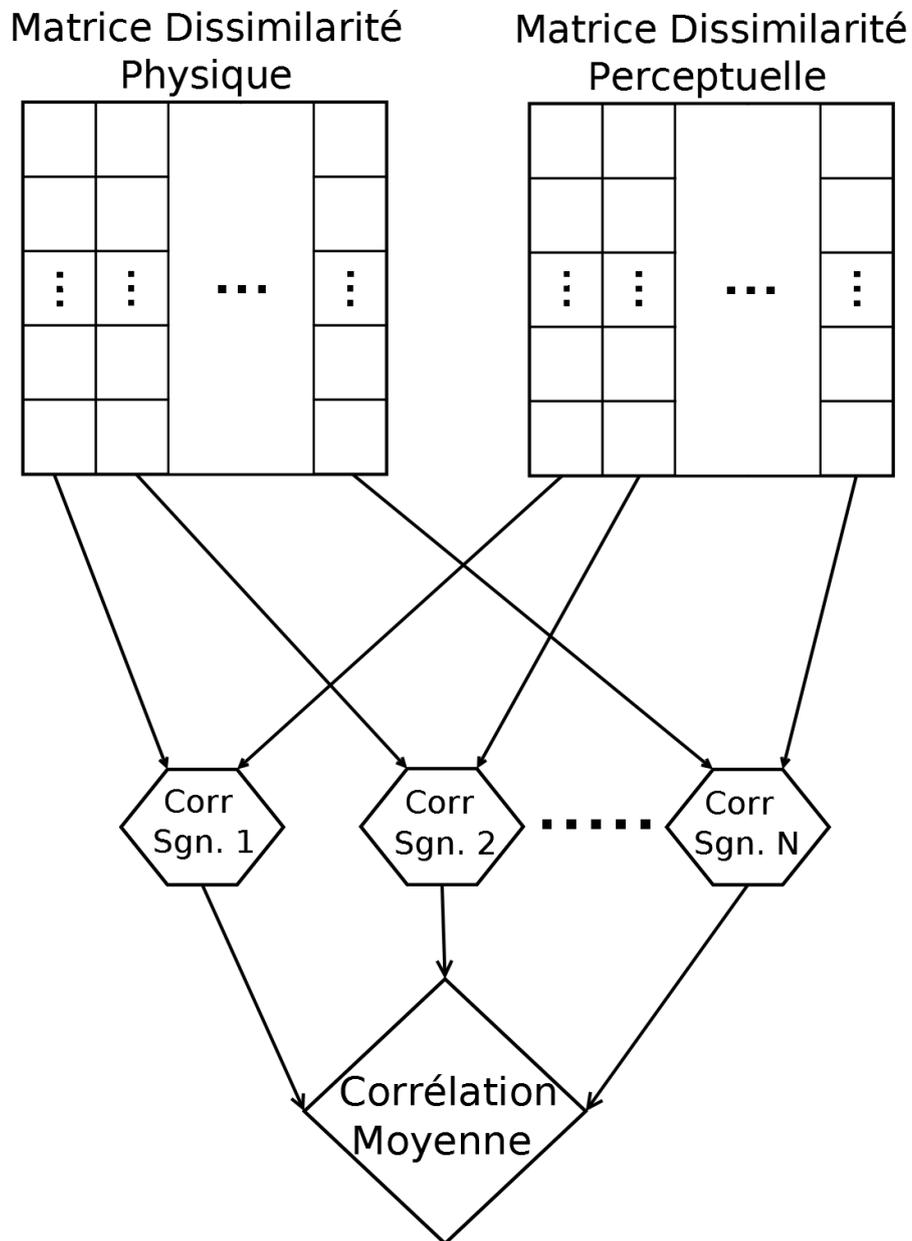


FIGURE 3.11 – Représentation graphique de la procédure de comparaison entre deux matrices de dissimilarité : les corrélations colonne-par-colonne entre les deux matrices sont d’abord stockées, puis moyennées pour obtenir la corrélation globale entre les matrices.

TABLE 3.3 – Résultats de corrélation moyenne entre les matrices de dissimilarité D_{En} et D_P pour différents types d'ondelettes-mères.

Ondelette-Mère	Échelle <i>min</i> (800 Hz)	Échelle <i>max</i> (70 Hz)	Corrélation Moyenne	Écart Type
<i>Morlet</i>	5	59	91.0%	2.7%
<i>Chapeau Mexicain</i>	2	18	92.1%	2.8%
<i>Coiflet 1</i>	5	57	90.7%	3.2%
<i>Meyer</i>	5	50	89.8%	3.6%
<i>Daubechies 4</i>	4	51	89.7%	3.8%

TABLE 3.4 – Résultats de corrélation moyenne entre les matrices de dissimilarité D_V et D_P pour différents types d'ondelettes-mères.

Ondelette-Mère	Échelle <i>min</i> (70 Hz)	Échelle <i>max</i> (10 Hz)	Corrélation Moyenne	Écart Type
<i>Morlet</i>	59	375	82.0%	8.2%
<i>Chapeau Mexicain</i>	18	115	82.0%	8.0%
<i>Coiflet 1</i>	57	367	82.8%	8.3%
<i>Meyer</i>	50	320	82.0%	8.1%
<i>Daubechies 4</i>	51	330	81.9%	8.4%

TABLE 3.5 – Résultats de corrélation moyenne entre les matrices de dissimilarité D_{KL}^S et D_P pour différents types d'ondelettes-mères.

Ondelette-Mère	Échelle <i>min</i> (800 Hz)	Échelle <i>max</i> (10 Hz)	Corrélation Moyenne	Écart Type
<i>Morlet</i>	5	375	66.4%	7%
<i>Chapeau Mexicain</i>	2	115	58.7%	5.7%
<i>Coiflet 1</i>	5	367	59.3%	6.3%
<i>Meyer</i>	5	320	64.6%	5.9%
<i>Daubechies 4</i>	4	330	60.1%	5.7%

La dispersion des corrélations individuelles, c.à.d. pour chaque signal, autour de la corrélation moyenne est aussi indiquée dans les Tableaux sous forme de *l'écart type*.

Il apparait que :

- en appliquant la procédure ANOVA¹¹ on montre que, le choix de l'ondelette n'a pas une influence significative sur les résultats obtenus pour E_P ($F_{E_P}(4, 85) = 1.701, p = 0.16$) et pour \bar{V}^+ ($F_V(4, 85) = 0.04, p > 0.99$), mais il a une influence significative sur les résultats obtenus pour ICS ($F_{ICS}(4, 85) = 5.78, p < 0.001$); ainsi, pour les expériences ultérieures nous avons choisi l'ondelette de *Morlet* du fait de sa ressemblance avec les signaux d'accélération et aussi pour les bons taux de corrélation obtenus sur les trois variables (91% pour E_P , 82% pour \bar{V}^+ et 66.4% pour ICS);
- la corrélation entre D_{En} et D_P atteint des valeurs élevées, qui sont en correspondance avec l'importance du canal P pour le sens tactile : le canal le plus sensible *et* avec la plage de fréquences la plus étendue ; ces valeurs, corroborées par des écarts-types relativement faibles, indiquent que E_P est la variable la plus importante pour les signaux vibrotactiles ; des expériences préliminaires sur la perception vibrotactile, réalisées dans [Duřu 2013], avaient abouti au même constat ;
- l'importance du canal NP I est bien représentée par les valeurs de corrélation entre D_V et D_P autour de 82% ; cependant, les écarts-types plus élevés montrent des différences importantes entre les signaux, liées notamment à la distribution inégale de l'énergie entre les canaux P et NP I ;
- les valeurs de corrélation entre la matrice D_{KL}^S et la matrice D_P sont présentées dans le Tableau 3.5. Même si, à première vue, ces résultats peuvent sembler faibles, il faut tenir compte du fait qu'ils ont été obtenus *en absence* d'information sur l'intensité absolue des signaux. Dans ces conditions, l'index de complexité des scalogrammes (ICS) assure un double rôle : celui de *compléter* l'information d'intensité (captée par les deux autres variables) par une information sur la *complexité* des signaux ; et celui de *représenter le couplage* de canaux P et NP I, vu qu'il est déterminé sur l'ensemble des deux canaux ;

En conclusion, étant donné les résultats de corrélation pour les trois matrices de dissimilarité, nous sommes maintenant en mesure de valider l'utilité des trois variables caractéristiques des signaux vibrotactiles : E_P , \bar{V}^+ et ICS . L'existence d'un lien entre la caractérisation objective des signaux, réalisée par ces variables et la caractérisation subjective, représentée par la matrice D_P est également confirmée.

Néanmoins, une expérience supplémentaire, que nous présentons dans la section suivante, a été menée afin d'examiner la contribution *combinée* des canaux P et NP I à travers leurs variables caractéristiques : E_P et \bar{V}^+ .

¹¹Ang. – “Analysis of Variance”

3.8.3 Matrice de dissimilarité unifiée P–NP I

Le schéma-bloc présenté dans la figure 2.13 indique que les informations transmises *séparément* à travers les deux canaux psychophysiques P et NP I sont fusionnées au niveau du cortex somatosensoriel et reliées à la complexité spectrale globale. Néanmoins, comme mentionné dans la section 2.4.8, une première étape d'intégration des information tactiles est réalisée dans le thalamus, avant d'arriver au cortex. (voir figure 2.12).

Ainsi, dans cette section nous allons examiner l'hypothèse selon laquelle, avant d'arriver au cortex, les informations des canaux P et NP I sont combinées ou unifiées, dans une sensation tactile *globalisée*. Par des expériences psychophysiques, cette hypothèse a été partiellement confirmée dans [Gescheider 2004], où les auteurs ont découvert un effet de sommation linéaire entre les magnitudes perceptuelles synthétisées par les deux canaux.

Afin de vérifier cette hypothèse à travers des techniques de traitement de signal, nous avons fusionné les deux matrices de dissimilarité correspondantes aux deux canaux, i.e. D_{En} et D_V , dans une seule matrice notée $D_{En} \oplus D_V$. Cette matrice est obtenue pour chaque paire de signaux (i, j) en pondérant les contributions individuelles de $D_{En}(i, j)$ et $D_V(i, j)$ comme nous l'indiquons ci-après.

Soit $w_P(i, j)$ le poids de $D_{En}(i, j)$, et $w_{NP}(i, j)$ le poids de $D_V(i, j)$, définis comme suit :

$$w_P(i, j) = \frac{w_P^i + w_P^j}{2}; \quad w_{NP}(i, j) = \frac{w_{NP}^i + w_{NP}^j}{2} \quad (3.37)$$

où $w_P^{i(j)}$, $w_{NP}^{i(j)}$ représentent respectivement la quantité d'énergie délivrée aux canaux P et NP I pour le signal vibrotactile $i(j)$, calculé par l'équation 3.19.

En utilisant ces poids, la matrice de dissimilarité fusionnée est définie ci-dessous :

$$(D_{En} \oplus D_V)(i, j) = w_P(i, j) \cdot D_{En}(i, j) + w_{NP}(i, j) \cdot D_V(i, j) \quad \forall i, j \quad (3.38)$$

Étant donné les relations 3.19 et 3.37, nous pouvons facilement montrer que $w_P(i, j) + w_{NP}(i, j) = 1, \forall i, j$, ce qui signifie que la fusion ne modifie pas le caractère global de la perception.

Ainsi, en suivant le mécanisme de comparaison décrit ci-dessus, $D_{En} \oplus D_V$ a été comparée avec D_P pour différents types d'ondelettes. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le Tableau 3.6, où la dernière colonne, *Gain*, représente l'amélioration (positive ou négative) apportée par la fusion. Mathématiquement, le gain est défini par :

$$Gain = C\{D_{En} \oplus D_V\} - \max[C\{D_{En}\}, C\{D_V\}]; \quad (3.39)$$

où $C\{D_X\}$ signifie "la corrélation entre les matrices D_X et D_P ".

Comme nous pouvons le voir, pour quatre types d'ondelettes-mères, l'unification des matrices apporte une amélioration *positive*, avec des valeurs de *Gain* comprises entre 1.2 % et 2.5%. Cependant, pour le *Chapeau Mexicain*, la fusion semble détériorer la corrélation avec la matrice perceptuelle D_P , vu qu'une valeur de *Gain* négative, (−0.6 %), est obtenue. Une explication plausible pour ce phénomène pourrait être la valeur de corrélation déjà très élevée obtenue pour la matrice D_{En} en utilisant cette ondelette.

TABLE 3.6 – Résultats de corrélation moyenne entre la matrice de dissimilarité fusionnée $D_{En} \oplus D_V$ et la matrice D_P pour différents types d'ondelettes-mères. Le gain obtenu sur la corrélation en fusionnant les deux matrices est aussi indiqué.

Ondelette Mère	Corrélation D_V	Corrélation D_{En}	Corrélation $D_{En} \oplus D_V$	Écart Type ($D_{En} \oplus D_V$)	Gain
<i>Morlet</i>	82.0%	91.0%	92.5%	2.9%	1.5%
<i>Ch. Mex.</i>	82.0%	92.1%	91.5%	3.5%	-0.6%
<i>Coiflet 1</i>	82.8%	90.7%	92.5%	3.05%	1.8%
<i>Meyer</i>	81.9%	89.8%	92.3%	2.9%	2.5%
<i>Db. 4</i>	81.9%	89.7%	90.9%	3.8%	1.2%

En conséquence, l'hypothèse énoncée au début ("les informations transmises par les canaux P et NP I sont combinées *avant* d'arriver au cortex dans une sensation globale") est *partiellement* confirmée par cette analyse, et plusieurs expériences seraient nécessaires pour la valider complètement.

Les trois variables caractéristiques ont été validées en comparant leur matrice de dissimilarité avec la matrice de dissimilarité perceptuelle D_P . Les bons résultats obtenus (voir les Tableaux 3.3, 3.4 et 3.5) justifient, au-delà de leur intérêt psychophysique, leur utilisation comme variables d'entrée pour modéliser le confort des signaux vibrotactiles. Ce modèle, appelé *psychophysique* (en raison de la nature de ses variables d'entrée), sera présenté dans le chapitre 4, en utilisant la logique floue comme principale technique d'implémentation. Néanmoins, dans la section suivante, une caractérisation *hédonique* est présentée à travers une expérience psychophysique qui vise à déterminer le niveau de *confort* induit par différents signaux vibrotactiles. Les résultats obtenus dans cette expérience serviront comme variable de sortie pour le modèle psychophysique sus-mentionné.

3.9 Tâche d'évaluation hédonique de signaux vibrotactiles

L'expérience de dissimilarité perceptuelle décrite dans la section 3.2 nous a aidé à confirmer l'existence d'un lien entre les caractéristiques physiques des signaux vibrotactiles et les sensation induites. Nous pouvons ainsi aller plus loin et définir un modèle *hédonique* pour les signaux vibrotactiles, qui soit capable de prédire le niveau de confort d'un signal vibratoire à partir de ses variables d'entrée.

A cette fin, une première étape consiste à recueillir les évaluations hédoniques des utilisateurs sur les signaux vibrotactiles à travers une expérience psychophysique décrite ci-après. Cela revient à faire une autre caractérisation subjective des signaux, orientée ici sur une dimension beaucoup plus complexe que la simple dissimilarité considérée dans la section 3.2.

Cette nouvelle expérience concernant les aspect hédoniques des stimuli vibratoires, a été pilotée par notre laboratoire, le *LISTIC*, en partenariat avec *Valeo*, et elle a été effectuée

dans le laboratoire *Interfaces Homme-Machine* de *Valeo Annemasse*.

3.9.1 Dispositif expérimental – Le banc MISAC

Cette expérience a été menée sur un nouveau banc haptique conçu dans le cadre du projet *FUI-MISAC* et réalisé par l'entreprise grenobloise *CEDRAT Technologies*. Ce dispositif, dédié à la recherche sur les signaux vibrotactiles, est capable de fournir des accélérations allant jusqu'à 40 G crête-à-crête à des fréquences dans la plage 20 Hz – 300 Hz. Il est composé de quatre actionneurs piezo-électriques disposés sur les quatre bords du banc, encapsulés sous une surface tactile à *écran capacitif*, comme illustré dans la figure 3.12. Une description complète et détaillée du banc peut être trouvée dans les rapports techniques du projet *MISAC* tels que [Bencheikh 2013].

Notons que le nouveau banc haptique *MISAC* est en mesure de surmonter les limitations techniques du banc préliminaire, non seulement en termes d'amplitude et de dynamique, mais aussi en termes d'affichage et flexibilité. Ainsi, sur son écran capacitif, on peut représenter jusqu'à cinq boutons virtuels, chacun avec un effet vibratoire différent. De plus, les utilisateurs peuvent activer chaque bouton (c.à.d. signal vibrotactile) un nombre illimité de fois, ce qui leur permet de se faire une image mentale plus *exacte* de l'effet tactile perçu, et donc d'être plus cohérents dans leurs évaluations subjectives.

Le fonctionnement de ce banc haptique est similaire à celui du dispositif expérimental préliminaire présenté dans la section 3.2.1 (voir figure 3.1), dans le sens où un signal vibrotactile est initialement décrit par un ensemble de stimuli électriques qui sont envoyés aux actionneurs pour générer le mouvement.

Sur le banc haptique *MISAC* le déclenchement d'un signal vibrotactile a lieu seulement dans deux conditions :

- l'utilisateur appuie avec le doigt sur la surface d'un bouton virtuel (voir par exemple les quatre boutons disposés au centre de la surface tactile dans la figure 3.12) ; un appui dans une zone tactile "vide", où il n'y a pas de boutons, ne déclenche pas de vibration, ce qui fait que le risque d'un déclenchement accidentel est nettement réduit ;
- lorsque le banc est utilisé dans le mode "maintenance", il est possible de déclencher un signal vibratoire en utilisant une souris connectée directement au banc ; ce deuxième mode d'utilisation sera employé pour réaliser les mesures d'accélération en absence de contact avec le doigt ;

Comme pour le premier dispositif expérimental, la communication entre le PC et l'appareil est réalisée par le logiciel *E-Prime 2.0*, chargé de l'envoi des stimuli électriques vers les quatre actionneurs, ainsi que de l'enregistrement des réponses des utilisateurs. Pour filtrer le bruit mécanique à basse fréquence produit par l'appareil en mouvement, les utilisateurs portent des casques anti-bruit durant l'expérience.



FIGURE 3.12 – Vue d'ensemble du dispositif expérimental employé dans l'expérience d'évaluation hédonique : A) Banc haptique ; B) Surface tactile à écran capacitif ; C) Système de communication PC-Appareil.

3.9.2 Procédure expérimentale et confort global

Pour l'expérience d'évaluation hédonique de signaux, seize sujets avec une moyenne d'âge de 40 ans ont participé volontairement. En utilisant soit l'index, soit le majeur de la main droite, comme ils le souhaitent, les sujets ont évalué le niveau de confort *absolu*¹² pour un ensemble de 48 signaux vibrotactiles. Les paramètres électriques associés à ces signaux sont toujours la fréquence, la durée et la forme d'onde, choisis comme suit :

- 12 valeurs de fréquence : {30 Hz, 40 Hz, 50 Hz, 70 Hz, 90 Hz, 120 Hz, 150 Hz, 180 Hz, 210 Hz, 240 Hz, 270 Hz, 300 Hz} ;
- 2 durées : une période et deux périodes ;
- 2 formes d'onde : sinus et triangle ;

Notons la granularité très fine qui a été réalisée pour la fréquence, suite aux résultats de la première expérience, qui ont montré que la fréquence est le paramètre le plus important pour les signaux vibrotactiles.

Remarquons aussi que la durée est maintenant un paramètre *relatif*, vu que la durée d'une période à 30 Hz est différente de la durée d'une période à 300 Hz. Ce choix est motivé

¹²Le confort est évalué pour chaque signal vibrotactile sans le comparer aux autres signaux et sans se mettre dans un contexte particulier.

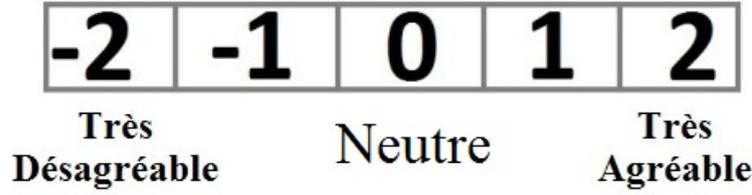


FIGURE 3.13 – Illustration de l'échelle bipolaire à cinq niveaux utilisée pour évaluer le confort des signaux vibrotactiles.

par le besoin d'avoir une vibration symétrique, c.à.d. qui commence et qui se termine au même niveau. L'emploi d'une durée fixe, telle que 10 ms, peut abruptement forcer le banc à revenir à la position initiale lorsque le temps prévu est écoulé et peut, par là même, altérer de manière indésirable la perception du signal.

Les 48 signaux vibrotactiles ont été évaluées individuellement, sur une échelle *bipolaire* à cinq niveaux, i.e. $\{-2, -1, 0, +1, +2\}$, où -2 correspond au plus inconfortable, et +2 au plus confortable, comme illustré dans la figure 3.13. Nous avons considéré que cette échelle est plus adaptée pour représenter le raisonnement humain pour des évaluations hédoniques, qui lui-même a une nature bipolaire : *j'aime-j'aime pas*. Dans ces conditions, chaque évaluation sur l'échelle correspond à une estimation *floue* du niveau de confort, plutôt qu'à une valeur numérique précise.

Confort global. Les signaux ont été présentés aléatoirement aux sujets afin d'éviter l'apparition d'un effet d'ordre. De plus, l'expérience a été répétée trois fois. Ainsi l'ensemble de 48 signaux a été présenté trois fois aux sujets, ce qui permet d'obtenir trois évaluations indépendantes pour chaque signal. Entre deux blocs consécutifs, une pause de cinq minutes a été réalisée pour donner la possibilité aux sujets de se détendre. La durée moyenne de l'expérience était d'environ 40 minutes, pauses comprises.

En considérant que le premier bloc correspond à une étape de familiarisation avec l'ensemble des signaux, les évaluations correspondantes n'ont pas été prises en compte. Dans ces conditions, le degré de confort pour le signal i estimé par le sujet s représente la moyenne des évaluations recueillies dans les deux derniers blocs. Le degré de confort global (CG) pour le signal i représente donc la moyenne de ces grandeurs pour tous les sujets, comme présenté en 3.40.

$$CG(i) = \frac{1}{16} \sum_{s=1}^{16} \left[\frac{C_{Bloc_2}^s(i) + C_{Bloc_3}^s(i)}{2} \right], i = 1, \dots, 48 \quad (3.40)$$

où i est l'index des signaux, s est l'index des sujets, i.e. $s = 1, \dots, 16$, et $C_{Bloc_{2(3)}}^s(i)$ représente le degré de confort estimé par le sujet s , pour le signal i , dans le deuxième (troisième) bloc ; ainsi $C_{Bloc_{2(3)}}^s(i) \in \{-2, -1, 0, 1, 2\}$.

Dans ces conditions, la moyenne sur l'ensemble des signaux des variances des évaluations des utilisateurs est de 1.01, alors que la variance moyenne entre les évaluations

du deuxième et troisième bloc pour un utilisateur est de 0.65. La différence entre les deux variances est justifiée par la variabilité inhérente entre les utilisateurs, mais nous considérons que cette différence reste modérée, ce qui rend possible la détermination d'un modèle général, comme nous le verrons dans le chapitre suivant.

En effet, le fait de moyenniser les évaluations des 16 utilisateurs afin d'obtenir une valeur finale de confort pour chaque signal vibrotactile est justifié par l'objectif principal du modèle psychophysique, qui est d'obtenir une connaissance *générale* sur le confort vibrotactile, connaissance qui doit être partagée et agréée par *l'ensemble* de la population. Cette distinction entre un modèle *général* et un modèle *particularisé* pour une sous-population plus homogène, sera reprise et détaillée dans la section 4.4.

Le vecteur *CG* qui contient les degrés de confort pour l'ensemble de 48 signaux vibrotactiles, a été ensuite normalisé dans l'intervalle $[0, 1]$. Les valeurs individuelles de confort global pour l'ensemble de 48 signaux vibrotactiles sont présentées dans le Tableau 3.7. Ces valeurs seront utilisées dans le chapitre 4 pour définir et valider le modèle psychophysique flou de la perception vibrotactile.

TABLE 3.7 – Confort global (CG) normalisé pour l'ensemble de signaux vibrotactiles.

	Fréquence	Durée	Forme d'onde	Confort global
S_1	120 Hz	Une Période	Sinus	0.636
S_2	120 Hz	Deux Périodes	Sinus	0.127
S_3	120 Hz	Une Période	Triangle	0.782
S_4	120 Hz	Deux Périodes	Triangle	0.418
S_5	150 Hz	Une Période	Sinus	0.673
S_6	150 Hz	Deux Périodes	Sinus	0.0
S_7	150 Hz	Une Période	Triangle	0.727
S_8	150 Hz	Deux Périodes	Triangle	0.345
S_9	180 Hz	Une Période	Sinus	0.727
S_{10}	180 Hz	Deux Périodes	Sinus	0.073
S_{11}	180 Hz	Une Période	Triangle	0.764
S_{12}	180 Hz	Deux Périodes	Triangle	0.418
S_{13}	210 Hz	Une Période	Sinus	0.855
S_{14}	210 Hz	Deux Périodes	Sinus	0.382
S_{15}	210 Hz	Une Période	Triangle	0.982
S_{16}	210 Hz	Deux Périodes	Triangle	0.673
S_{17}	240 Hz	Une Période	Sinus	0.618
S_{18}	240 Hz	Deux Périodes	Sinus	0.636
S_{19}	240 Hz	Une Période	Triangle	0.764
S_{20}	240 Hz	Deux Périodes	Triangle	0.691
S_{21}	270 Hz	Une Période	Sinus	0.527
S_{22}	270 Hz	Deux Périodes	Sinus	0.200
S_{23}	270 Hz	Une Période	Triangle	0.600
S_{24}	270 Hz	Deux Périodes	Triangle	0.545
S_{25}	300 Hz	Une Période	Sinus	0.564
S_{26}	300 Hz	Deux Périodes	Sinus	0.018
S_{27}	300 Hz	Une Période	Triangle	0.691
S_{28}	300 Hz	Deux Périodes	Triangle	0.255
S_{29}	30 Hz	Une Période	Sinus	0.145
S_{30}	30 Hz	Deux Périodes	Sinus	0.091
S_{31}	30 Hz	Une Période	Triangle	0.364
S_{32}	30 Hz	Deux Périodes	Triangle	0.073
S_{33}	40 Hz	Une Période	Sinus	0.218
S_{34}	40 Hz	Deux Périodes	Sinus	0.291
S_{35}	40 Hz	Une Période	Triangle	0.255
S_{36}	40 Hz	Deux Périodes	Triangle	0.345
S_{37}	50 Hz	Une Période	Sinus	0.382
S_{38}	50 Hz	Deux Périodes	Sinus	0.309
S_{39}	50 Hz	Une Période	Triangle	0.636
S_{40}	50 Hz	Deux Périodes	Triangle	0.400
S_{41}	70 Hz	Une Période	Sinus	0.582
S_{42}	70 Hz	Deux Périodes	Sinus	0.545
S_{43}	70 Hz	Une Période	Triangle	1.000
S_{44}	70 Hz	Deux Périodes	Triangle	0.491
S_{45}	90 Hz	Une Période	Sinus	0.636
S_{46}	90 Hz	Deux Périodes	Sinus	0.473
S_{47}	90 Hz	Une Période	Triangle	0.873
S_{48}	90 Hz	Deux Périodes	Triangle	0.564

3.10 Conclusion

Dans ce chapitre une caractérisation poussée des signaux vibrotactiles a été réalisée. Nous avons commencé dans la section 3.2 par une première étape de caractérisation *subjective*, à travers une tâche de jugement de la dissimilarité perceptuelle entre les signaux, réalisée sur le banc préliminaire d'expérimentations. Les résultats obtenus ont été exprimés par une matrice de dissimilarité perceptuelle appelée D_P , afin de valider la pertinence et l'utilité d'un ensemble de variables objectives.

Ensuite, en utilisant les données d'accélération, mesurées directement sur la couche de sortie du banc haptique, un premier niveau de caractérisation *objective* des signaux vibrotactiles a été proposé. L'intégrité de ces mesures a été validée par l'analyse du rapport signal-à-bruit, décrite dans la section 3.3.3.

Puis, à l'aide de ces mesures d'accélération, trois variables caractéristiques de signaux vibrotactiles, dont l'existence était présumée dans le chapitre 2, ont été définies :

- l'énergie délivrée au canal Pacinien, E_P (voir la section 3.5) ;
- la vitesse positive normalisée, \bar{V}_+ (voir la section 3.6) ;
- l'index de complexité spectrale, ICS (voir section 3.7), comme variable complémentaire, pour refléter le couplage des deux canaux ;

Vu que les trois variables sus-mentionnées sont déterminées à partir du scalogramme de l'accélération des signaux, une partie importante de ce chapitre a été consacrée à la présentation (dans la section 3.4) de la *transformée en ondelettes continue* (TOC) et du scalogramme, c.à.d. la représentation temps-échelle de l'énergie des signaux.

Ultérieurement, dans la section 3.8, ces trois variables caractéristiques ont été validées en comparant leurs matrices de dissimilarité, i.e. D_{En} , D_V et D_{KL}^S , avec la matrice de dissimilarité perceptuelle D_P . Les résultats de corrélation, pour cinq types d'ondelettes-mères, sont présentés dans les Tableaux 3.3, 3.4, et 3.5. Cette analyse a permis ainsi de confirmer la pertinence de ces trois variables.

Ensuite, une expérience supplémentaire, réalisée dans la section 3.8.3 a eu comme objectif de vérifier l'hypothèse selon laquelle les informations transmises par les canaux P et NP I sont intégrées dans une sensation tactile globale. Les résultats montrent que, pour quatre types d'ondelettes sur un total de cinq utilisées, la fusion apporte une amélioration comprise entre 1.2% et 2.5%. L'hypothèse énoncée a été considérée comme étant partiellement confirmée par cette analyse, mais plusieurs expériences dans cette direction seront nécessaires pour tirer des conclusions définitives.

En final, une deuxième expérience psychophysique, traitant les aspect hédoniques des signaux vibrotactiles, a été détaillée dans la section 3.9. L'expérience a été menée sur un nouveau banc d'expérimentation, spécialement conçu dans le cadre du projet MISAC pour étudier les stimuli vibratoires. Les résultats recueillis dans cette expérience seront utilisés par la suite dans le chapitre 4 pour modéliser la perception des signaux vibrotactiles selon deux modèles indépendants : un modèle *psychophysique* générique et un modèle *expert* spécialisé pour l'automobile et l'aéronautique. Dans ce contexte, les trois variables

caractéristiques, énumérées ci-dessus, seront employées comme variables d'entrée pour le modèle *psychophysique* de la perception tactile.

Modèles Flous de la Perception des Signaux Vibrotactiles

Sommaire

4.1	Introduction	90
4.2	Architecture du modèle psychophysique	91
4.2.1	Identification de la base de données du système	92
4.2.2	Identification de la base de règles du système	95
4.2.3	Améliorations de la méthode WM	98
4.2.4	Méthode de <i>Sélection-Réduction</i> pour l'extraction de la base de règles	100
4.2.5	Opérateurs d'inférence du système	105
4.3	Performances du modèle psychophysique	106
4.3.1	Les variables du modèle et la variabilité des évaluations	106
4.3.2	Indicateurs quantitatifs du système	108
4.3.3	Modèle psychophysique de la perception vibrotactile	109
4.3.4	Analyse qualitative du modèle psychophysique	114
4.4	Personnalisation du modèle par une Interface Graphique	116
4.4.1	Présentation de l'interface	116
4.4.2	Personnalisation du modèle	118
4.5	Modèle expert pour l'évaluation des signaux vibrotactiles	122
4.5.1	Limites du modèle psychophysique	122
4.5.2	Procédures expérimentales	123
4.5.3	Base de règles <i>expert</i>	125
4.5.4	Modèle symbolique flou de la connaissance experte	127
4.5.5	Résultats du modèle symbolique	128
4.5.6	Portabilité du modèle expert au domaine aéronautique	132
4.6	Conclusion	135

4.1 Introduction

L'importance, pour les équipementiers automobiles et aéronautiques, de rendre l'utilisation des interfaces tactiles plus sûre en fournissant un retour vibratoire adapté au moment de l'interaction avec le doigt rend indispensable la modélisation de ces patterns vibratoires. Actuellement, il n'existe pas de modèle du confort global induit par un signal vibrotactile. La double caractérisation des signaux vibrotactiles présentée au chapitre 3 à travers deux expériences psychophysiques et trois variables objectives ouvre la voie à la modélisation de ces patterns vibratoires, qui fait l'objet de ce chapitre.

Comme nous l'avons déjà évoqué dans le chapitre 2, un *modèle* est généralement caractérisé par :

- une ou plusieurs variables *d'entrée* ; la nature de ces variables détermine le type de modèle obtenu, tel que un modèle *physique* pour des variables d'entrée mesurables, ou un modèle *expert* si les variables d'entrée sont évaluées par un expert humain dans un certain domaine.
- une ou, moins fréquemment, plusieurs variables de *sortie* ; le type de sortie utilisée distingue les modèles de classification des modèles de régression ;
- un ensemble de relations *entrée-sortie*, qui représentent le cœur du modèle ; plusieurs techniques de type "computational intelligence", détaillées dans la section 2.6, peuvent être utilisées afin de les obtenir.

Ainsi, deux grandes familles de techniques de modélisation existent dans la littérature du domaine "computational intelligence" : les réseaux de neurones artificiels (RN), présentés dans la section 2.6.3, et la logique floue (LF), exposée dans la section 2.6.4.

Les RN se comportent comme une *boite noire* placée entre l'entrée et la sortie, ne permettant pas de comprendre comment les variables d'entrée influent sur la valeur de sortie du modèle. Les relations entre l'entrée et la sortie sont codées par des équations non-linéaires liant les deux couches du modèle. Ainsi, même si les RN offrent généralement de bonnes performances quantitatives, ils sont limités dans leur capacité à représenter la connaissance de manière interprétable.

La LF d'autre part, en exploitant la tolérance pour l'imprécision et le raisonnement approximatif des êtres humains, est capable de fournir des modèles compréhensibles sous la forme d'une base de règles conditionnelles *SI-ALORS*. Cette approche a fait l'objet de développement de la part de notre laboratoire depuis plus de 20 ans [Foulloy 1993, Mauris 1994, Galichet 1995, Mauris 1996, Valet 2003, Benoit 2005].

De plus, en s'appuyant sur le concept de *variable linguistique* et sur la *théorie des sous-ensembles flous*, la LF a été largement utilisée dans la modélisation des données subjectives [Bouchon-Meunier 2013], avec quelques exemples qui comprennent : la qualité des produits alimentaires [Ioannou 2004, Perrot 2006], le confort induit par les conditions météorologiques [Mauris 2002], l'évaluation du confort pour un siège d'automobile [Levrat 1997], la perception de la sévérité de l'asthme [Lurie 2007], la conception d'un système de reconnaissance de couleurs dans l'espace perceptuel Lab [Bombardier 2009] ou l'évaluation de la sécurité des barrages [Curt 2011].

Étant donné le cadre pluridisciplinaire du projet *MISAC*, nous considérons que la compréhensibilité d'un modèle, offerte par la LF, est une condition essentielle pour une bonne communication avec les différents partenaires du projet ainsi qu'avec les utilisateurs.

Cependant, comme mentionné dans la section 2.6.4, trois grand types de techniques floues sont fréquemment utilisés en pratique pour les systèmes flous : *Mamdani*, *Takagi-Sugeno* et les systèmes *symboliques flous*. Même si des équivalences mathématiques existent entre ces trois types (voir [Galichet 1995] pour plus de détails), le choix est généralement dicté par la nature du problème à résoudre et le type des données à disposition.

En conséquence, dans ce chapitre, nous allons présenter deux modèles à base de règles floues pour la perception hédonique de stimuli vibrotactiles :

- un modèle *psychophysique*, dont l'entrée est constituée des trois variables caractéristiques des signaux, définies dans le chapitre 3 ; le système d'inférence de *Mamdani* a été retenu pour la représentation de ce modèle (voir section 4.2) ;
- un modèle *expert*, réalisé en utilisant un système *symbolique flou* ; les variables d'entrée du modèle, ainsi que la base de règles floues, sont définies et évaluées directement sous forme linguistique par un expert humain (voir section 4.5) ;

Dans les sections suivantes, nous présentons d'abord l'architecture du modèle psychophysique, suivie d'une partie résultats et discussions. Ensuite, une interface utilisateur graphique, permettant de personnaliser facilement le modèle psychophysique, est présentée. Le chapitre se termine par la description du modèle expert, où la connaissance générale sur le confort tactile sera particularisée pour les domaines automobile et aéronautique.

4.2 Architecture du modèle psychophysique

La mise en évidence, dans le chapitre 3, du lien entre les propriétés objectives et subjectives des signaux vibrotactiles justifie la recherche d'un modèle qui connecte ces deux niveaux de représentation de la connaissance. Nous allons définir dans cette section l'architecture d'un modèle à base de règles floues reliant les paramètres objectifs des signaux aux évaluations hédoniques sur le confort perçu.

Comme indiqué dans le chapitre 3, les paramètres objectifs retenus sont les trois variables caractéristiques des signaux, c.à.d. E_p , \bar{V}^+ et ICS , définies par les relations 3.16, 3.22 et 3.30. La sortie du modèle, c.à.d. la variable que nous cherchons à modéliser, est le confort induit par les signaux, recueilli par l'expérience présentée à la section 3.9.

Étant donné que les trois variables d'entrée ont été déterminées sur la base des études psychophysiques sur le sens tactile (Cf. chapitre 2), et afin de marquer sa généralité, nous proposons d'appeler ce modèle, *modèle psychophysique de la perception vibrotactile*.

La relation entre l'espace d'entrée, décrit par les trois variables caractéristiques des signaux, et l'espace de sortie, c.à.d. le confort induit, sera représentée par un système flou de *Mamdani*. Rappelons que l'échelle sur laquelle les utilisateurs ont évalué le confort des signaux vibrotactiles est :

$$\{-2, -1, 0, +1, +2\} \quad (4.1)$$

Les deux extrémités correspondent à “très désagréable” (-2) et à “très agréable” (+2), alors que 0 représente le *point neutre* de l'échelle. Ainsi, chaque valeur sur l'échelle est plutôt vue comme une *étiquette linguistique* que les utilisateurs associent à un signal vibrotactile afin d'évaluer son niveau de confort.

Dans ces conditions, et en l'absence d'informations *a priori* sur les relations entrée-sortie, le système flou de *Mamdani*, qui traite des règles linguistiques¹ avec des variables définies sur des univers numériques, nous semble être le plus adapté pour formaliser la connaissance du modèle psychophysique. Cette structure confère plus d'interprétabilité au modèle que celle des systèmes de *Takagi-Sugeno* qui comporte des entrées linguistiques mais une sortie numérique.

La conception d'un système de *Mamdani* porte, d'une part, sur la définition de sa base de connaissances, et d'autre part, sur l'explicitation des opérateurs choisis pour réaliser l'inférence floue. Ainsi, selon [Cordón 2001], la conception de la *base de connaissances* (BC) d'un système flou comprend la spécification de sa *base de données*, c.à.d. les caractéristiques des variables linguistiques employées, et aussi de sa *base de règles floues*, qui connecte les espaces d'entrée et de sortie du modèle. Tous ces aspects définissent l'*architecture* du système. Ils sont détaillés dans les sections suivantes.

4.2.1 Identification de la base de données du système

Sachant que les variables d'entrée et de sortie d'un système de *Mamdani* sont des variables linguistiques associées à des univers numériques, sa base de données est déterminée par :

- (a) le nombre de sous-ensembles flous qui compose l'univers de discours et qui définit la *granularité* des connaissances ;
- (b) les fonctions d'appartenance de *chaque* sous-ensemble flou, complètement identifiées par leur forme, telle que triangulaire, trapézoïdale, gaussienne, etc., et par leur position sur l'univers de discours numérique des variables ;

Ainsi, les univers de discours des variables d'entrée sont divisés comme suit :

$$\begin{aligned} K_E &= 5; \\ K_V &= 3; \\ K_{ICS} &= 3; \end{aligned} \tag{4.2}$$

où K_E , K_V et K_{ICS} représentent respectivement le nombre de sous-ensembles flous pour les trois variables : E_P , \overline{V}^+ et ICS .

La granularité inégale des univers des discours est due aux propriétés psychophysiques des variables. Ainsi, la granularité élevée pour E_P est expliquée par la sensibilité supérieure du canal P par rapport au canal NP I (voir Tableau 2.2) et par les bons résultats de corrélation obtenus avec sa matrice de dissimilarité (voir Tableau 3.3). Cette granularité élevée fait donc de E_P la principale variable du modèle. D'autre part, la granularité de ICS fait ressortir son caractère de variable compensatrice pour E_P , \overline{V}^+ .

¹Pour plus de détails voir la comparaison réalisée dans la section 2.6.4 entre les différents types de système à base de règles floues.

En accord avec les experts du projet, la granularité de la variable de sortie, c.à.d. le confort perçu, a été fixée à :

$$K_{Out} = 5; \quad (4.3)$$

Ensuite, pour les trois variables d'entrée nous avons utilisé les ensembles de termes (EdT) suivants :

$$\begin{aligned} EdT_{E_p} &= \{\text{Très Faible, Faible, Moyenne, Élevée, Très Élevée}\}; \\ EdT_V &= \{\text{Faible, Moyenne, Élevée}\}; \\ EdT_{ICS} &= \{\text{Faible, Moyenne, Élevée}\}; \end{aligned} \quad (4.4)$$

L'ensemble de termes pour la variable de sortie est :

$$EdT_{Out} = \{\text{Très Désagréable, Désagréable, Neutre, Agréable, Très Agréable}\}; \quad (4.5)$$

Les sous-ensembles flous sont définis par des fonction d'appartenance *triangulaires*, retenues en raison de leur simplicité et de leur utilisation courante dans la communauté. En l'absence de connaissances *a priori* sur le phénomène, nous avons considéré une partition uniforme des sous-ensembles flous sur l'univers de discours des variables. La partition de sous-ensembles flous pour les trois variables d'entrée du modèle est illustrée dans la figure 4.1, alors que la partition pour la variable de sortie est illustrée dans la figure 4.2.

Comme nous pouvons le voir dans les figures ci-dessous, les fonctions d'appartenance de deux sous-ensembles flous adjacents se coupent à 0.5 et, pour toutes les valeurs numériques d'entrée situées dans l'univers de discours des variables, *au maximum* deux sous-ensembles flous sont activés simultanément. Une autre condition imposée sur les partitions est que, pour toute valeur sur l'univers de discours, la somme des degrés d'appartenance aux sous-ensembles flous vaut 1. Les partitions possédant ces propriétés sont aussi appelées partitions de *Ruspini* ou *strong fuzzy partitions*, et selon [Pancho 2013] leur emploi peut améliorer les problèmes liés à la couverture de l'espace, à la normalisation ou à la séparabilité de sous-ensembles flous et, par là même, peut améliorer l'interprétabilité du système flou obtenu.

En utilisant les partitions floues des variables, les valeurs numériques peuvent être décrites par leurs *descriptions floues*. Par exemple, pour $x \in U_{E_p}$ dans la figure 4.1a, sa description floue est la suivante :

$$\Phi\{E_p^x\} = 0.0/E_p^{TF} + 0.0/E_p^F + 0.28/E_p^M + 0.72/E_p^E + 0.0/E_p^{TE}; \quad (4.6)$$

où E_p^x représente la valeur numérique x dans l'univers de discours de E_p ; $\Phi\{E_p^x\}$ représente "la description floue de E_p^x " et "+" dénote l'union des descriptions sur chaque terme.

Notons que l'expression sous forme de description floue s'applique aussi bien pour les variables d'entrée que pour celle de sortie.

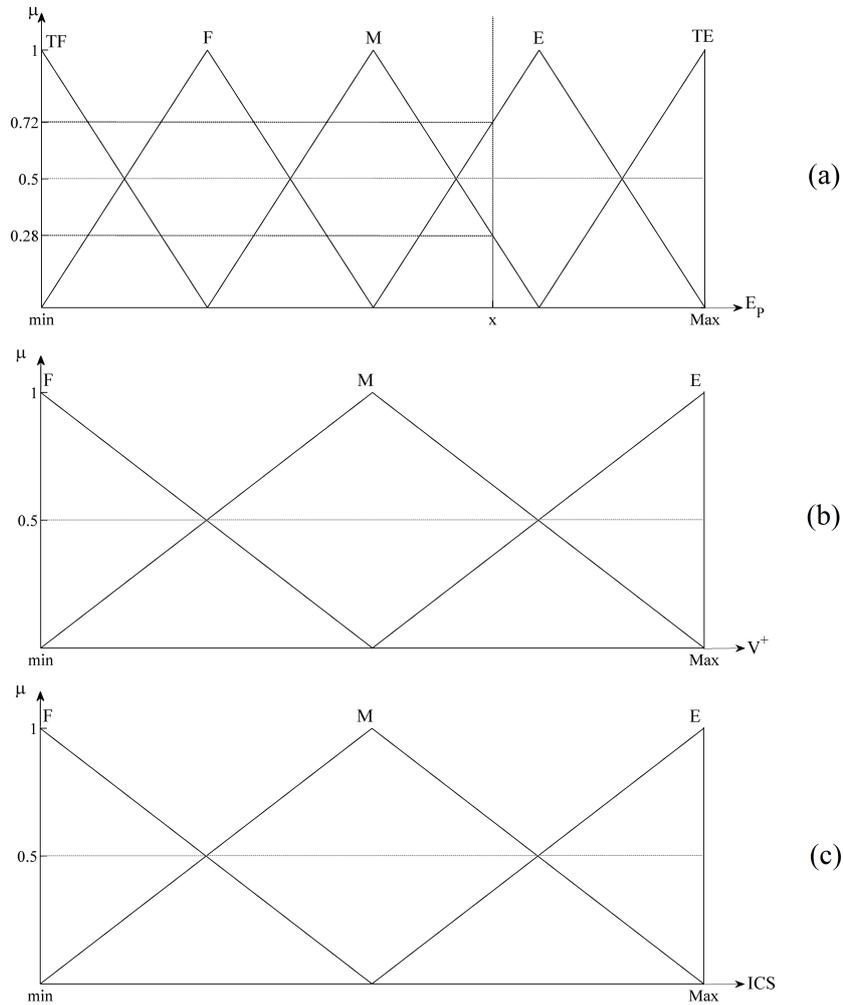


FIGURE 4.1 – Partition uniforme sur l’univers de discours avec des fonctions d’appartenance triangulaires pour les trois variables d’entrée : (a) E_P ; (b) \bar{V}^+ ; (c) ICS .

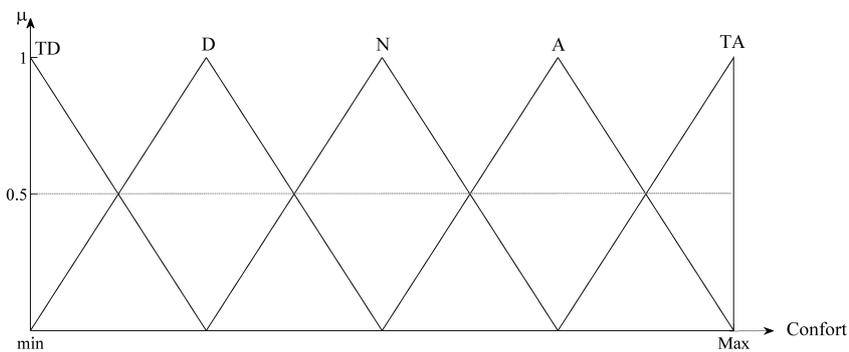


FIGURE 4.2 – Partition uniforme sur l’univers de discours avec des fonctions d’appartenance triangulaires pour la variable de sortie : le confort induit par les signaux vibrotactiles.

4.2.2 Identification de la base de règles du système

La deuxième composante de la base de connaissances d'un système flou est la *base de règles*. Elle représente le cœur du système, qui connecte par des propositions linguistiques l'entrée à la sortie, synthétisant ainsi sous une forme compréhensible la connaissance générale d'un phénomène.

Dans le cas d'un système flou de *Mamdani*, la définition de la base de règles consiste à associer une *conclusion*

$$B_{Out} \in EdT_{Out} \quad (4.7)$$

pour chaque n-uplet de *prémises*

$$\{A_{E_P}, A_{\bar{V}^+}, A_{ICS}\} \iff \begin{cases} A_{E_P} & \in EdT_{E_P}; \\ A_{\bar{V}^+} & \in EdT_{\bar{V}^+}; \\ A_{ICS} & \in EdT_{ICS}; \end{cases} \quad (4.8)$$

où $A_{E_P}, A_{\bar{V}^+}, A_{ICS}$ et B_{Out} représentent des étiquettes linguistiques, c.à.d. mots-valeurs, appartenant respectivement à l'ensemble de termes (*EdT*) des variables d'entrée et de sortie.

Ainsi, les prémises et la conclusion sont connectées par des propositions "*SI-ALORS*" ayant la forme suivante :

$$\begin{aligned} \text{SI } E_P \text{ est } A_{E_P} \text{ et } \bar{V}^+ \text{ est } A_{\bar{V}^+} \text{ et } ICS \text{ est } A_{ICS} \\ \text{ALORS } Out \text{ est } B_{Out} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Dans le cas de la perception vibrotactile, un exemple concret d'une règle floue peut être :

$$\begin{aligned} \text{SI } E_P \text{ est Faible et } \bar{V}^+ \text{ est Faible et } ICS \text{ est Moyenne} \\ \text{ALORS } Confort \text{ est Agréable} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Notons que la totalité de ces propositions forme la base de règles du système. Souvent, elle est définie par un expert humain, mais en l'absence d'un tel expert, la base de règles peut être *apprise* automatiquement à partir d'un ensemble de données numériques, c'est-à-dire des paires entrée-sortie.

Dans le contexte des interfaces haptiques, nous avons un nombre $N_S = 48$ signaux vibrotactiles pour lesquels nous disposons des trois variables d'entrée (E_P, \bar{V}^+, ICS), déterminées par les relations 3.16, 3.22 et 3.30 ; et d'une valeur de *confort global*, estimée par les 16 utilisateurs et obtenue par la relation 3.40 :

$$S_j : \{E_P(j), \bar{V}^+(j), ICS(i)\} \iff CG(j); \quad \forall j = 1, \dots, N_S \quad (4.11)$$

A partir de ces paires de données entrée-sortie, plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature pour extraire la base de règles du modèle, telles que [Abe 1995, Nozaki 1997, Casillas 2002]. Une des méthodes les plus utilisées dans différents domaines (voir [Zeng 2003, Chang 2008, Tudu 2009, Ferrero 2007, Blagojević 2013]) en raison de sa simplicité et de son efficacité, est celle proposée par Wang et Mendel dans [Wang 1992], et qui par la suite est notée *WM*.

La méthode WM pour l'extraction de la base de règles. A partir d'un ensemble de données entrée-sortie ($S_j, j = 1, \dots, N_S$), et une partition donnée des univers de discours pour les variables d'entrée et de sortie (voir par exemple les figures 4.1 et 4.2), les étapes de la méthode pour extraire la base de règles sont les suivantes :

(WM-1) Pour *chaque* exemple appartenant à l'ensemble de données entrée-sortie

$$E = (x_1, x_2, \dots, x_m, y) \in \mathfrak{X}^{m+1}$$

c'est-à-dire m variables d'entrée et une variable de sortie, on détermine le degré d'appartenance dans *chaque* sous-espace d'entrée et de sortie ; cela revient à déterminer les descriptions linguistiques floues

$$\Phi\{x_i\}, \forall i = 1, \dots, m, \text{ et } \Phi\{y\}$$

obtenues à partir des partitions des univers des discours des variables, comme indiqué par l'équation 4.6 ;

(WM-2) Pour *chaque* variable d'entrée et sortie, on affecte à E le sous-ensemble flou avec le degré maximal :

$$E \Rightarrow (\arg \max_{l_{x_1}} \{\Phi\{x_1\}\}, \dots, \arg \max_{l_{x_m}} \{\Phi\{x_m\}\}, \arg \max_{l_y} \{\Phi\{y\}\})$$

où " $\arg \max_{l_i} \{\Phi\{x_i\}\}$ " est l'étiquette linguistique associée au sous-ensemble flou de la variable i , qui couvre au mieux la valeur x_i , et l représente l'indice de l'étiquette. Par exemple, à partir de l'équation 4.6, nous retrouvons :

$$\arg \max_l \{\Phi\{E_p^x\}\} = E_p^E, \text{ avec un degré de recouvrement de } \mu_{E_p^E}(E_p^x) = 0.72.$$

Ainsi, à E est associée la règle floue suivante :

$$\text{SI } x_1 \text{ est } A_{x_1}^{l_{x_1}} \dots \text{ et } x_m \text{ est } A_{x_m}^{l_{x_m}} \text{ ALORS } y \text{ est } B_y^{l_y}$$

où $A_{x_i}^{l_{x_i}} = \arg \max_{l_{x_i}} \{\Phi\{x_i\}\}, \forall i$, et $B_y^{l_y} = \arg \max_{l_y} \{\Phi\{y\}\}$ représentent les étiquettes linguistiques des variables d'entrée et sortie respectivement, telles que "Faible", "Moyenne", "Élevée", "Agréable", "Désagréable" etc..

(WM-3) L'étape (WM-2) est itérée pour tous les exemples E de l'ensemble de données. Nous obtenons ainsi une règle floue R^E pour chaque exemple. L'intégralité de ces règles forme une base de règles *candidate* (BRC). Ensuite, un degré d'importance global est assigné à chaque règle $R^E \in BRC$. Il est défini par le produit des degrés d'appartenance aux sous-ensembles d'entrée *et* de sortie.

$$D(R^E) = \mu_{A_{x_1}^{l_{x_1}}}(x_1) \cdot \mu_{A_{x_2}^{l_{x_2}}}(x_2) \cdot \dots \cdot \mu_{A_{x_m}^{l_{x_m}}}(x_m) \cdot \mu_{B_y^{l_y}}(y)$$

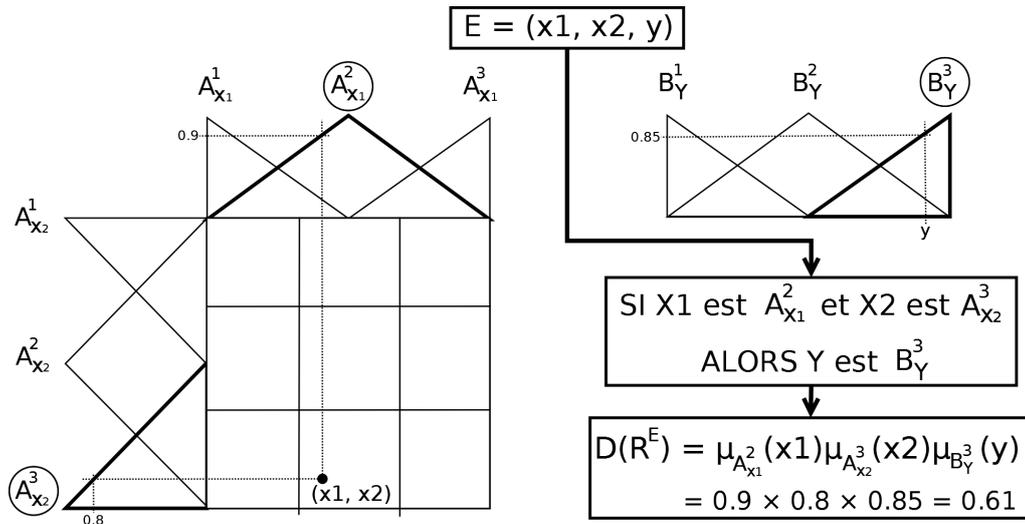


FIGURE 4.3 – Illustration de la méthode de WM pour l'extraction de la base de règles. L'exemple E a deux variables d'entrée x_1 et x_2 et une variable de sortie y .

Les étapes (WM-1), (WM-2), (WM-3) sont illustrées dans la figure 4.3 pour un exemple E avec deux variables d'entrée et une variable de sortie. L'univers de discours des trois variables est partitionné en trois sous-ensembles flous.

(WM-4) Les étapes précédentes peuvent générer des règles *conflictuelles*, c'est-à-dire, des règles avec les mêmes prémisses, mais avec des conclusions différentes, comme illustré par les deux règles floues ci-dessous :

$$R^{E_1} : \text{SI } E_P \text{ est Faible et } \bar{V}^+ \text{ est Faible et } ICS \text{ est Moyenne} \\ \text{ALORS } \textit{Confort} \text{ est } \underline{\textit{Agréable}}$$

$$R^{E_2} : \text{SI } E_P \text{ est Faible et } \bar{V}^+ \text{ est Faible et } ICS \text{ est Moyenne} \\ \text{ALORS } \textit{Confort} \text{ est } \underline{\textit{Désagréable}}$$

Afin de traiter cette situation, les règles ayant les mêmes prémisses sont regroupées, et dans chaque groupe ainsi formé, la règle ayant le degré d'importance $D(R^E)$ maximal est choisie pour former la base de règles *finale*.

La méthode décrite ci-dessus effectue une seule passe sur l'ensemble de données pour fournir la base de règles. Elle est ainsi très rapide et facile à implémenter. Néanmoins, notons que, comme évoqué dans [Guillaume 2001], la méthode WM ne garantit pas que la base de règles obtenue soit complète². Ainsi, si des nouvelles données sont situées dans des zones où aucune règle n'a été définie, leur sortie est soit déterminée par défaut ($Out = \alpha$), soit par des techniques d'interpolation entre les règles existantes.

Dans la section suivante, nous allons présenter plusieurs améliorations de la méthode de WM qui ont été proposées dans la littérature.

²Une base de règles est *complète* si pour n'importe quelles données d'entrée, *au moins* une règle est activée.

4.2.3 Améliorations de la méthode WM

La simplicité de la méthode WM, même si elle constitue un avantage en soi, laisse la voie ouverte pour des éventuelles améliorations afin d'atteindre de meilleurs résultats quantitatifs. Cette section est donc dédiée à l'étude des deux principales améliorations de la méthode de WM telles que proposées dans la littérature.

Wang-Mendel Étendue. Dans [Wang 2003], L.X. Wang (un de co-fondateurs de la méthode originale de WM) étend la méthode en divisant le processus de conception d'une règle en deux parties : la partie "SI" et la partie "ALORS". La partie "SI" d'une règle est définie en associant à chaque exemple numérique le sous-espace d'entrée correspondant au degré d'activation maximal pour l'exemple en cause. Soit $E = (x_1, x_2, \dots, x_m, y) \in \mathfrak{R}^{m+1}$ un exemple numérique avec m variables d'entrée et une variable de sortie. Nous associons à E le sous-espace d'entrée :

$$E \Rightarrow (\arg \max_{l_{x_1}} \{\Phi\{x_1\}\}, \dots, \arg \max_{l_{x_m}} \{\Phi\{x_m\}\})$$

où " $\arg \max_{l_i} \{\Phi\{x_i\}\}$ " est l'étiquette linguistique associée au sous-ensemble flou de la variable i , qui couvre au mieux la valeur x_i , et l représente l'indice de l'étiquette. Pour homogénéité de notation, notons cette l'étiquette $A_{x_i}^{l_{x_i}} = \arg \max_{l_{x_i}} \{\Phi\{x_i\}\}, \forall i$.

Par rapport à l'étape (WM-2) décrite ci-dessus, aucune étiquette linguistique pour la variable de sortie n'est associée à E . Dans ce conditions, E est associée au sous-espace d'entrée $(A_{x_1}^{l_{x_1}}, A_{x_2}^{l_{x_2}}, \dots, A_{x_m}^{l_{x_m}})$.

Le degré d'appartenance *cumulatif* de E à ce sous-espace est :

$$\omega^{(E)} = \prod_{i=1}^m \mu_{A_{x_i}^{l_{x_i}}}(x_i) \quad (4.12)$$

Notons encore une fois que $\omega^{(E)}$ ne dépende pas des degrés d'appartenance aux sous-ensembles flous relatifs à la variable de sortie.

Comme dans la version originale, ce procédé est répété pour tous les exemples disponibles, qui sont ensuite groupés dans les différentes sous-espaces d'entrée. Ainsi, soit $SE = (A_{x_1}^{l_{x_1}}, A_{x_2}^{l_{x_2}}, \dots, A_{x_m}^{l_{x_m}})$ un sous-espace d'entrée donné. Notons "K" le nombre d'exemples situés dans ce sous-espace, c.à.d. $E_k, k = 1, \dots, K$. Chaque exemple à un degré d'appartenance $\omega^{(E_k)}$ à ce sous-espace. Afin de choisir la sortie correspondante à ce sous-espace, une moyenne pondérée est calculée comme suit [Wang 2003] :

$$av^{(SE)} = \frac{\sum_{k=1}^K y^{E_k} \omega^{(E_k)}}{\sum_{k=1}^K \omega^{(E_k)}} \quad (4.13)$$

Dans ce conditions $av^{(SE)}$ est un nombre réel, et afin de trouver l'étiquette de sortie correspondante il suffit de chercher le sous-ensemble de sortie $B_y^{l_y^*}$ qui couvre au mieux la valeur $av^{(SE)} \in \mathfrak{R}$, c.à.d. :

$$\mu_{B_y^{l_y^*}}(av^{(SE)}) \geq \mu_{B_y^q}(av^{(SE)}), \quad \forall q \quad (4.14)$$

La base de règles est obtenue en itérant les éq. 4.13 et 4.14 pour tous les sous-espaces. Notons aussi que dans [Wang 2003], l'auteur propose un mécanisme d'ajustement de fonctions d'appartenance de la variable de sortie en utilisant $av^{(SE)}$ et une mesure de variance. Vue que notre objectif est d'obtenir un modèle générique, nous avons décidé de garder la partition uniforme de fonctions d'appartenance, comme illustré dans les figures 4.1 et 4.2.

Wang-Mendel et les règles à double-conclusion. Une deuxième classe d'améliorations de la méthode WM vise à changer l'étape (WM-4), afin de considérer des règles avec deux conclusions pour le même groupe de prémisses.

Les premiers travaux sur les règles à double-conclusion ont été menés par Nozaki et Ishibuchi [Nozaki 1997] pour un système de *Takagi-Sugeno* qui utilise deux bases de règles : une base principale et une base secondaire. Ensuite, la sortie est calculée comme une moyenne pondérée des deux conclusions (voir [Nozaki 1997] pour plus de détails).

L'idée des règles à double-conclusion a ensuite été raffinée par Cordon et Herrera [Cordon 2000] et adaptée pour un système de *Mamdani* afin de traiter des règles linguistiques obtenues avec la méthode WM originale³. Le principe de cette méthode, illustré dans la figure 4.4, est de retenir, pour chaque combinaison de prémisses, les deux meilleures règles selon leur degré d'importance associé. Notons que nous pouvons avoir des combinaisons de prémisses, c.à.d. des zones dans l'espace d'entrée, qui n'ont pas de conclusion associée, simplement parce qu'il n'y a pas d'exemples placés dans ce sous-espace. De manière similaire, pour certaines combinaisons de prémisses, nous pouvons avoir une seule conclusion, si dans cette zone il n'y a qu'un seul exemple.

En itérant toutes les combinaisons de prémisses et en choisissant les deux meilleures règles pour chaque combinaison (si elles existent), une base de règles provisoire est ainsi créée. Le nombre de règles dans cette base (NR) respecte l'inégalité $N \leq NR \leq 2N$, où N est le nombre de règles obtenues avec la méthode WM originale.

Ensuite, un algorithme d'optimisation combinatoire est utilisé afin de chercher dans la base de règles provisoire un sous-ensemble de règles qui minimisent un critère d'erreur, tel que l'erreur quadratique moyenne. Dans [Cordon 2000], les auteurs ont utilisé une approche par algorithmes génétiques (voir section 2.6.2) afin de chercher le sous-ensemble optimal de règles. Le schéma-bloc de cette approche est présenté dans la figure 4.5 pour une base de règles provisoire avec $NR = 5$ règles.

Notons que plusieurs variantes d'optimisation existent dans la littérature où, à la place des AG, nous retrouvons des techniques comme le recuit simulé [Casillas 2002], l'optimisation par colonie de fourmis [Casillas 2005, Ghanbari 2013] ou l'algorithme de recherche locale [Cózar 2014]. Toutes ces approches d'extraction de la base de règles sont regroupées dans la *méthodologie COR* (COoperative Rules) [Casillas 2002].

L'emploi des algorithmes itératifs pour extraire la base de règles permet d'améliorer considérablement les performances quantitatives des systèmes par rapport à des méthodes non-itératives, telles que la méthode de WM. Néanmoins, ces méthodes manquent de prédictibilité en ce qui concerne le nombre d'itérations nécessaire pour converger vers une

³Même si l'algorithme proposé dans [Cordon 2000] est capable de généraliser d'autres méthodes d'extraction de règles, nous limiterons notre discussion à l'amélioration de la méthode WM.

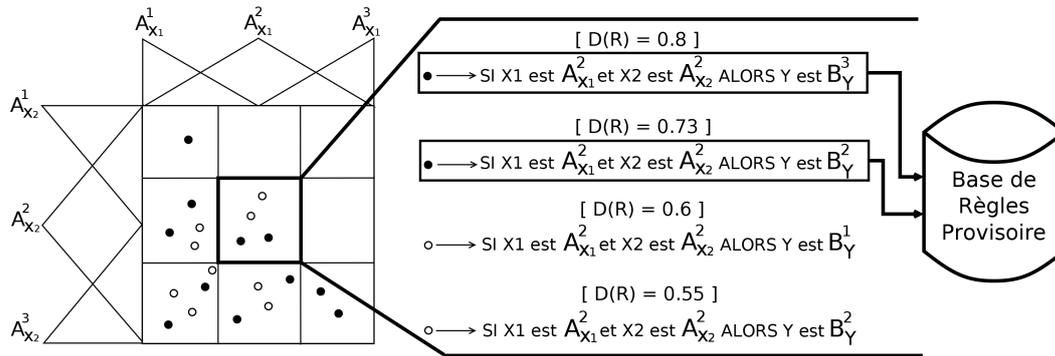


FIGURE 4.4 – Construction d'une base de règles à double conclusion. Dans chaque sous-espace d'entrée les deux meilleures règles (si elles existent) sont retenues. Les points situés dans l'espace d'entrée représentent des exemples numériques. Comme illustré pour un sous-espace donné, chaque exemple donne naissance à une règle floue (voir la figure 4.3). Ensuite toutes les règles obtenues pour un sous-espace sont classées selon leur degré d'importance et les deux meilleures règles sont stockées dans une base de règles *provisoire*. Les points *noirs* représentent des exemples qui donnent naissance à des règles retenues, et les points *blancs* à des règles non-retenues. Les valeurs numériques sont données à titre indicatif.

solution optimale. De plus, leur complexité de calcul est très élevée, vu que la dimension de l'espace de recherche (nombre de solutions possibles au problème) est de l'ordre⁴ de $O(2^{NR})$. Même si quelques limitations peuvent être imposées afin de réduire la dimension de cet espace, le nombre d'évaluations généralement nécessaire pour trouver la solution optimale rend ces méthodes impraticables pour des valeurs de NR très grandes⁵.

Afin de pallier ces inconvénients, nous proposons dans la section suivante une amélioration efficace, du point de vue calculatoire, de la méthode de WM.

4.2.4 Méthode de Sélection-Réduction pour l'extraction de la base de règles

Les méthodes COR basées sur des techniques heuristiques pour extraire la base de règles, bien qu'elles offrent de très bons résultats quantitatifs, nécessitent, pour trouver la solution optimale, un nombre d'évaluations qui augmente de manière exponentielle avec le nombre de règles NR . Notons que l'évaluation d'une seule base de règle potentielle implique l'évaluation d'un certain nombre d'exemples, qui par la suite est noté N_S . Ainsi, lorsque N_S augmente le *coût computationnel* d'une seule évaluation du système augmente aussi.

Compte tenu de cet inconvénient, nous proposons ci-après une méthode *prévisible* et

⁴Pour l'approche basée sur les AG, présentée dans [Cordón 2000] la dimension de l'espace, est $O(2^{NR})$, alors que pour l'approche présentée dans [Casillas 2002] la dimension est de $O(2^N) \leq O(2^{NR})$.

⁵Par exemple, dans [Casillas 2005] le nombre total d'évaluations (TE) nécessaire pour trouver la solution optimale à un problème avec 2 variable d'entrée et une variable de sortie, modélisées par $K = 7$ sous-ensembles flous, va de $TE = 1848$ pour une approche basée sur le recuit simulé jusqu'à $TE = 21343$ pour une approche basée sur l'optimisation par colonie de fourmis.

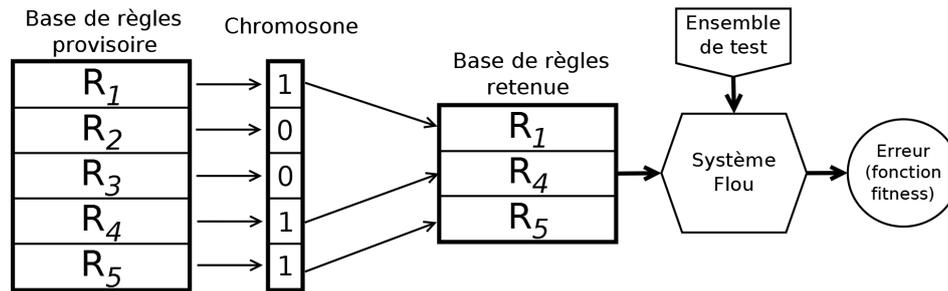


FIGURE 4.5 – Sélection de la base de règles *finale* à partir d'une base de règles provisoires en utilisant les algorithmes génétiques.

faisable de complexité linéaire, qui, sans explorer de manière exhaustive l'espace des solutions possibles, arrive à améliorer les performances du système par rapport aux méthodes classiques d'extraction des règles telle la méthode de WM.

La méthode proposée s'appuie sur les principes développés par Wang et Mendel dans [Wang 1992] et par Cordon et Herrera dans [Cordón 2000] pour générer une base de règles à partir d'un ensemble de données numériques (voir figure 4.3) qui par la suite est étendue pour prendre en compte des règles à double-conclusion (voir la figure 4.4).

À partir de cette base de règles à double-conclusion, la procédure d'extraction d'une base de règles *finale* est constituée de deux étapes indépendantes : la *sélection* des règles les plus pertinentes et la *réduction* de la base de règles obtenue. Le schéma-bloc de la méthode est présenté dans la figure 4.6. Nous allons montrer que la méthode a une complexité de $O(N)$, où N est le nombre initial de règles extraites à l'aide de la méthode de WM.

La sélection des règles. Dans cette étape, un algorithme itératif *déterministe*⁶ est utilisé afin de chercher parmi les règles à double-conclusion celles qui offrent la meilleure performance globale. Les étapes de sélection sont les suivantes :

- (S-1) Considérons une base de règles originale, dénotée BRO , obtenue avec l'algorithme de WM décrit dans la section 4.2.2. Le nombre de règles de BRO est N . Considérons ensuite la base de règles à double-conclusion obtenue à partir de BRO comme décrit dans la section 4.2.3 et illustré dans la figure 4.4. Nous dénoterons cette base de règles $BRDC$. Son nombre de règles est NR , où $N \leq NR \leq 2N$.
- (S-2) Considérons et initialisons la base de règles *finale* (BRF) du système comme suit :

$$BRF = BRO$$
- (S-3) Ensuite, le complément relatif (CR) de BRO dans $BRDC$ est calculé comme la différence ensembliste entre $BRDC$ et BRO :

$$CR = \{BRDC\} \setminus \{BRO\}$$

⁶Le déterminisme invoqué fait référence au nombre d'itérations de l'algorithme, et pas au résultat attendu.

Ainsi, CR est un ensemble qui ne contient que les règles avec le *deuxième plus grand* degré d'importance $D(R)$. Les règles avec le meilleur degré $D(R)$ sont toutes contenues dans BRO . De cette manière, la base de règles $BRDC$ est divisée en deux ensembles : BRO et CR . Les cardinaux de ces ensembles ne sont pas nécessairement égaux, vu que nous pouvons avoir pour une certaine combinaison de prémisses un seul exemple numérique, et donc une seule règle, qui va appartenir à l'ensemble BRO .

(S-4) Toutes les règles ayant le *deuxième plus grand* degré et qui sont incluses dans CR , sont ensuite insérées, *une par une*, dans BRF à la place des règles correspondantes au plus grand degré d'importance, c.à.d. les règles avec les mêmes prémisses, mais une conclusion différente.

(S-5) Le système est testé (sur un ensemble prédéfini de données numériques) en utilisant BRF comme base de règles :

- Si l'erreur globale du système est réduite, alors la règle originale (avec le degré $D(R)$ supérieur) est écartée et la règle avec le deuxième meilleur degré $D(R)$ est retenue comme règle finale pour la combinaison des prémisses ; ainsi elle prend la place de la règle originale dans BRF ; l'erreur globale du système est alors actualisée.
- Sinon, la règle originale (avec le plus grand degré d'importance $D(R)$) est gardée comme règle finale dans BRF .

En itérant (S-4) et (S-5) pour toutes les règles contenues dans CR , nous obtenons une base de règles finale optimisée (BRF). Ensuite, l'étape de sélection est suivie d'une étape de *réduction* de règles.

La réduction de règles. Cette étape vise à la fois à réduire la dimension de BRF , fournissant ainsi une base de règle plus compacte, et aussi à améliorer les performances du système. Les étapes de réduction sont les suivantes :

(R-1) Considérons une base de règles auxiliaire (BRA), initialisée : $BRA = BRF$

(R-2) Ensuite, la deuxième étape consiste à écartier, *une par une* chaque règle $R_i \in BRA$:

$$BRA = \{BRA\} \setminus R_i ;$$

(R-3) Le système est testé avec BRA comme base de règles. Si l'erreur globale est réduite en dessous d'un certain seuil S , défini a priori, alors R_i est définitivement écartée de la base de règles finale :

$$BRF = \{BRF\} \setminus R_i ;$$

Après ces deux étapes la base de règles obtenue est *potentiellement* meilleure et plus compacte que la base de règles originale BRO . Ainsi, la recherche heuristique réalisée par les méthodes COR, est remplacée par ces deux étapes indépendantes.

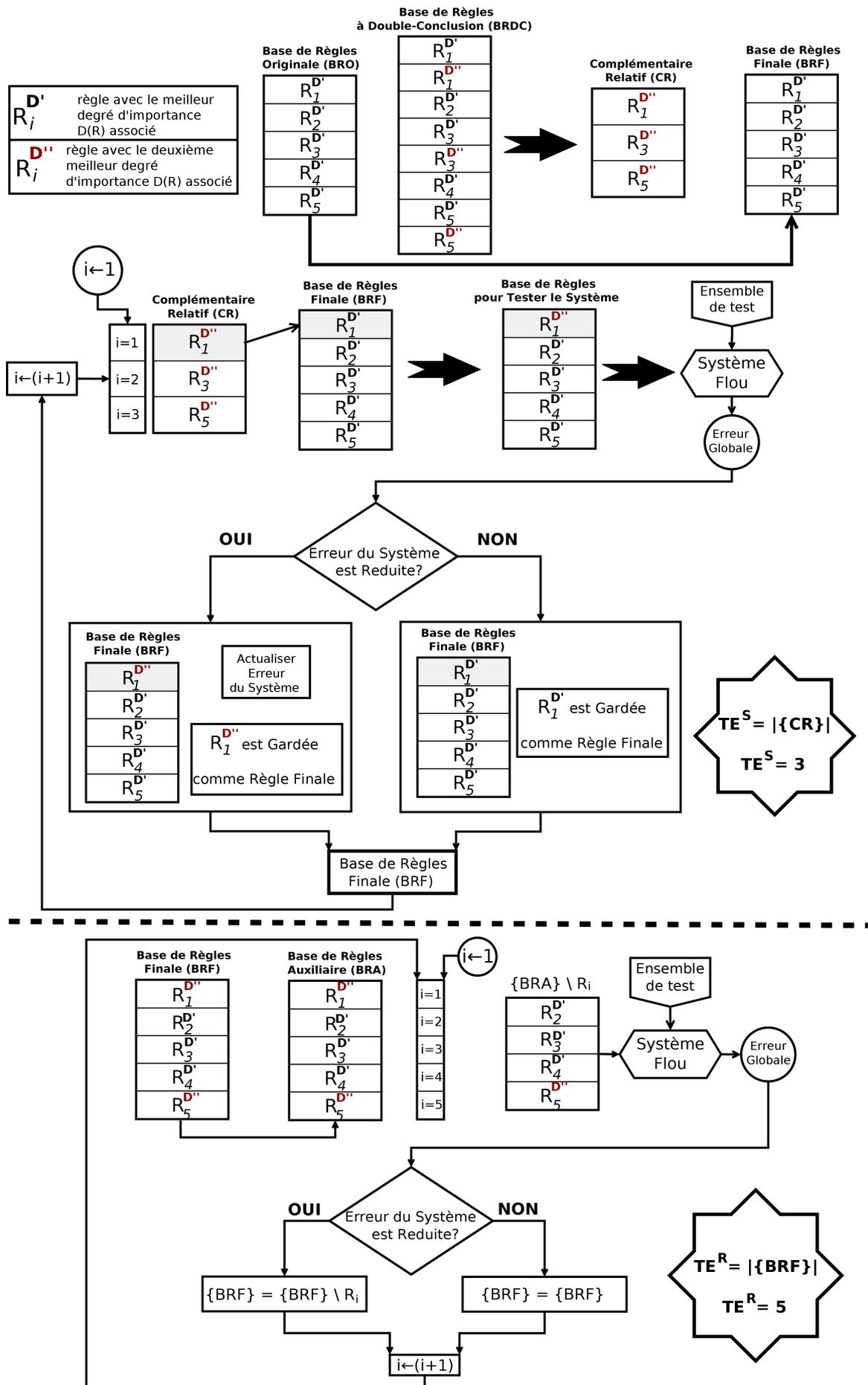


FIGURE 4.6 – Illustration de la méthode *Sélection-Réduction* pour le cas $N = 5$. L'étape de *Sélection* est représentée en haut, celle de *Réduction* en bas.

Complexité de la méthode de Sélection-Réduction (S-R). Comme nous l'avons déjà vu dans la section précédente, la complexité d'une méthode d'extraction de règles est généralement définie comme le nombre total d'évaluations (TE) nécessaires afin de trouver la base de règles finale.

Dans le cas de la méthode S-R, TE est la somme des évaluations réalisées dans les étapes de sélection et réduction :

$$\begin{aligned} TE &= |\{CR\}| + |\{BRF\}| = |\{BRDC\}| \\ &\Rightarrow TE = NR \end{aligned} \quad (4.15)$$

où $|\{\cdot\}|$ représente le cardinal de l'ensemble. En conséquence, TE est limité par :

$$N \leq TE = NR \leq 2N \quad (4.16)$$

Ainsi, l'équation 4.16 montre que le nombre total d'évaluations réalisées par la méthode S-R augmente *linéairement* avec N , c.à.d. la complexité de la méthode est $O(N)$.

De plus, une fois que la base de règles à double conclusion ($BRDC$) est obtenue dans l'étape (S-1), nous connaissons déjà le nombre *exact* d'évaluations à faire et, en fonction du contexte, nous pouvons choisir de continuer la procédure ou de garder BRO comme base de règles finale. Par exemple, un système qui fonctionne en temps-réel et reçoit de nouvelles données toutes les T secondes, sera capable d'estimer par avance combien de temps prend l'extraction d'une nouvelle base de règles, sachant le temps nécessaire pour une seule évaluation (t_e). Ainsi, trois possibilités se présentent :

(a) le système exécutera toute la procédure, c.à.d. (S-1)–(S-5) et (R-1)–(R-3), si :

$$t_e \times NR < T ;$$

(b) le système n'exécutera que l'étape de *Sélection* (S-1)–(S-5) si :

$$\begin{cases} t_e \times |\{CR\}| < T \\ t_e \times NR \geq T \end{cases}$$

(c) le système ne commencera pas la procédure s'il estime qu'il ne peut pas finir l'étape de *Sélection* ($t_e \times |\{CR\}| > T$) ; dans ce cas il utilisera la base de règle originale (BRO), en attendant qu'un opérateur humain modifie la périodicité T des données ;

La complexité en $O(N)$, et surtout la prédictibilité sont les principaux avantages de la méthode. Dans le paragraphe suivant, nous allons analyser de manière synthétique les propriétés principales de la méthode et en tirer quelques conclusions.

Propriétés de la méthode S-R. Après avoir présenté en détails la méthode, quelques considérations sur ces principales propriétés s'imposent :

- la méthode S-R offre *au moins* la même performance quantitative que la méthode WM et *au plus* le même nombre de règles ;

- le nombre *maximal* d'évaluation nécessaires est $2N$, il est connu à l'avance ; de plus, la méthode *S-R* peut être facilement adaptée pour traiter des règles à *c-conclusions*, $c > 2$, tout en gardant une complexité en $O(N)$;
- si le contexte le permet, c.à.d. s'il n'y a pas de contraintes temporelles, la base de règles finale fournie par la méthode *S-R* peut être utilisée comme point de départ pour initialiser une recherche heuristique avec les techniques d'optimisation sus-mentionnées (AG, recuit simulé, colonie de fourmie, etc.), afin d'accélérer leur convergence ;

La méthode proposée offre ainsi une amélioration en termes de performances par rapport à la méthode WM et une amélioration en termes de complexité et temps de calcul par rapport aux méthodes COR. Elle peut être vue comme un compromis entre la performance et la complexité du système, avec aussi l'avantage de la prédictibilité, qui peut être exploitée par un système autonome afin de prendre des décisions en fonction du contexte. Dans la section 4.3.3, la méthode *S-R* sera employée afin d'extraire la base de règles pour le modèle psychophysique. Nous montrerons alors que ses performances sont supérieures à celles de la méthode WM et, par la même, l'utilité de considérer des règles à double-conclusion.

Une fois que la base de règles est identifiée, elle est prête à être utilisée. Néanmoins, si la base de règles est générée automatiquement à partir de données, nous pouvons trouver deux ou plusieurs règles qui expriment *plus ou moins* la même connaissance. Afin de détecter ces situations, une méthode basée sur les données numériques pour estimer la redondance de règles est proposée dans l'annexe D.1. La méthode porte sur les notions de *distance* dans l'espace des règles et *d'influence commune* que les règles ont sur l'ensemble de données. Elle peut donc être utilisée pour détecter et supprimer les règles les plus redondantes, afin d'améliorer l'interprétabilité et la lisibilité de la base de règles.

4.2.5 Opérateurs d'inférence du système

Une fois que la base de données et la base de règles du système ont été définies, il reste à définir les opérateurs d'inférence afin de compléter l'architecture du système. Ces opérateurs d'inférence sont des opérations mathématiques qui assurent la liaison entre les différentes couches du système.

Pour un système de *Mamdani* qui utilise seulement des règles *ET*⁷, nous distinguons quatre classes d'opérateurs d'inférence :

- opérateur de *conjonction* – il assure la connexion ou la combinaison des variables d'entrée ; en conformité avec [Wang 1992] nous avons retenu *le produit arithmétique* (voir ci-dessous) comme opérateur de conjonction, mais d'autres *t-normes* peuvent également être utilisées (voir les équations 2.25).

$$\top_{Conj}(a, b) = a * b;$$

⁷Des règles dont la connexion entre les variables d'entrée est réalisée par un connecteur *ET*.

- opérateur d'*implication* – il est responsable de la détermination de la valeur de sortie à partir d'une combinaison des variables d'entrée ; l'opérateur *min*, proposée par Zadeh dans [Zadeh 1965] a été retenu ;

$$\top_{Imp}(a, b) = \min(a, b);$$

- opérateur d'*agrégation* – il est responsable de l'agrégation de toutes les sorties inférées par les règles qui sont activées pour un seul sous-ensemble flou de sortie ; comme pour l'implication, nous avons choisi l'opérateur *max* proposé par Zadeh dans [Zadeh 1965] ; néanmoins, d'autres *t-conormes* peuvent être utilisées (voir les équations 2.27) ;

$$\perp_{Agg}(a, b) = \max(a, b);$$

- opérateur de *défuzzification* – il permet de passer de la représentation floue à une représentation numérique ; l'opérateur communément utilisé pour réaliser la défuzzification est *le centre de gravité*, défini par l'équation ci-dessous :

$$y = \frac{\sum_i y_i \cdot \mu(y_i)}{\sum_i \mu(y_i)} \quad (4.17)$$

où y_i représentent les points sur l'univers de discours de la sortie agrégée (U_S), et $\mu(y_i)$ représente la valeur de la fonction d'appartenance de la sortie agrégée pour le point $y_i \in U_S$;

L'étape de *fuzzification*, qui consiste à obtenir une description linguistique floue (Φ) à partir de données numériques n'a pas été considérée dans l'énumération ci-dessus vu qu'elle a été traitée dans la section 2.6.4. De plus, la fuzzification n'a pas d'opérateur associé, et les descriptions linguistiques floues sont obtenues uniquement à partir des partitions des variables linguistiques en sous-ensembles flous (voir par exemple la figure 4.1).

Un exemple numérique complet d'inférence floue effectuée par un système de *Mamdani* avec les opérateurs sus-mentionnés est présenté dans l'annexe C.1.

4.3 Performances du modèle psychophysique

Comme nous l'avons déjà évoqué dans le début du chapitre, les techniques floues ont été retenues comme méthodes de modélisation grâce à leur capacité à fournir des modèles *qualitatifs*, facilement interprétables par leur base de règles. Néanmoins, afin de garantir la fiabilité d'un tel modèle, une étude *quantitative* doit être effectuée.

Ainsi, nous présentons dans cette section les résultats quantitatifs et qualitatifs du modèle, suivis par une analyse et une discussion de la base de règles obtenue.

4.3.1 Les variables du modèle et la variabilité des évaluations

L'objectif du modèle psychophysique est de décrire la connaissance générale sur la perception vibrotactile en reliant les trois variables caractéristiques des signaux vibrotactiles aux évaluations subjectives du confort fournies par les 16 utilisateurs. Les données à disposition sont composées de l'ensemble des 48 signaux vibratoires décrits dans la section 3.9.

Variables du modèle. Afin d'avoir une représentation homogène, les valeurs numériques pour les trois variables caractéristiques ont été normalisées dans l'intervalle $[0, 1]$ selon la procédure appliquée dans [Ishibuchi 1994] :

$$E_P(i) = \frac{E_P(i) - \min_i\{E_P(i)\}}{\max_i\{E_P(i)\} - \min_i\{E_P(i)\}}; \quad \bar{V}^+(i) = \frac{\bar{V}^+(i) - \min_i\{\bar{V}^+(i)\}}{\max_i\{\bar{V}^+(i)\} - \min_i\{\bar{V}^+(i)\}}; \quad (4.18)$$

$$ICS(i) = \frac{ICS(i) - \min_i\{ICS(i)\}}{\max_i\{ICS(i)\} - \min_i\{ICS(i)\}}; \quad \forall i = 1, \dots, 48$$

La sortie du modèle, c.à.d. le confort global pour les signaux vibrotactiles évalués par les utilisateurs, défini par l'équation 3.40, a été normalisée de manière similaire dans l'intervalle $[0, 1]$.

Ainsi, chacun des 48 signaux vibrotactiles peut être exprimé par une relation du type :

$$\{E_P(i), \bar{V}^+(i), ICS(i)\} \implies CG(i); \quad \forall i = 1, \dots, 48 \quad (4.19)$$

Variabilité des évaluations. Les informations sensorielles comportent une *variabilité* non-négligeable qui peut être divisée en deux grandes catégories :

- la variabilité *inter-individus* – qui représente la différence d'opinions entre les évaluations subjectives de deux ou plusieurs personnes par rapport au *même* stimulus ; elle est liée à la différence intrinsèque entre les individus : expériences passées, sexe, âge, expertise, etc. ;
- la variabilité *intra-individu* – qui représente la différence d'opinions que le *même* individu a par rapport au *même* stimulus à deux instants différents ; elle est généralement expliquée par une hésitation du sujet, par un changement du contexte ou par l'apparition du phénomène d'adaptation au stimulus ;

La variabilité *intra-individu* quantifie en quelque sorte la *cohérence interne* d'un individu face à un stimulus. Elle peut être vue comme la limite supérieure de précision de l'évaluateur. Pour un modèle prédictif basé sur des évaluations sensorielles, la variabilité *intra-individu* peut ainsi être considérée comme un seuil de précision ou de classification correcte pour un stimulus.

Afin d'estimer la variabilité *intra-individu* pour les évaluations recueillies dans l'expérience 3.9 sur l'ensemble des 48 signaux vibrotactiles, nous avons d'abord calculé la différence absolue moyenne (pour tous les sujets et tous les signaux) entre les estimations de confort du deuxième et troisième bloc⁸ :

$$\overline{Diff} = \frac{\sum_{s=1}^{16} \sum_{i=1}^{48} |C_{Bloc_2}^s(i) - C_{Bloc_3}^s(i)|}{16 \times 48} \quad (4.20)$$

⁸Nous rappelons que le premier bloc de l'expérience 3.9 a été considéré comme une étape de familiarisation avec le dispositif et les signaux vibrotactiles, et, par conséquent, les évaluations correspondantes n'ont pas été prises en compte.

où $C_{Bloc2(3)}^s(i) \in \{-2, -1, 0, 1, 2\}$ représente le degré de confort estimé par le sujet s , pour le signal i , dans le deuxième (troisième) bloc.

La différence absolue moyenne a été ensuite ramenée à un pourcentage en la divisant par la variabilité maximale de l'échelle utilisée, qui dans le cas de l'échelle discrète $\{-2, -1, 0, 1, 2\}$ est $Var_{Max} = 4$;

Ainsi, la moyenne de la variabilité des 16 évaluateurs, pour l'ensemble des 48 signaux vibrotactiles est de 19.5%. L'écart-type autour de la moyenne, pour l'ensemble des évaluateurs est de 5.7% et pour l'ensemble des signaux de 5.5%.

Dans ces conditions, nous proposons de considérer la moyenne de la variabilité des évaluateurs comme le seuil d'évaluation correcte du signal. Ainsi, si la différence absolue entre le degré de confort estimé par les utilisateurs ($CG(i)$) et celui prédit par le système est supérieur à $U = 19.5\%$ de l'intervalle de variation de CG , c.à.d. de l'intervalle $I_{CG} = [0, 1]$, alors le signal sera considéré comme *mal-évalué* et donc incompatible avec le modèle.

Nous noterons ME le nombre de signaux mal évalués par le système par rapport au seuil U . Ensuite, ME doit être normalisé par le nombre total de signaux évalués (M), ce qui conduit à définir le taux d'évaluation correcte (TEC) du système par :

$$TEC = 1 - \frac{ME}{M} \quad [\%] \quad (4.21)$$

TEC représente un premier indicateur de performance du système. Dans la section suivante, d'autres indicateurs quantitatifs sont considérés afin d'offrir une image globale de la performance, de la complexité et de l'interprétabilité du système.

4.3.2 Indicateurs quantitatifs du système

Le nombre de signaux mal évalués, ME , offre une première information objective sur le pouvoir prédictif du système flou. Néanmoins, pour une quantification plus fine de sa performance, une mesure d'erreur globale du système (Δ) a été définie comme suit :

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^M |P(i) - A(i)|}{\sum_{i=1}^M MaxErr_i} \quad \text{avec} \quad MaxErr_i = \begin{cases} A(i) - \min(I_{GC}), & \text{if } A(i) \geq k \\ \max(I_{GC}) - A(i), & \text{autrement} \end{cases} \quad (4.22)$$

où M est le nombre de signaux vibrotactiles évalués ; P et A sont respectivement les vecteurs des valeurs de confort prédites par le système (P) et évaluées par les sujets (A) ; $MaxErr_i$ est l'erreur maximale que le système peut effectuer lors de la prédiction de la valeur de confort pour le signal i ; et k représente le point milieu de l'intervalle de variation I_{CG} ($k = 0.5$ pour $I_{CG} = [0, 1]$).

Les deux mesures définies (Δ et ME) sont plutôt complémentaires, vu que l'optimum d'une des deux ne correspond pas forcément à l'optimum de l'autre. Ainsi, nous avons défini une mesure agrégée, notée *indicateur de performance généralisé* du système (IPG), qui peut être vu comme un compromis entre les deux mesures ci-dessus, et défini par :

$$IPG = \Delta \sqrt{1 + ME} \quad (4.23)$$

La prise en compte simultanée de ces deux aspects, c.à.d. Δ et ME , fait qu'une fois obtenu le nombre optimal de signaux mal évalués, IPG peut être encore optimisé en mini-

misant la composante Δ . Notons que $IPG \in \mathfrak{R}$ peut être vu comme une fonction continue par morceaux, vu que $\Delta \in \mathfrak{R}$ et $ME \in \mathbb{N}$.

IPG peut ensuite être utilisé comme fonction de coût pour évaluer la performance du système lors de la génération (extraction) de la base de règles (voir les blocs conditionnels “*Erreur du Système est Réduite ?*” dans la figure 4.6).

Le dernier indicateur de performance utilisé est l’erreur quadratique moyenne (MSE) :

$$MSE = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (P(i) - A(i))^2 \quad (4.24)$$

où M est le nombre de signaux vibrotactiles évalués, $P(i)$ est le degré de confort prédit par le système et $A(i)$ celui évalué par les utilisateurs (connu a priori).

L’interprétabilité est une caractéristique importante pour un système flou. Ainsi un système flou pourrait aussi être décrit par un index d’interprétabilité. Ainsi, nous avons considéré le cardinal de la base de règles du système comme index d’interprétabilité :

$$NR = |\{BR\}| \quad (4.25)$$

Dans ces conditions, l’interprétabilité d’un système flou est inversement proportionnelle au nombre de règles floues dans la base de règles.

Souvent ignorée, la complexité de la procédure de détermination de l’architecture du système est aussi un attribut important, surtout si le système doit régulièrement mettre à jour son architecture suite à l’arrivée de nouvelles données. Nous proposons de quantifier cette complexité par le nombre total d’évaluations du système (TE) nécessaires pour définir son architecture.

Étant donné que la structure des variables linguistiques (nombre de sous-ensembles flous et fonctions d’appartenance) ne change pas, les seules évaluations réalisées sont celles nécessaires pour définir la base de règles (voir section 4.2.4). Ainsi, TE est utilisé comme indicateur de la complexité architecturale du système.

L’ensemble d’indicateurs définis ci-dessus, c.à.d. $TEC, \Delta, IPG, MSE, NR, TE$, offre une image complète sur les aspects les plus importants d’un système flou : performance, interprétabilité et complexité. Dans la section suivante, ces indicateurs sont calculés pour le modèle psychophysique de la perception vibrotactile.

4.3.3 Modèle psychophysique de la perception vibrotactile

En utilisant l’ensemble des 48 signaux vibrotactiles et la méthode de *Sélection–Réduction* détaillée dans la section 4.2.4, nous avons défini la base de règles floues du système, telle qu’elle est présentée dans le Tableau 4.1. A titre de comparaison et afin de comprendre la différence entre les méthodes, la base de règles obtenue (sur le même ensemble de 48 signaux) avec la méthode WM (voir la section 4.2.2) est présentée dans le Tableau 4.2.

Nous pouvons remarquer que la base de règles WM a une règle supplémentaire⁹ : R_{16} . L’élimination de cette règle effectuée par la méthode $S-R$ dans l’étape de *Réduction*, non seulement améliore l’interprétabilité, mais amène aussi une réduction de l’erreur globale. Cette règle peut être donc considérée comme une règle “*maligne*” pour le système.

⁹La complémentarité évoquée pour la règle en cause fait référence à la combinaison de prémisses ((Faible , Faible , Faible)) qui n’existe pas dans la base de règles $S-R$.

TABLE 4.1 – Base de règles floues obtenue avec la méthode de *Sélection–Réduction* sur l’ensemble de 48 signaux vibrotactiles. Le seuil S pour la réduction d’une règle dans l’étape (R-3) de la méthode a été fixée à $S = 5\%$.

	E_P	\bar{V}^+	ICS	Confort
R_1	Très Faible	Faible	Élevée	<i>Désagréable</i>
R_2	Très Faible	Moyenne	Élevée	<i>Très Désagréable</i>
R_3	Très Faible	Élevée	Élevée	<i>Désagréable</i>
R_4	Faible	Faible	Moyenne	<i>Agréable</i>
R_5	Faible	Faible	Élevée	<i>Très Agréable</i>
R_6	Faible	Moyenne	Moyenne	<i>Neutre</i>
R_7	Faible	Moyenne	Élevée	<i>Neutre</i>
R_8	Faible	Élevée	Élevée	<i>Neutre</i>
R_9	Moyenne	Faible	Faible	<i>Très Désagréable</i>
R_{10}	Moyenne	Faible	Moyenne	<i>Très Agréable</i>
R_{11}	Moyenne	Moyenne	Moyenne	<i>Neutre</i>
R_{12}	Moyenne	Moyenne	Élevée	<i>Neutre</i>
R_{13}	Élevée	Faible	Moyenne	<i>Neutre</i>
R_{14}	Très Élevée	Faible	Moyenne	<i>Désagréable</i>
R_{15}	Très Élevée	Moyenne	Moyenne	<i>Très Désagréable</i>

TABLE 4.2 – Base de règles floues obtenue avec la méthode de *Wang–Mendel* sur l’ensemble de 48 signaux vibrotactiles.

	E_P	\bar{V}^+	ICS	Confort
R_1	Très Faible	Faible	Élevée	<i>Désagréable</i>
R_2	Très Faible	Moyenne	Élevée	<i>Très Désagréable</i>
R_3	Très Faible	Élevée	Élevée	<i>Désagréable</i>
R_4	Faible	Faible	Moyenne	<i>Neutre</i>
R_5	Faible	Faible	Élevée	<i>Très Agréable</i>
R_6	Faible	Moyenne	Moyenne	<i>Neutre</i>
R_7	Faible	Moyenne	Élevée	<i>Neutre</i>
R_8	Faible	Élevée	Élevée	<i>Neutre</i>
R_9	Moyenne	Faible	Faible	<i>Très Désagréable</i>
R_{10}	Moyenne	Faible	Moyenne	<i>Agréable</i>
R_{11}	Moyenne	Moyenne	Moyenne	<i>Neutre</i>
R_{12}	Moyenne	Moyenne	Élevée	<i>Neutre</i>
R_{13}	Élevée	Faible	Moyenne	<i>Neutre</i>
R_{14}	Très Élevée	Faible	Moyenne	<i>Désagréable</i>
R_{15}	Très Élevée	Moyenne	Moyenne	<i>Très Désagréable</i>
R_{16}	Faible	Faible	Faible	<i>Désagréable</i>

TABLE 4.3 – Comparaison entre les méthodes : *S-R*, *WM*, *WM-E* et *AG-DC*. Indicateurs quantitatifs du système sur l'ensemble des 48 signaux vibrotactiles.

Indicateur	<i>S-R</i>	<i>WM</i>	<i>WM-E</i>	<i>AG-DC</i>
Erreur Globale (Δ)	12.54 %	15.33 %	16.01 %	12.43 %
Signaux Mal Évalués ¹⁰ (<i>ME</i>)	4	7	7	3
Taux Évaluation Correcte (<i>TEC</i>)	91.7 %	85.4 %	85.4 %	93.7 %
Erreur Quad. Moyenne (<i>MSE</i>)	0.0140	0.0206	0.0218	0.0135
Nombre de Règles (<i>NR</i>)	15	16	16	10
Évaluations Nécessaires (<i>TE</i>)	23	–	–	1400

En comparant de plus près les deux bases de règles, nous remarquons que les règles mises en évidence dans les deux tableaux, c.à.d. les règles R_4 et R_{10} , ont été *changées* par la méthode *S-R*. Ainsi, la meilleure conclusion pour ces règles n'est pas celle qui offre le meilleur degré d'importance (obtenu par la méthode *WM*), mais celle qui offre le deuxième meilleur degré d'importance.

Ensuite, dans le Tableau 4.3, la méthode *S-R* est comparée avec les trois méthodes de référence dans l'extraction de règles présentées dans les sections 4.2.2 et 4.2.3 : la méthode de *WM* originale [Wang 1992], la méthode de *WM Étendue* (*WM-E*) [Wang 2003] et l'extension où les règles à double-conclusion sont raffinées à l'aide des algorithmes génétiques (*AG-DC*) [Cordón 2000]. Notons que la méthode *AG-DC* a été considérée comme prototype pour toutes les méthodes qui emploient des algorithmes metaheuristiques pour trouver les meilleures règles. Les paramètres de la méthode *AG-DC* sont : une population avec 50 chromosomes binaires, un nombre maximal de 100 générations et les probabilités de croisement et mutations de 0.8 et 0.1, respectivement.

Comme nous pouvons le noter, la méthode *S-R* surpasse les méthodes non-itératives, c.à.d. *WM* et *WM-E*, sur tous les critères de performances, tout en obtenant une base de règles plus compacte et donc plus facile à interpréter. Pour atteindre ces performances, la méthode *S-R* a seulement besoin d'évaluer un nombre $TE = 23$ bases de règles. Notons aussi qu'en bénéficiant d'un nombre d'évaluations largement supérieur ($TE = 1400$), la méthode *AG-DC* obtient les meilleures performances quantitatives. Néanmoins, nous considérons que cette amélioration de la performance globale par rapport à la méthode *S-R* est faible pour justifier les $TE = 1400$ évaluations nécessaires. De plus, comme nous le montrerons plus tard, étant donné le nombre restreint de signaux à disposition, la méthode *AG-DC* est sujet au risque de surentraînement.

Dans la figure 4.7, une comparaison signal par signal entre le degré de confort estimé par les utilisateurs (*CG*) et celui prédit par le système est présentée. La base de règles obtenue avec la méthode *S-R*, illustrée dans le Tableau 4.1, a été utilisée. Les quatre signaux mal évalués en tenant compte de la variabilité U sont indiqués par les traits verticaux. Nous pouvons ainsi remarquer que, pour la plus grande partie des signaux vibrotactiles, le modèle flou arrive à bien prédire le niveau de confort.

¹⁰Les signaux mal évalués sont obtenus pour une variabilité $U = 19.5\%$ (voir la section 4.3.1).

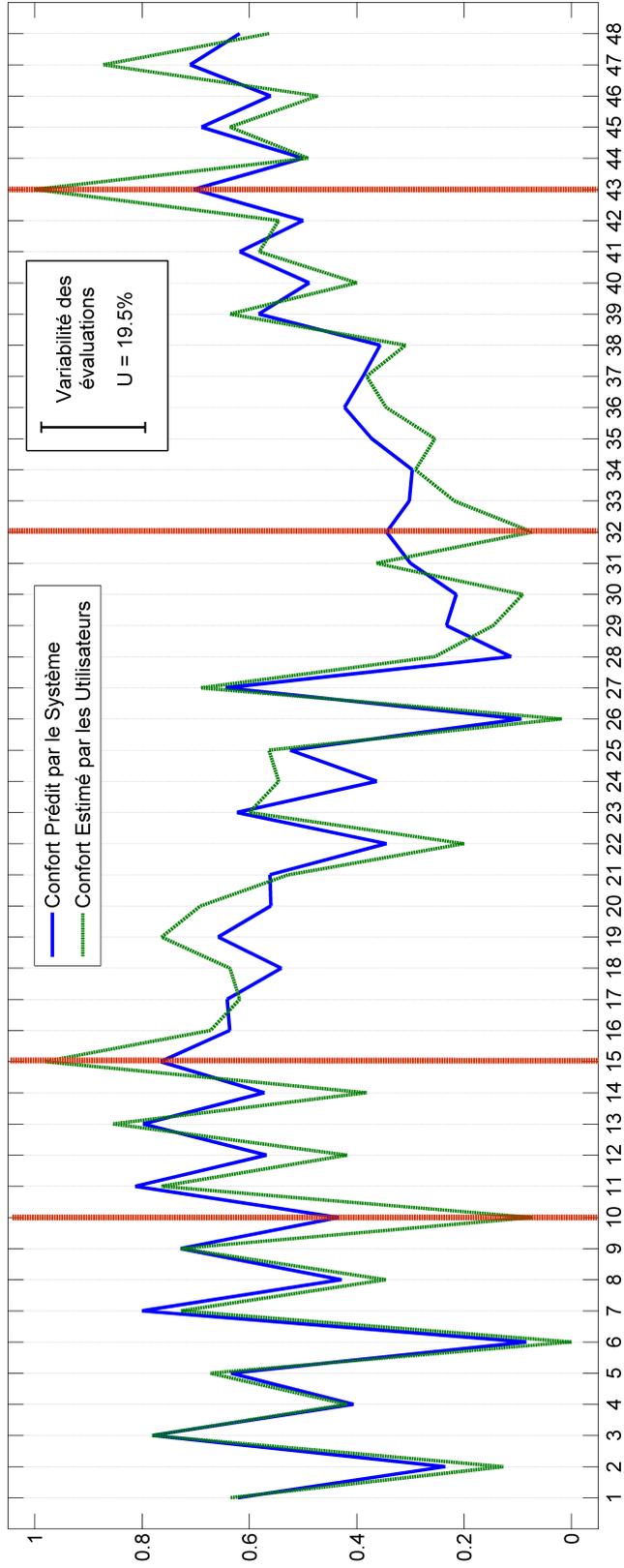


FIGURE 4.7 – Comparaison signal par signal des degrés de confort estimés par les utilisateurs (CG) et prédits par le système flou en utilisant la base de règles présentée dans le Tableau 4.1. La variabilité des évaluations, c.à.d. $U = 19.5\%$ est affichée à l'échelle. Les lignes rouges verticales indiquent les $ME = 4$ signaux mal évalués.

En dehors de l'analyse des indicateurs quantitatifs, une analyse de la redondance de la base de règles obtenue (voir le Tableau 4.1) est présentée dans l'annexe D. Ici nous reprenons les principaux résultats de cette analyse, mais le lecteur intéressé peut consulter les détails de la méthode et la procédure employée dans l'annexe sus-mentionnée.

Ainsi, nous avons montré qu'en enlevant les 6 règles les plus redondantes de la base de règles du Tableau 4.1 (ce qui correspond à une réduction de 40%), la performance quantitative du système ne diminue pas de manière significative. En effet, une base de règles qui contient les $(NR)' = 9$ règles floues les plus importantes, c.a.d. non-redondantes, amène à une erreur globale $\Delta = 13.83\%$ (par rapport à $\Delta = 12.54\%$ en utilisant toutes les $NR = 15$ règles) et à un taux d'évaluation correcte $TEC = 89.6\%$ (par rapport à $TEC = 91.7\%$ en utilisant toutes les $NR = 15$ règles).

La réduction du nombre de règles amène une amélioration de l'interprétabilité du système. Dans ces conditions, une base de règles plus restreinte, mais qui saisit l'essentiel du phénomène, peut être utilisée afin de communiquer, diffuser ou populariser le modèle défini.

Validation croisée. Les indicateurs de performance présentés dans le Tableau 4.3 expriment la capacité de prédiction du système sur l'ensemble d'apprentissage uniquement. Afin d'estimer sa capacité de généralisation, un procédé de validation croisée a été mis en œuvre.

Ainsi, l'ensemble des 48 signaux vibrotactiles a été divisé aléatoirement en un ensemble d'apprentissage de 36 signaux (75%) et un ensemble de test de 12 signaux (25%). Seul l'ensemble d'apprentissage a été utilisé pour apprendre la base de règles. Le système ainsi obtenu est ensuite appliqué à l'ensemble des signaux de test et les indicateurs quantitatifs obtenus sont stockés.

La procédure décrite ci-dessus a été répétée $Q = 100$ fois. Les résultats moyens, pour les Q divisions sont présentés dans le Tableau 4.4. Bien que l'objectif de la validation croisée soit d'évaluer la capacité de généralisation du système, c.à.d. les indicateurs de performance sur l'ensemble de test, les résultats obtenus dans l'étape d'apprentissage sont affichés à titre indicatif. Une comparaison entre les résultats des quatre méthodes d'extraction de la base de règles, c.à.d. $S-R$, WM , $WM-E$, $AG-DC$, est aussi présentée dans le Tableau 4.4. Les paramètres de la méthode $AG-DC$ sont ceux présentés antérieurement.

Les résultats de la validation croisée montrent qu'en utilisant la méthode $S-R$ le système est capable de généraliser la notion de confort pour les données inconnues, obtenant, sur l'ensemble de test, une erreur globale de $\Delta_{test} = 15.6\%$ et un taux d'évaluation correcte de $TEC_{test} = 85.6\%$. Comme prévu, ces valeurs sont inférieures à celles obtenues sur l'ensemble complet de données (voir Tableau 4.3). Néanmoins, elles restent acceptables, ce qui nous permet de conclure que le modèle qualitatif présenté est apte à prédire le degré de confort des signaux vibrotactiles à partir de leurs variables caractéristiques.

On peut également remarquer que, en ce qui concerne l'ensemble de test, la méthode $S-R$ obtient les meilleures performances quantitatives parmi les méthodes testées, en terme de Δ_{test} , TEC_{test} et MSE_{test} . La base de règles ainsi obtenue, ayant un nombre moyen de $NR_{SR} \cong 13.7$ règles, est considérée par les membres du projet *MISAC* comme très

TABLE 4.4 – Comparaison entre les méthodes : *S-R*, *WM*, *WM-E* et *AG-DC*. Résultats quantitatifs de la procédure de validation croisée. Les valeurs affichées représentent une moyenne pour $Q = 100$ divisions aléatoires de l'ensemble de données en apprentissage (75%) et test (25%). Les valeurs obtenues sur l'ensemble de test sont affichées en gras. L'écart-type de chaque indicateur pour les $Q = 100$ divisions est donné entre parenthèses.

Indicateur	<i>S-R</i>	<i>WM</i>	<i>WM-E</i>	<i>AG-DC</i>
Erreur Globale Apprent. (Δ_{appr})	13.26 % (1.04%)	15.23 % (1.20%)	15.63 % (1.10%)	12.50 % (0.97%)
Erreur Globale Test (Δ_{test})	15.60 % (3.18%)	16.24 % (3.00%)	16.63 % (3.10%)	17.31 % (3.51%)
Taux Éval. Correcte Apprent. (TEC_{appr})	91.36 % (2.33%)	86.50 % (3.08%)	85.89 % (2.89%)	93.64 % (2.31%)
Taux Éval. Correcte Test (TEC_{test})	85.67 % (9.10%)	82.92 % (8.81%)	84.42 % (9.30%)	81.42 % (10.18%)
Erreur Quad. Moyenne Apprent. (MSE_{appr})	0.0151 (0.0026)	0.0207 (0.0034)	0.0211 (0.0030)	0.0134 (0.0024)
Erreur Quad. Moyenne Test (MSE_{test})	0.0210 (0.0088)	0.0227 (0.0091)	0.0243 (0.0104)	0.0248 (0.0093)
Nombre de Règles (<i>NR</i>)	13.70 (1.15)	14.55 (1.01)	14.55 (1.01)	10.29 (1.10)
Nombre Évaluations Nécessaires (<i>TE</i>)	20.14 (1.21)	–	–	1299.5 (259.1)

interprétable. De plus, la complexité de la méthode *S-R* reste dans des limites acceptables, vu que les $TE_{SR} \cong 20.1$ évaluations nécessaires peuvent être accomplies sur l'ensemble de signaux vibrotactiles en temps quasi-réel.

4.3.4 Analyse qualitative du modèle psychophysique

La capacité de généralisation du système, établie par la validation croisée, atteste de la qualité de la base de règles obtenue¹¹ sur l'ensemble complet des 48 signaux vibrotactiles, tel qu'illustré dans le Tableau 4.1. Elle devient ainsi la base de règles *finale* du modèle, qui exprime la connaissance générale, au sens psychophysique, sur la perception vibrotactile. Cette manière très intuitive de structurer la connaissance permet ainsi de facilement comprendre les relations entrée-sortie sous-jacentes au phénomène de perception tactile, mais aussi de détecter des *patterns* comportementaux, comme ceux que nous décrivons ci-après.

L'effet de E_P . Un premier pattern comportemental présent dans le Tableau 4.1 est l'effet non-monotone de E_P (la plus importante variable du modèle) sur le degré de confort.

¹¹Étant donné ses performances de généralisation supérieures, nous ne considérons ultérieurement que la base de règles obtenue avec la méthode *S-R*.

Ainsi, nous pouvons remarquer que si E_P est *Très Faible*, le degré de confort est plutôt *Désagréable*, ce qui est cohérent avec le fait que les signaux sont difficilement perceptibles (trop peu intenses). Lorsque E_P augmente, le confort associé aux signaux augmente aussi, et atteint, pour des valeurs *Faibles* de E_P , sa valeur maximale proche du niveau *Agréable*. Augmenter plus E_P fait baisser le confort perçu, et une valeur *Très Élevée* de E_P induit des sensations tactiles *Désagréables* ou *Très Désagréables*.

Discontinuités et règles d'exception. Un deuxième pattern comportemental est caractérisé par les règles R_9 et R_{10} :

R_9 : SI E_P est Moyenne et \bar{V}^+ est Faible et ICS est Faible
ALORS Confort est Très Désagréable

R_{10} : SI E_P est Moyenne et \bar{V}^+ est Faible et ICS est Moyenne
ALORS Confort est Très Agréable

Les deux règles, bien que très proches dans l'espace des variables d'entrée, induisent des sensations tactiles opposées. Une attention particulière doit être accordée à la règle R_9 , qui est la seule pour laquelle le symbole *Faible* pour ICS est utilisé. Les signaux qui activent la règle R_9 se caractérisent par une fréquence électrique élevée (270 Hz et 300 Hz) et une forme d'onde sinusoïdale avec deux périodes, qui induit une cyclicité dans les signaux.

Une complexité spectrale réduite, c.à.d. $ICS \equiv Faible$, qui conduit donc à un signal "monotone", peut être aussi interprétée comme l'absence de "texture" dans les signaux. Dès que ICS devient *Moyenne* et donc que la "texture" des signaux vibrotactiles devient plus marquante, les sensations induites sont *Très Agréables*, notamment parce que E_P et \bar{V}^+ ont des valeurs adéquates.

L'identification de l'effet non-monotone de E_P , ainsi que la mise en évidence de l'importance d'une information de *texture* dans les signaux vibrotactiles, montrent l'intérêt des règles floues comme technique de modélisation de données. Les deux patterns comportementaux relevés par le modèle psychophysique, ont été présentés dans plusieurs sessions plénières du consortium *MISAC*, et ont été considérés par les partenaires industriels du projet comme des effets nouveaux et pertinents pour les deux domaines considérés, c.à.d. automobile et aéronautique. L'analyse qualitative réalisée montre aussi l'intérêt des mesures d'accélération et des techniques de traitement de signal employées afin d'extraire les variables d'entrée. Néanmoins, plus d'expériences sur le banc d'expérimentation *MISAC* sont nécessaires afin de confirmer ou nuancer ces aspects du modèle psychophysique.

Dans la section suivante, nous présentons une interface utilisateur graphique permettant de voir les signaux dans l'espace des variables d'entrée et ainsi de personnaliser le modèle en ajustant les fonctions d'appartenance des variables.

4.4 Personnalisation du modèle par une Interface Graphique

Le modèle psychophysique décrit ci-dessus permet d'obtenir une connaissance générale sur le confort induit par les signaux vibrotactiles en fonction de leurs caractéristiques psychophysiques. La généralité du modèle est principalement due au choix des variables d'entrée qui sont propres aux signaux vibrotactiles et indépendantes du dispositif ou contexte, mais aussi à la division uniforme des univers des discours des variables. Néanmoins, une troisième axe de généralité est lié à l'aspect hétérogène de la population interrogée, qui fait que le modèle obtenu, en essayant de se caler sur *l'évaluation moyenne* de la population, présente un caractère "moyen".

Dans ces conditions, le modèle présenté est considéré comme une version moyenne et générale, qui est acceptée et agréée par la plus grande partie de la population, mais sans être particularisé pour une sous-partie donnée, telle que hommes, femmes, jeunes, vieux, gauchers, droitiers, etc.. Ainsi, dans cette section, nous présentons une interface utilisateur graphique spécialement conçue pour pouvoir particulariser le modèle créé dans un environnement visuel qui facilite l'interprétabilité des concepts. Notons que l'interface utilisateur graphique présentée dans ce manuscrit est une version améliorée de celle proposée dans [Duřu 2014a, Duřu 2014b].

4.4.1 Présentation de l'interface

Avant de commencer l'étape d'individualisation, il est important de comprendre l'architecture du modèle, ainsi que les caractéristiques des données à modéliser. En conséquence, l'interface réalisée permet de consulter les aspects les plus importants du système, tels que les fonctions d'appartenance des variables et la base de règles. De plus, elle permet de visualiser la répartition des signaux vibrotactiles dans l'espace des variables d'entrée.

Ainsi, la figure 4.8.a présente une vue d'ensemble de l'interface utilisateur graphique, où l'espace de représentation des signaux vibrotactiles est celui des variables E_P et \bar{V}^+ . Les distributions des signaux dans les deux autres espaces de représentation sont illustrées par les figures 4.8.b et 4.8.c. Dans les trois cas, les lignes pointillées représentent l'intersection à 0.5 entre deux sous-ensembles flous adjacents.

La répartition des signaux dans les trois sous-espaces d'entrées permet d'identifier les principaux axes de variation sur les trois variables, les zones vides de l'espace (où aucun signal n'est représenté), ainsi que d'autres patterns psychophysiques des signaux.

Par exemple, dans le sous-espace $E_P-\bar{V}^+$ nous pouvons remarquer une grande densité de signaux dans la zone de $\bar{V}^+=Faible$ et $E_P=Moyenne$, alors que l'extrémité de l'espace ($E_P=Très Élevée$ et $\bar{V}^+=Élevée$) présente une zone vide¹².

En ce qui concerne ICS , on peut constater dans la figure 4.8, qu'il atteint sa valeur maximale pour $E_P=Très Faible$, et après commence à baisser des que E_P augmente. Néanmoins, des exceptions à ce comportement existent pour $E_P=Moyenne$ et $ICS=Faible$. Les

¹²Cette observation est en conformité avec les définitions des deux variables (voir les sections 3.5 et 3.6), et suggère qu'avec l'actuel banc de tests la conception de signaux vibrotactiles capables d'activer à des niveaux élevés les deux canaux psychophysiques (P et NP I) *simultanément*, est pratiquement impossible.

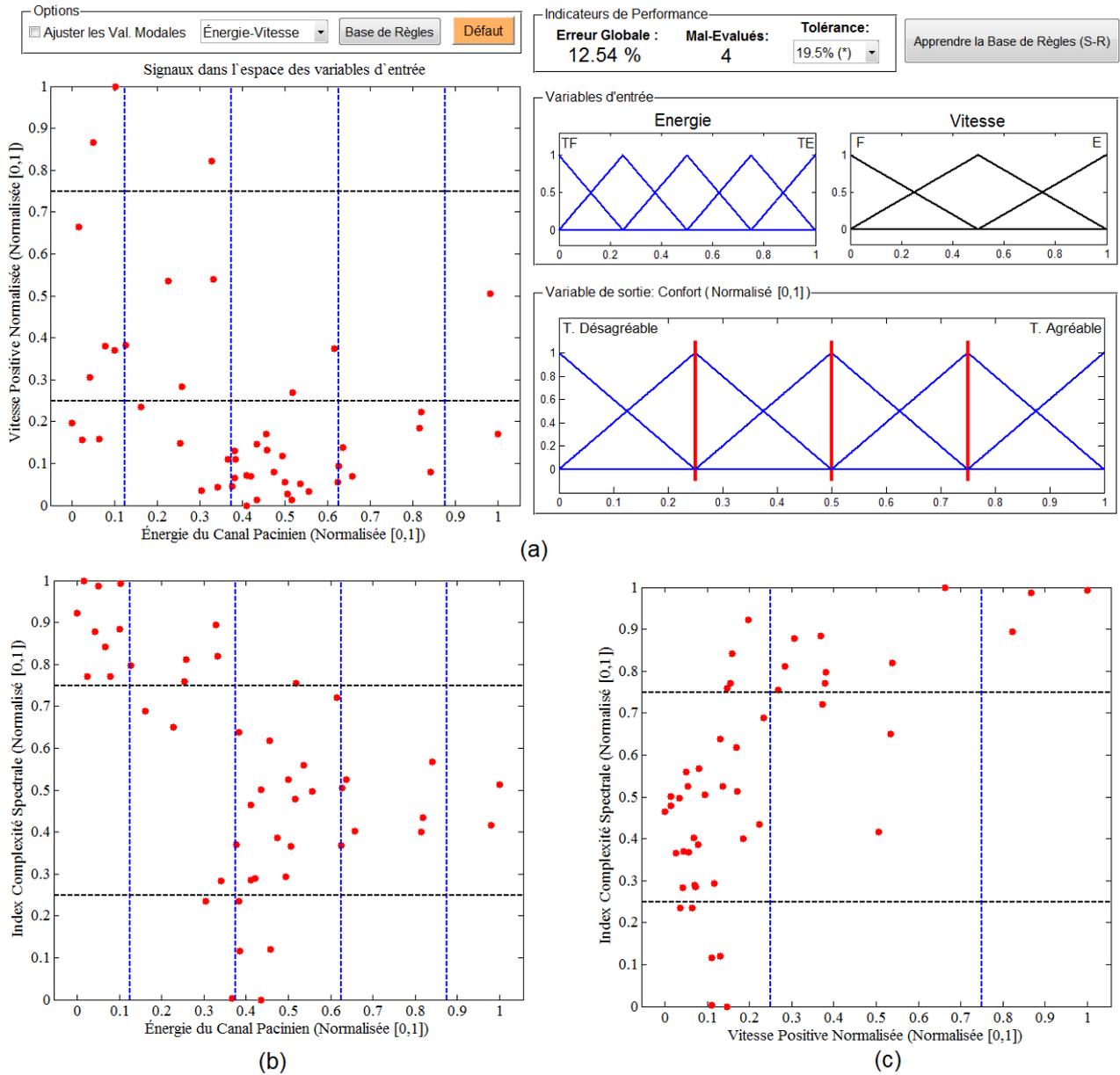


FIGURE 4.8 – (a) Vue d'ensemble sur l'interface utilisateur graphique, où les 48 signaux vibrotactiles sont répartis dans l'espace 2D $E_P-\bar{V}^+$; les figures (b) et (c) présentent respectivement la répartition des signaux dans l'espace E_P-ICS et $ICS-\bar{V}^+$. L'espace de représentation des signaux peut être choisi à travers le menu déroulant dans la section *Options*. Dans (a), à droite, les fonctions d'appartenance correspondant aux deux variables d'entrées et à la variable de sortie sont illustrées. En haut, les indicateurs de performance du système sont affichés. Le nombre de signaux mal évalués est relatif à la tolérance $U \in [15\%, 25\%]$. De plus, en cliquant sur le bouton *Base de Règles*, on peut consulter les règles du modèle (sous forme linguistique) dans une nouvelle fenêtre.

signaux concernés sont pris en compte par la règle R_9 du Tableau 4.1 et la discontinuité introduite par cette règle est discutée dans la section 4.3.4.

Une fois que ces patterns ont été identifiées à l'aide des outils fournis par l'interface, et liés avec l'architecture du système, nous pouvons avancer vers l'étape d'ajustement du modèle afin de le particulariser pour une sous-population ou un contexte d'utilisation donné.

4.4.2 Personnalisation du modèle

Dans cette section, nous montrons comment le modèle psychophysique général peut être particularisé pour une sous-population d'utilisateurs de moins de 35 ans. Il convient de rappeler que l'âge d'une personne est un facteur externe très important pour la perception vibrotactile, comme nous l'avons déjà mentionné dans la section 2.4.4.

Par conséquent, nous avons isolé quatre évaluations des sujets ayant moins de 35 ans à la date de l'expérience. En appliquant le modèle psychophysique général *tel que* sur cette sous-population, les indicateurs de performance sont :

$$\Delta = 14.77\%; \quad TEC = 87.5\% \quad (ME = 6)$$

Il est clair qu'un modèle personnalisé pour cette sous-population peut améliorer ces indicateurs et, par la même, permettre d'extraire une connaissance *ciblée* sur la perception vibrotactile de cette sous-population.

Ajustement du modèle. Afin de pouvoir ajuster les fonctions d'appartenance pour les variables d'entrée du modèle, il suffit de cocher la case "*Ajuster les Val. Modales*", situé dans le panneau "*Options*". Les paramètres libres, pouvant être modifiés, sont les valeurs modales des sous-ensembles flous (VM_i), autres que les valeurs modales extrêmes, qui restent fixées à 0 et 1, respectivement.

$$VM_i = \arg \sup_x \mu_i(x) \quad (4.26)$$

Notons qu'une autre possibilité est de choisir comme degré de liberté l'intersection à 0.5 entre deux sous-ensembles flous adjacents, comme proposé dans [Valet 2003].

La figure 4.9 illustre l'interface employée dans le mode *Ajustement*. Ainsi, nous constatons l'apparition de quelques lignes épaisses (trois lignes verticales pour E_P et une ligne horizontale pour \bar{V}^+) dans la zone de visualisation des signaux. Elles correspondent à la position des valeurs modales des sous-ensembles flous sur l'univers de discours des variables. En utilisant la souris, il est possible de modifier leur position, sous réserve que :

$$VM_{i-1} \leq VM_i \leq VM_{i+1} \quad (4.27)$$

Chaque changement est reflété en temps-réel sur les indicateurs de performance du système, ce qui permet de choisir manuellement leur point optimal. A travers le menu déroulant qui permet de choisir le sous-espace de représentation, les fonctions d'appartenance pour les trois variables d'entrée (qui sont tracées dans la zone "*Variables d'entrée*") peuvent ainsi être ajustées.

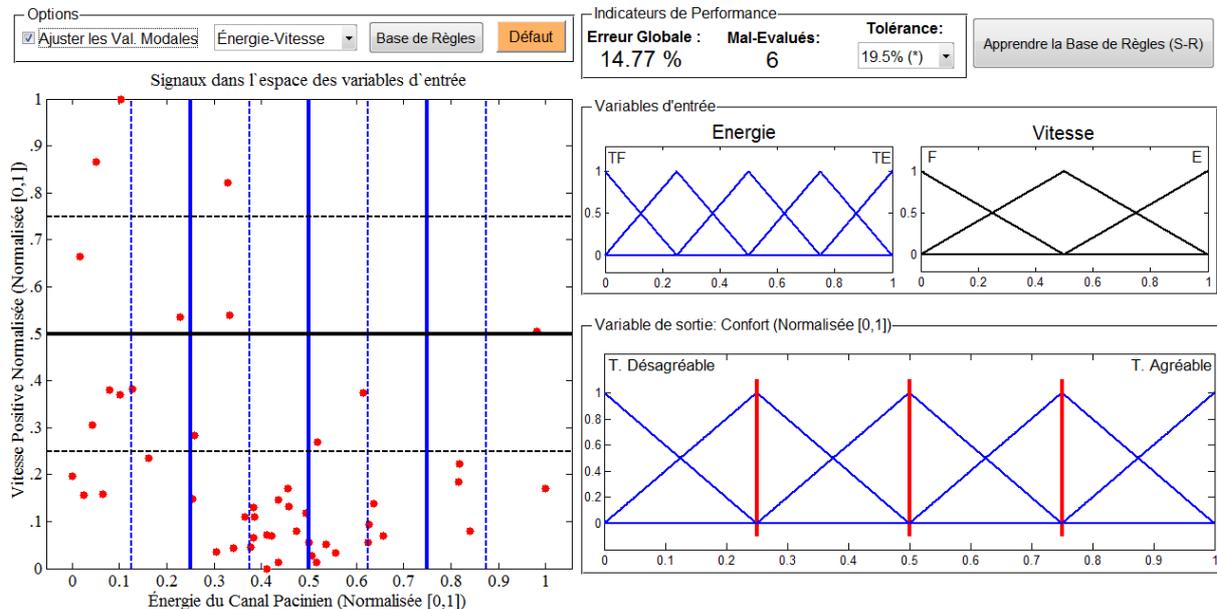


FIGURE 4.9 – Interface utilisateur graphique employée dans le mode *Ajustement*. Noter l’apparition de trois lignes verticales et d’une ligne horizontale dans la zone de visualisation. Elles représentent les valeurs modales des sous-ensembles flous des variables d’entrée et peuvent être modifiées avec la souris. De manière analogue, les lignes épaisses rouges, dans la zone de la variable de sortie, représentant les valeurs modales des sous-ensembles flous, peuvent être modifiées.

La même procédure d’ajustement est appliquée pour la variable de sortie, *Confort perçu*. Notons ainsi, dans la zone réservée à cet effet, la présence de trois lignes rouges verticales, placées sur les valeurs modales de sous-ensembles flous. En respectant la relation 4.27, l’utilisateur peut facilement modifier leur position avec la souris.

Ainsi, afin d’optimiser le modèle pour la sous-population, les fonctions d’appartenance pour les trois variables d’entrée, ainsi que pour celle de sortie ont été obtenues en modifiant sur l’interface les valeurs modales pour chaque sous-ensemble. Cet ajustement a comme principal objectif de réduire l’erreur globale (Δ) et le nombre de signaux mal évalués par le système. Les fonctions d’appartenance optimisées sont illustrées dans la figure 4.10.

Le changement des fonctions d’appartenance des variables, entraîne aussi un changement du degré d’appartenance des données aux différents sous-ensembles flous. En conséquence, une fois les fonctions d’appartenance ajustées, la base de règles du système peut être re-apprise en cliquant sur le bouton “*Apprendre la Base de Règles (S-R)*”. La méthode de *Sélection–Réduction*, présentée dans la section 4.2.4, est utilisée pour extraire la nouvelle base de règles. La méthode *S–R* a été choisie, parmi toutes les méthodes présentées, grâce à ses performances supérieures et à sa complexité réduite.

Ainsi, dans le Tableau 4.5, la base de règles obtenue pour l’ensemble d’utilisateurs est comparée avec la base de règles obtenue pour la sous-population des moins de 35 ans. Pour cette dernière, les fonctions d’appartenance optimisées, illustrées dans la figure 4.10, ont

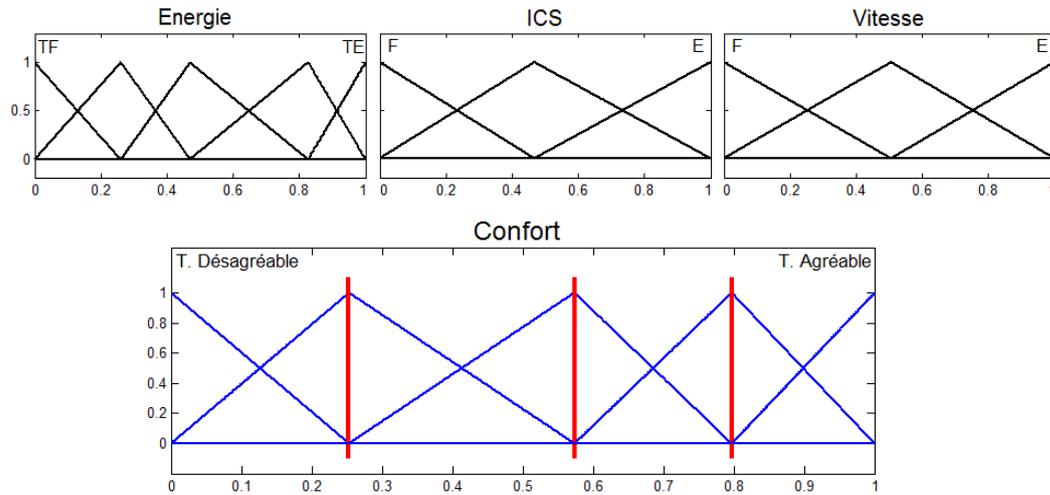


FIGURE 4.10 – Représentations *optimisées* des fonctions d'appartenance employées pour modéliser les évaluations des utilisateurs de moins de 35 ans.

été utilisées.

Nous pouvons donc constater que 10 parmi les 15 règles sont identiques dans les deux bases de règles. De plus, les 5 règles différentes (R_1 – R_3 , R_5 et R_{13}), qui individualisent la connaissance pour la sous-population, sont à ± 1 niveau par rapport à la base de règles générale. Même si dans l'exemple donné ce n'est pas le cas, il convient de préciser que le fait de réapprendre la base de règles *peut* déterminer l'apparition de nouvelles règles ou la suppression d'autres.

De plus, on constate que la base de règles obtenue pour la sous-population de moins de 35 ans est en concordance avec les caractéristiques psychophysiques relevées dans la littérature sur l'effet du facteur *âge*. Ainsi, comme nous l'avons évoqué dans la section 2.4.4, la sensibilité du sens tactile est inversement proportionnelle à l'âge d'une personne. Comme illustré dans le Tableau 4.5, pour des niveaux "*Très Faibles*" de E_P (R_1 , R_2 , R_3) le confort perçu par la population de moins de 35 ans est plus favorable que le confort perçu par la population globale. Cela laisse à penser que, grâce à la sensibilité plus élevée de leurs capteurs, les *jeunes* arrivent à détecter plus facilement ces stimuli¹³, d'où les évaluations plus favorables. D'autre part, cette sensibilité plus élevée fait que, dès que E_P devient *Élevée* (R_{13}), le confort perçu par les *jeunes* est *Désagréable* et non plus *Neutre*, vu que le signal vibrotactile commence déjà à être perçu comme très invasif. Nonobstant les effets sus-mentionnés, les deux patterns comportementaux discutés dans la section 4.3.4 sont aussi présents pour la population de moins de 35 ans, ce qui atteste de la *généralité* de la connaissance obtenue à travers le modèle psychophysique.

Dans ces conditions, en utilisant les fonctions d'appartenance optimisées et la base de

¹³Nous rappelons que l'explication pour les évaluations *négligentes* dans cette zone est liée à la détectabilité difficile de ces patterns (voir *L'effet de E_P* pour plus de détails.)

TABLE 4.5 – Comparaison entre la base de règles obtenue sur l'ensemble des utilisateurs et celle obtenue pour les quatre utilisateurs de moins de 35 ans.

	E_P	\bar{V}^+	ICS	Confort (Population Globale)	Confort (Population Moins 35 Ans)
R_1	Très Faible	Faible	Élevée	<i>Désagréable</i>	<i>Neutre</i>
R_2	Très Faible	Moyenne	Élevée	<i>Très Désagréable</i>	<i>Désagréable</i>
R_3	Très Faible	Élevée	Élevée	<i>Désagréable</i>	<i>Neutre</i>
R_4	Faible	Faible	Moyenne	<i>Agréable</i>	<i>Agréable</i>
R_5	Faible	Faible	Élevée	<i>Très Agréable</i>	<i>Agréable</i>
R_6	Faible	Moyenne	Moyenne	<i>Neutre</i>	<i>Neutre</i>
R_7	Faible	Moyenne	Élevée	<i>Neutre</i>	<i>Neutre</i>
R_8	Faible	Élevée	Élevée	<i>Neutre</i>	<i>Neutre</i>
R_9	Moyenne	Faible	Faible	<i>Très Désagréable</i>	<i>Très Désagréable</i>
R_{10}	Moyenne	Faible	Moyenne	<i>Très Agréable</i>	<i>Très Agréable</i>
R_{11}	Moyenne	Moyenne	Moyenne	<i>Neutre</i>	<i>Neutre</i>
R_{12}	Moyenne	Moyenne	Élevée	<i>Neutre</i>	<i>Neutre</i>
R_{13}	Élevée	Faible	Moyenne	<i>Neutre</i>	<i>Désagréable</i>
R_{14}	Très Élevée	Faible	Moyenne	<i>Désagréable</i>	<i>Désagréable</i>
R_{15}	Très Élevée	Moyenne	Moyenne	<i>Très Désagréable</i>	<i>Très Désagréable</i>

règles du Tableau 4.5, les indicateurs de performance du système sont :

$$\Delta = 9.95\%; \quad TEC = 97.9\% \quad (ME = 1)$$

Ainsi, l'individualisation du modèle pour la sous-population des moins de 35 ans amène une amélioration sensible de la performance. La connaissance obtenue à travers la base de règles et les fonction d'appartenances employées peut être vue comme un cas particulier de la connaissance générale sur la perception vibrotactile. De manière analogue, en utilisant l'interface mise à disposition, le modèle peut être adapté aux autres populations d'utilisateurs ou aux différents contextes d'utilisation.

Pour l'instant l'interface utilisateur graphique a été testée uniquement en interne par les membres du laboratoire *LISTIC* afin de s'assurer qu'elle corresponde aux spécifications et aux attendus du projet *MISAC*. Comme prévu, elle sera prochainement livrée aux partenaires du projet, ce qui leur permettra de personnaliser le modèle vibrotactile selon les spécificités de leur domaine, c.à.d. automobile ou aéronautique.

4.5 Modèle expert pour l'évaluation des signaux vibrotactiles

Dans cette section, nous présentons un deuxième modèle de perception, qui modélise la connaissance d'un *expert* sur le confort induit par les signaux vibrotactiles. Le modèle expert vise ainsi à réaliser une décomposition de la notion complexe de *confort* sur plusieurs critères sensoriels élémentaires. En effet, pour estimer le degré de confort d'un signal vibrotactile, le cerveau intègre des informations subjectives correspondant à différents critères sensoriels. Notons que cette décomposition reste essentiellement dans le domaine de l'évaluation *subjective*. Elle ne doit pas être confondue avec la décomposition *psychophysique* réalisée par le modèle éponyme.

De plus, par rapport au modèle psychophysique, le modèle expert considère la notion de *contexte*, en essayant d'évaluer les sensations induites par les signaux dans un contexte d'utilisation spécifique (automobile ou aéronautique dans notre cas). Dans cette démarche, le modèle expert que nous présentons ci-dessous a été déterminé pour le contexte automobile. Néanmoins, des études préliminaires, qui sont présentées à la fin de cette section, montrent que la connaissance obtenue dans le contexte *automobile* peut être transférée dans une certaine mesure au domaine *aéronautique*.

Nous commencerons donc par présenter les limites du modèle psychophysique, suivies par la procédure expérimentale et l'architecture envisagées pour le modèle expert, avant d'arriver en final à la présentation des principaux résultats associés au modèle établi. Ensuite, la possibilité que le modèle expert défini pour le domaine automobile soit ajusté et transféré au domaine aéronautique est considérée.

4.5.1 Limites du modèle psychophysique

Le modèle psychophysique proposé a permis d'extraire une connaissance générale qui relie le confort induit par les signaux vibrotactiles aux trois variables caractéristiques mesurées à partir de l'accélération de la dalle. Cette approche, bien que très utile à la conception des patterns vibratoires, présente deux inconvénients importants :

- les expériences réalisées nécessitent l'interrogation d'un nombre important (~ 20) de volontaires afin que les évaluations obtenues soient considérées comme fiables ; cette condition est nécessaire vu que les personnes interrogées sont généralement des non-spécialistes qui ne sont pas familiarisées avec les stimuli vibrotactiles et donc n'ont pas une expertise fiable dans le domaine ;
- les variables qui composent le modèle psychophysique expriment le confort sur des grandeurs physiques ; ces variables sont difficilement compréhensibles pour un utilisateur novice et n'expriment pas la connaissance d'un expert en ergonomie sur le confort vibrotactile ; cela limite le pouvoir explicatif du modèle. Ainsi, l'utilisation de variables perceptives, plus proches de ce que ressent l'utilisateur, peut faciliter la compréhension du phénomène et la conception de signaux vibratoires adaptés ;

Afin de dépasser ces inconvénients, le modèle expert pour l'évaluation de la perception vibrotactile est basé sur le savoir-faire et la compétence d'un expert en ergonomie et facteurs humains, ayant plus de dix ans d'expérience dans le domaine automobile. De plus,

l'expert est un membre actif du consortium *MISAC* et donc bien informé des particularités et des attendus du projet.

En conformité avec son expertise, le modèle proposé présente une vision sensorielle-ergonomique de la perception du confort des signaux vibrotactiles. Ainsi, dans la section suivante, les critères sensoriels définis par l'expert sont présentés, ainsi que les procédures expérimentales effectuées.

4.5.2 Procédures expérimentales

Afin de définir le modèle expert, les procédures expérimentales menées ont considéré l'ensemble des 48 signaux vibrotactiles utilisés pour définir le modèle psychophysique.

Les expériences ont eu lieu au siège de VALEO Annemasse (dans le laboratoire *IHM*), et ont été réalisées sur le banc d'expérimentation *MISAC*, décrit dans la section 3.9.1, et illustré dans la figure 3.12. Le logiciel *E-Prime* a été utilisé pour réaliser la communication avec le banc et pour stocker les réponses fournies.

Suite aux discussions avec l'expert, la procédure expérimentale a été divisée en deux étapes distinctes :

- une première étape de jugement du confort, c.à.d. une *évaluation hédonique* pour chacun des 48 signaux vibrotactiles ;
- une deuxième étape où le même ensemble de signaux est évalué par l'expert selon trois critères ergonomiques ; les critères et les termes employés, présentés ci-dessous, ont été définis conformément aux propositions de l'expert ;

Évaluation hédonique. La première partie de l'expérience porte sur l'évaluation hédonique des signaux vibrotactiles, telle que réalisée par l'expert. La procédure expérimentale appliquée est la même que pour les utilisateurs non-spécialistes, décrite en détails dans la section 3.9.2.

Ainsi, l'expert a estimé le degré de confort sur l'échelle bipolaire $\{-2, -1, 0, +1, +2\}$, où -2 correspond au "*Très Désagréable*" et $+2$ au "*Très Agréable*".

Néanmoins, la différence fondamentale entre les évaluations de l'expert et celles des utilisateurs non-spécialistes, est la prise en compte du *contexte*. En effet, alors que les autres utilisateurs ont évalué le degré de confort des signaux vibrotactiles "*tel que*", sans se mettre dans une situation ou dans un contexte particulier, l'expert a évalué le degré de confort dans le contexte *automobile* et en situation *virtuelle* de conduite. Cet aspect amène ainsi à une relativisation de l'évaluation, vu qu'un signal qui est considéré plutôt confortable en absolu, peut être considéré comme gênant ou inconfortable dans le contexte automobile.

Les évaluations hédoniques fournies par l'expert dans les trois blocs de l'expérience ont été stockées afin d'être ultérieurement analysées. Une fois que cette première partie a été finalisée, l'expert a bénéficié d'une pause d'environ 20 minutes avant de démarrer la deuxième partie.

Évaluations sur les critères sensoriels. En utilisant le même ensemble de signaux vibrotactiles et le même dispositif expérimental, c.à.d. le banc de tests *MISAC*, la deuxième

partie de l'expérience a eu comme objectif d'évaluer les signaux vibrotactiles à travers trois critères sensoriels définis par l'expert.

Les trois critères retenus, ainsi que les termes associés sont :

- (a) "*Adaptation au contexte automobile*" – c'est la variable la plus importante du modèle. Elle indique le degré auquel les signaux sont adaptés à une utilisation sur une surface tactile embarquée à bord d'un véhicule de tourisme ;
- Adapté
 - Acceptable
 - Inacceptable
- (b) "*Propreté du signal*" – décrit la netteté et la persistance (vue comme une "*durée subjective*") d'un signal vibrotactile ;
- Nette
 - Moyenne
 - Bruitée
- (c) "*Enfoncement du signal*" – évaluation subjective du niveau d'enfoncement ressenti, sachant que pour reproduire au mieux les sensations tactiles d'un bouton mécanique réel, un certain niveau d'enfoncement (physique et/ou induit¹⁴) doit être fourni par les signaux vibrotactiles ;
- Trop Fort
 - Adapté
 - Moyen
 - Faible
 - Aucun

Défini par l'expert, le vocabulaire employé est beaucoup plus proche de la compréhension humaine que celui utilisé dans le modèle psychophysique. Les trois critères choisis correspondent aux propriétés ergonomiques les plus saillantes, et leur granularité, c.à.d. leur division en catégories, reflète la capacité de discrimination de l'expert pour le critère correspondant.

A travers les deux expériences, l'expert fournit ainsi une double caractérisation des signaux vibrotactiles : (a) sur le degré de confort global perçu ; (b) sur trois critères sensoriels-ergonomiques. Dans la section suivante, nous allons présenter une base de règles floues qui relie ces deux niveaux de caractérisation de la perception. Puis, en utilisant cette base de règles, un modèle symbolique flou sera établi afin de prédire le degré de confort global à partir des évaluations sur les trois critères.

¹⁴L'enfoncement *physique* d'un signal vibrotactile peut être reflété par le déplacement de la surface tactile lors du déclenchement du signal. Néanmoins, une combinaison particulière des paramètres du signal peut *induire* l'impression d'un enfoncement supplémentaire de la dalle. Dans ces conditions, l'expert a évalué le niveau d'enfoncement *global* généré par un signal vibrotactile.

4.5.3 Base de règles *expert*

L'objectif principal de ces expériences est de modéliser la connaissance d'un expert du domaine automobile pour la perception vibrotactile. Vu que les variables d'entrée sont exprimées par des données linguistiques sous forme symbolique¹⁵, sans avoir un univers de discours numérique associé, nous avons considéré un modèle symbolique flou afin de relier ces variables d'entrée aux évaluations sur le confort perçu. Nous rappelons qu'un modèle symbolique flou est caractérisé par l'emploi de variables linguistiques en entrée et en sortie, mais contrairement aux systèmes de *Mamdani*, la sortie d'un modèle symbolique s'exprime par des descriptions symboliques floues, et non par des sous-ensembles flous numériques.

Comme nous l'avons évoqué auparavant dans la section 4.2.2, la base de règles d'un modèle flou est soit apprise automatiquement à partir de données numériques, soit définie par un expert. Ainsi, dans le cas du modèle expert, la base de règles floues, telle que définie après des discussions avec l'expert, est présentée dans le Tableau 4.6.

Les étiquettes linguistiques associées à la sortie du modèle sont *Très Désagréable* ; *Désagréable* ; *Neutre* ; *Agréable* ; *Très Agréable* ;

Remarquons aussi que, pour certaines combinaisons des prémisses, la sortie du système est donnée par une description linguistique floue et non par un seul mot. Par exemple, pour la règle R_{17} nous avons :

R_{17} : SI *Adaptation* est *Acceptable* et *Propreté* est *Nette* et *Enfoncement* est *Adapté*
ALORS *Confort* est $0.5/(\text{Agréable}) + 0.5/(\text{Très Agréable})$

Cette manière de représenter la sortie par une description linguistique floue reflète l'hésitation éventuelle de l'expert sur le mot à associer au degré de confort pour les conditions d'entrée considérées.

En conséquence, la base de règles présentée dans le Tableau 4.6 fournit des relations linguistiques qui décomposent la notion de confort vibrotactile sur plusieurs critères sensoriels. Contrairement à la base de règles du modèle psychophysique, qui a été apprise automatiquement à partir des données, elle reflète entièrement la connaissance de l'expert. De plus, grâce aux critères et au vocabulaire choisi, elle est plus adaptée pour fournir un modèle explicatif de la perception vibrotactile.

Afin de quantifier la validité de la base de règles, ainsi que celles des évaluations réalisées, nous présentons dans la section suivante l'architecture d'un modèle symbolique flou, qui relie, à travers cette base de règles, les variables d'entrée et le confort perçu pour l'ensemble des signaux vibrotactiles.

¹⁵Un symbole, qui peut être représenté par un mot, un nombre, une lettre, etc., est une convention qui n'a de sens que dans le contexte dans lequel on l'a défini [Ioannou 2003].

TABLE 4.6 – Base de règles floues fournie par l'expert.

	Adaptation	Propreté	Enfoncement	Confort
R_1	Adapté	Nette	Trop Fort	$1/\text{Agréable}$
R_2	Adapté	Nette	Adapté	$1/\text{Très Agréable}$
R_3	Adapté	Nette	Moyen	$1/\text{Agréable}$
R_4	Adapté	Nette	Faible	$0.5/\text{Neutre} + 0.5/\text{Agréable}$
R_5	Adapté	Nette	Aucun	$1/\text{Neutre}$
R_6	Adapté	Moyenne	Trop Fort	$1/\text{Neutre}$
R_7	Adapté	Moyenne	Adapté	$1/\text{Agréable}$
R_8	Adapté	Moyenne	Moyen	$0.5/\text{Neutre} + 0.5/\text{Agréable}$
R_9	Adapté	Moyenne	Faible	$1/\text{Neutre}$
R_{10}	Adapté	Moyenne	Aucun	$0.5/\text{Désagréable} + 0.5/\text{Neutre}$
R_{11}	Adapté	Bruitée	Trop Fort	$0.5/\text{Neutre} + 0.5/\text{Agréable}$
R_{12}	Adapté	Bruitée	Adapté	$1/\text{Agréable}$
R_{13}	Adapté	Bruitée	Moyen	$1/\text{Neutre}$
R_{14}	Adapté	Bruitée	Faible	$0.5/\text{Désagréable} + 0.5/\text{Neutre}$
R_{15}	Adapté	Bruitée	Aucun	$1/\text{Désagréable}$
R_{16}	Acceptable	Nette	Trop Fort	$1/\text{Agréable}$
R_{17}	Acceptable	Nette	Adapté	$0.5/\text{Agréable} + 0.5/(\text{Très Agréable})$
R_{18}	Acceptable	Nette	Moyen	$0.5/\text{Neutre} + 0.5/\text{Agréable}$
R_{19}	Acceptable	Nette	Faible	$1/\text{Neutre}$
R_{20}	Acceptable	Nette	Aucun	$1/\text{Désagréable}$
R_{21}	Acceptable	Moyenne	Trop Fort	$0.5/\text{Neutre} + 0.5/\text{Agréable}$
R_{22}	Acceptable	Moyenne	Adapté	$1/\text{Agréable}$
R_{23}	Acceptable	Moyenne	Moyen	$1/\text{Neutre}$
R_{24}	Acceptable	Moyenne	Faible	$0.5/\text{Désagréable} + 0.5/\text{Neutre}$
R_{25}	Acceptable	Moyenne	Aucun	$0.5/\text{Désagréable} + 0.5/\text{Neutre}$
R_{26}	Acceptable	Bruitée	Trop Fort	$1/\text{Neutre}$
R_{27}	Acceptable	Bruitée	Adapté	$1/\text{Agréable}$
R_{28}	Acceptable	Bruitée	Moyen	$0.5/\text{Désagréable} + 0.5/\text{Neutre}$
R_{29}	Acceptable	Bruitée	Faible	$1/\text{Désagréable}$
R_{30}	Acceptable	Bruitée	Aucun	$1/\text{Désagréable}$
R_{31}	Inacceptable	Nette	Trop Fort	$1/\text{Neutre}$
R_{32}	Inacceptable	Nette	Adapté	$1/\text{Agréable}$
R_{33}	Inacceptable	Nette	Moyen	$0.5/\text{Désagréable} + 0.5/\text{Neutre}$
R_{34}	Inacceptable	Nette	Faible	$1/\text{Désagréable}$
R_{35}	Inacceptable	Nette	Aucun	$0.5/\text{Désagréable} + 0.5/(\text{Très Désagréable})$
R_{36}	Inacceptable	Moyenne	Trop Fort	$1/\text{Neutre}$
R_{37}	Inacceptable	Moyenne	Adapté	$1/\text{Neutre}$
R_{38}	Inacceptable	Moyenne	Moyen	$1/\text{Désagréable}$
R_{39}	Inacceptable	Moyenne	Faible	$0.5/\text{Désagréable} + 0.5/(\text{Très Désagréable})$
R_{40}	Inacceptable	Moyenne	Aucun	$1/\text{Très Désagréable}$
R_{41}	Inacceptable	Bruitée	Trop Fort	$1/\text{Désagréable}$
R_{42}	Inacceptable	Bruitée	Adapté	$1/\text{Désagréable}$
R_{43}	Inacceptable	Bruitée	Moyen	$1/\text{Très Désagréable}$
R_{44}	Inacceptable	Bruitée	Faible	$1/\text{Très Désagréable}$
R_{45}	Inacceptable	Bruitée	Aucun	$1/\text{Très Désagréable}$

4.5.4 Modèle symbolique flou de la connaissance experte

Nous allons d'abord présenter une vue d'ensemble de l'architecture du modèle expert. Nous reprenons ici la structure d'un modèle flou donnée au début du chapitre en la particularisant au modèle expert.

Base de connaissances. Le cœur de tout modèle flou est représenté par sa base de connaissance qui est divisée en :

- *La base de données* : offre une caractérisation des variables linguistiques d'entrée et de sortie du modèle ; dans le cas du modèle expert, elle comprend :
 - les noms des variables linguistiques utilisées, leur granularité, ainsi que le choix des étiquettes linguistiques, c.à.d. mots-valeurs associées ; tous ces aspects ont été définis par l'expert ;
 - lorsque les variables linguistique d'entrée n'ont pas un univers de discours numérique associé, le modèle symbolique flou ne nécessite pas la définition de leur fonction d'appartenance, contrairement au système de *Mamdani* ; ainsi les variables d'entrée sont directement exprimées sous forme de descriptions linguistiques floues telles que :

$$\begin{aligned}\Phi\{Adaptation\} &= 1/Adaptée; & \Phi\{Propreté\} &= 1/Nette \\ \Phi\{Enfocement\} &= 1/Moyen\end{aligned}$$

- le dernière aspect concernant la base de données est lié à la variable de sortie du modèle ; comme nous l'avons déjà indiqué, la particularité du modèle symbolique repose sur le fait que la sortie n'est pas décrite par des sous-ensembles flous numériques, mais plutôt par des *descriptions symboliques floues* ; néanmoins, par analogie, un symbole associé à une valeur numérique peut être considéré comme un singleton flou, et donc comme un cas particulier d'un sous ensemble flou numérique (voir la section 2.6.4 pour plus de détails) ;

Ensuite, dans le cas où l'on souhaite associer un univers numérique à la sortie du modèle, l'étape de defuzzification, qui porte sur le passage d'un univers symbolique vers un univers numérique, peut être effectuée en associant des valeurs numériques, appelées *valeurs modales* à chacun des symboles de sortie ;

- *La base de règles* : représente la deuxième composante de la base de connaissances ; dans le cas d'un système symbolique, les règles utilisées ont une structure totalement linguistique. La base de règles présentée dans la Tableau 4.6, fournie par l'expert, est celle utilisée pour la suite.

Opérateurs d'inférence. En s'appuyant sur la base de connaissance définie ci-dessus, l'inférence entre l'espace d'entrée (les trois critères sensoriels) et l'espace de sortie (confort perçu) est effectuée en utilisant la *règle d'inférence compositionnelle* de Zadeh [Zadeh 1975a].

A cette fin, les opérateurs d'inférence du système doivent être choisis. Nous avons imposé, pour des raisons d'interprétabilité des résultats, que "la somme des degrés d'appartenance à chaque symbole de sortie soit 1", c'est à dire :

$$\sum_{i=1}^{K_{Out}} \mu_{S_i} / S_i = 1; \quad (4.28)$$

où K_{Out} représente le nombre de symboles de sortie et μ_{S_i} le degré d'appartenance au symbole de sortie S_i .

En effet, une description du genre "le signal x est 0.7/Agréable + 0.9/Désagréable", même si elle est plausible dans certaines conditions, manque d'interprétabilité et peut être considérée comme contre-intuitive par l'expert.

Ainsi, dans [Mauris 1996] les auteurs montrent, que sous réserve que la somme de degrés d'appartenance pour les variables d'entrée soit de 1, la relation 4.28 est satisfaite en choisissant les opérateurs de combinaison et projection suivants :

$$\begin{aligned} \top(a, b) &= a * b \\ \perp(a, b) &= \min(a + b, 1) \end{aligned} \quad (4.29)$$

où \top est la T-norme utilisée pour la combinaisons conjonctive (ET) des variables d'entrée, et \perp est la T-conorme qui effectue la projection.

Notons néanmoins que la validité des opérateurs ci-dessus est conditionnée par une propriété supplémentaire de la base de règles : l'*exhaustivité*, ou le fait que chaque combinaison de prémisses doit avoir un symbole de sortie associé [Mauris 1996].

Les étapes de combinaison et projection, définies par les opérateurs ci-dessus, permettent d'inférer une sortie symbolique du type "0.3/Agréable + 0.7/(Très Agréable)" pour chaque objet. Cependant, afin de retrouver une valeur numérique, la sortie symbolique doit être defuzzifiée. L'opérateur couramment employé pour defuzzifier une telle sortie symbolique est la méthode des hauteurs [Bouchon-Meunier 1995], définie comme suit :

$$y = \frac{\sum_{i=1}^{K_{Out}} \mu_{S_i} \cdot M_i}{\sum_{i=1}^{K_{Out}} \mu_{S_i}} \quad (4.30)$$

où $M_i \in \mathfrak{X}$ est la valeur modale associée au symbole de sortie S_i .

Un exemple complet, illustrant l'inférence symbolique en utilisant les opérateur ci-dessus, est présenté dans l'annexe C.2.

4.5.5 Résultats du modèle symbolique

L'ensemble des 48 signaux vibrotactiles a été évalué par l'expert sur les trois critères sensoriels (*Adaptation, Propreté, Enfoncement*), ainsi que sur le degré de confort induit. Nous rappelons que l'évaluation sur les critères sensoriels a été répétée deux fois pour chaque signal, et celle sur le degré de confort a été répétée trois fois.

Ainsi, en ce qui concerne les appréciations sur les critères d'entrée, afin de retrouver les évaluations globales pour les signaux vibrotactiles, une étape de pré-traitement a été

effectuée :

$$\begin{aligned} Adaptation(i) &= 0.5/Adaptation_1(i) + 0.5/Adaptation_2(i) \\ Propreté(i) &= 0.5/Propreté_1(i) + 0.5/Propreté_2(i) \\ Enfoncement(i) &= 0.5/Enfoncement_1(i) + 0.5/Enfoncement_2(i) \end{aligned} \quad (4.31)$$

où $Adaptation_{1(2)}(i)$, $Propreté_{1(2)}(i)$, $Enfoncement_{1(2)}(i)$ représentent les appréciations données par l'expert pour le signal i , dans le bloc 1(2) sur les trois critères. Comme ces appréciations représentent des mots-valeurs, tels que *Adaptée*, *Nette*, *Faible*, etc., l'évaluation globale obtenue est une description linguistique floue de type :

$$Adaptation(i) = 0.5/Adaptée + 0.5/Acceptable \quad (4.32)$$

De manière analogue, l'évaluation globale de l'expert sur le confort induit est :

$$Confort(i) = 0.33/Confort_1(i) + 0.33/Confort_2(i) + 0.34/Confort_3(i) \quad (4.33)$$

où $Confort_{1(2)(3)}(i)$ représente respectivement l'appréciation sur le confort induit par le signal i dans le bloc 1(2)(3). Étant donnée la familiarité de l'expert avec les stimuli vibrotactiles ainsi qu'avec le dispositif expérimental utilisé, nous avons décidé de prendre en compte les estimations fournies dans les *trois* blocs et pas seulement celles des *deux* derniers blocs.

Ensuite, afin de quantifier le nombre de signaux mal évalués (*ME*), la *tolérance* des évaluations doit être fixée. Compte tenu du fait que la variabilité est double (évaluations sur les critères *et* sur le confort perçu), nous avons convenu, en accord avec l'expert, d'une valeur de tolérance de $U = 20\%$ de l'intervalle de variation du confort global, correspondant à l'imprécision de l'évaluation :

$$U = 0.2 \cdot (\max_i\{M_i\} - \min_i\{M_i\}) \quad (4.34)$$

où $M_i \in \mathfrak{X}$ est la valeur modale associée au symbole de sortie S_i .

En dehors de *ME*, la performance du système peut être évaluée en utilisant la mesure d'erreur globale Δ (4.22), l'index de performance généralisé *IPG* (4.23) ou l'erreur quadratique moyenne *MSE* (4.24).

Afin de quantifier les performances du système selon ces indicateurs, les valeurs modales des symboles de sortie, c.à.d. {“*Très Désagréable*”; “*Désagréable*”, “*Neutre*”; “*Agréable*”; “*Très Agréable*”} ont été fixées aux valeurs nominales de l'échelle discrète employée, c.à.d. $\{-2, -1, 0, +1, +2\}$. L'idée sous-jacente est que les symboles utilisés par l'expert pour définir la base de règles ont *le même sens* que ceux employés pour évaluer le confort des signaux vibrotactiles. Dans le cas où les deux sont définis/évalués par le même expert, cette équivalence symbolique est *implicite*.

Dans ce cas, la tolérance des évaluations devient $U = 0.2 \cdot [2 - (-2)] = 0.8$.

En conséquence, en utilisant ces valeurs modales pour les symboles de sortie, les performances quantitatives du modèle sont collectées dans le Tableau 4.7. Ainsi, pour 89.6 % des signaux la différence entre l'évaluation de l'expert et la prédiction du système, est inférieure à $U = 20\%$.

TABLE 4.7 – Résultats quantitatifs du modèle expert sur les 48 signaux vibrotactiles.

Indicateur	Résultat
Erreur Globale (Δ)	14.60 %
Taux Évaluation Correcte (<i>TEC</i>)	89.6 % (<i>ME</i> = 5)
Erreur Quadratique Moyenne (<i>MSE</i>)	0.275

Dans la figure 4.11, une comparaison signal par signal entre les évaluations de l'expert et la prédiction du système concernant le confort induit par les signaux vibrotactiles est illustrée. Comme nous pouvons le constater, les courbes correspondantes montrent une liaison étroite et, à l'exception de quelques signaux, les prédictions du système sont compatibles avec les évaluations de l'expert.

Il convient de noter que parmi les *ME* = 5 signaux *exceptions*, qui ne sont pas compatibles avec le modèle, quatre sont situés dans la zone d'*Adaptation=Acceptable* (trois signaux) ou *Adaptation=0.5/Acceptable+0.5/Inacceptable* (un signal), et un seul dans la zone *Adaptation=Inacceptable*. Cette répartition inégale des signaux mal évalués selon le critère de l'adaptation au contexte indique que, dans cette zone intermédiaire du critère, l'hésitation de l'expert augmente. Comme nous le montrerons dans la section suivante, le même type de pattern apparaît dans le domaine aéronautique, *mais* avec un décalage intéressant, qui justifiera la différence entre les deux contextes.

L'analyse ainsi réalisée confirme la cohérence et l'homogénéité des évaluations recueillies. Plus important, elle confirme la validité de la base de règles obtenue, qui peut être ainsi considérée comme une source de connaissance ergonomique dans la conception des signaux vibrotactiles pour le domaine automobile.

Dans la section suivante, la possibilité que cette connaissance obtenue pour le domaine automobile soit "transférée" dans le domaine aéronautique est étudiée.

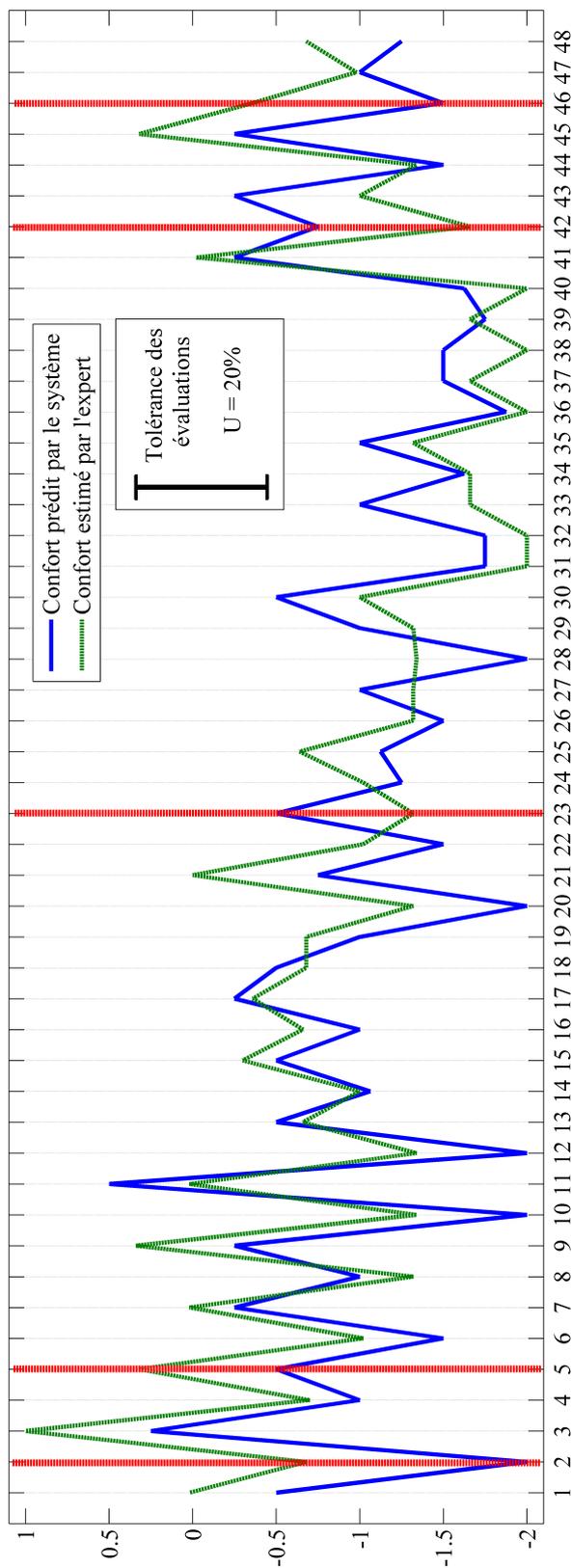


FIGURE 4.11 – Comparaison signal par signal entre le degré de confort estimé par l'expert et celui prédit par le système, en utilisant la base de règles présentée dans le Tableau 4.6. Les valeurs modales pour les symboles de sortie ont été fixées aux valeurs nominales de l'échelle. La tolérance de l'expert par rapport aux évaluations faites, c.à.d. $U = 20\% = 0.8$ est affichée à l'échelle. Les lignes rouges verticales indiquent les $ME = 5$ signaux mal-évalués par rapport à U .

4.5.6 Portabilité du modèle expert au domaine aéronautique

Dans le domaine de l'ergonomie et des facteurs humains, la notion de contexte a une forte influence sur la perception et l'évaluation des différents stimuli. Ainsi, le même stimulus physique peut avoir des évaluations différentes suivant le contexte. Néanmoins, la structure de la connaissance générale sur le stimulus est supposée être la même dans tous les contextes. Par exemple, les concepts “*d'eau chaude*” et “*d'eau froide*” ne correspondent pas aux mêmes températures dans tous les contextes¹⁶, même si la connaissance générale, telle que “pour prendre un bain, l'eau chaude est préférée à l'eau froide” ne change pas en fonction du contexte.

Partant de ce principe, nous allons vérifier l'hypothèse selon laquelle la base de règles floues présentée dans le Tableau 4.6 et utilisée avec succès pour le domaine automobile, peut être portée dans le domaine aéronautique. De manière analogue à l'exemple présenté auparavant, nous pouvons considérer que le même signal vibrotactile peut être jugé comme *Adapté* pour l'automobile et *Inacceptable* pour l'aéronautique, mais que la connaissance générale, telle que “un signal *Confortable* doit être adapté au contexte où il est utilisé” ne change pas.

A cette fin, nous avons répété les deux expériences présentées dans la section 4.5.2 avec un expert du domaine aéronautique, également membre actif du consortium *MISAC* et qui connaît les particularités des signaux vibrotactiles et les attendus du projet. La seule différence entre ces évaluations et celles obtenues avec l'expert du domaine automobile est le contexte considéré. Ainsi, afin d'évaluer le confort et l'adaptation des signaux, l'expert a pris en compte le contexte aéronautique. Les deux autres critères (*Enfoncement* et *Propreté*) étant indépendants du contexte, ils ont été évalués de la même manière.

Ensuite, un système flou avec la base de règles du Tableau 4.6 a été utilisé pour prédire le degré de confort en fonction des évaluations fournies par l'expert. Comme évoqué dans la section 4.5.5, afin de comparer les prédictions du système avec celles de l'expert, les valeurs modales pour les symboles de sortie doivent être fixées. Étant donné que ces valeurs représentent le seul aspect qui différencie le modèle automobile du modèle aéronautique, deux situations seront traitées en parallèle.

Portabilité exacte. Ce premier cas revient à considérer que les deux contextes sont équivalents et donc que les valeurs modales employées dans le contexte automobile sont directement transférables au contexte aéronautique. Nous rappelons que ces valeurs modales pour les symboles {“*Très Désagréable*”; “*Désagréable*”, “*Neutre*”; “*Agréable*”; “*Très Agréable*”} ont été fixées aux valeurs nominales de l'échelle discrète employée, $\{-2, -1, 0, +1, +2\}$. La tolérance des évaluations a été fixée à $U = 20\%$ de l'intervalle de variation du degré de confort, c.à.d. $U = 0.2 \times [2 - (-2)] = 0.8$. Les performances obtenues dans ces conditions sont synthétisées dans le Tableau 4.8.

Ainsi, pour 75% des signaux, les évaluations dans le contexte aéronautique sont *totallement* compatibles avec la base de règles *et* avec les valeurs modales utilisées au contexte automobile. Ca ne signifie pas que les évaluations des signaux sont identiques dans les

¹⁶Une quantité d'eau à la température T qui est considérée *froide* dans certaines zones du globe, peut être considérée *chaude* dans d'autres zones.

TABLE 4.8 – Résultats quantitatifs du modèle expert dans le contexte aéronautique (a). Les valeurs modales utilisées (b) sont les valeurs nominales de l'échelle.

(a) Indicateurs de performance		(b) Valeurs modales	
Indicateur	Résultat	Symbole de Sortie	Valeur
Erreur Globale (Δ)	20.52 %	<i>Très Désagréable</i>	-2
Taux Évaluation Correcte (<i>TEC</i>)	75 % (<i>ME</i> = 12)	<i>Désagréable</i>	-1
Erreur Quadratique Moyenne (<i>MSE</i>)	0.538	<i>Neutre</i>	0
		<i>Agréable</i>	+1
		<i>Très Agréable</i>	+2

deux contextes, mais plutôt que, dans une certaine mesure, la même connaissance générale caractérise les deux contextes. Ainsi, un signal jugé comme *Agréable* pour l'automobile et *Désagréable* pour l'aéronautique, peut être compatible avec le modèle dans les *deux* cas, si les évaluations contextuelles des experts sur les critères sensoriels confirment leur degré de confort perçu.

Portabilité adaptée. Dans ce deuxième cas, l'hypothèse d'équivalence de contextes est rejetée. En conséquence, nous considérons que la signification des symboles de sortie n'est pas la même dans les deux contextes et ainsi que des valeurs modales différentes sont utilisées pour le contexte aéronautique.

En conséquence, afin de trouver les valeurs modales correspondants aux symboles de sortie du modèle dans le contexte aéronautique, nous avons utilisé *IPG* comme fonction coût et nous l'avons minimisée par *recuit simulé*. Notons néanmoins que les valeurs modales correspondants aux symboles de sortie extrêmes, c.à.d. "*Très Désagréable*" et "*Très Agréable*", ont été fixées à -2 et à +2, respectivement. Cette limitation donne plus de cohérence et d'interprétabilité au modèle. De plus, elle réduit le nombre de paramètres à optimiser.

Les indicateurs de performance du modèle, ainsi que les valeurs modales des symboles sont présentées dans le Tableau 4.9. Comme nous pouvions nous y attendre, tous les indicateurs quantitatifs du système se sont améliorés et le nombre des signaux mal évalués est descendu à *ME* = 9. Cependant, comme nous pouvons le constater dans le Tableau 4.9b, il y a un décalage important des valeurs modales des symboles par rapport aux valeurs nominales utilisées dans le contexte automobile. Par exemple, le symbole *Agréable* employé dans un contexte aéronautique a presque la même signification numérique que le symbole *Neutre* employé dans le contexte automobile.

Ensuite, une attention particulière a été portée à la répartition des signaux mal évalués selon le critère *d'adaptation au contexte*. Ainsi, dans le Tableau 4.10, le taux d'évaluation correcte et le nombre de signaux mal évalués pour le contexte aéronautique sont présentés selon ce critère. Nous remarquons donc une dichotomie dans la répartition de ces signaux : tous les signaux jugés *Inacceptables* pour le domaine aéronautique sont compatibles (par

TABLE 4.9 – Résultats quantitatifs du modèle expert dans le contexte aéronautique (a). Les valeurs modales utilisées (b) ont été optimisées par l’algorithme de recuit simulé.

(a) Indicateurs de performance		(b) Valeurs modales	
Indicateur	Résultat	Symbole de Sortie	Valeur
Erreur Globale (Δ)	16.97 %	<i>Très Désagréable</i>	-2
Taux Évaluation Correcte (<i>TEC</i>)	81.3 % (<i>ME</i> = 9)	<i>Désagréable</i>	-1.46
Erreur Quadratique Moyenne (<i>MS E</i>)	0.363	<i>Neutre</i>	-0.24
		<i>Agréable</i>	+0.06
		<i>Très Agréable</i>	+2

TABLE 4.10 – Répartition de signaux mal évalués selon le critère d’adaptation au contexte. Les évaluations sont pour le domaine aéronautique.

Adaptation	Nombre total de signaux	Taux Évaluation Correcte (<i>TEC</i>)
<i>Adapté</i>	9	55.5 % (<i>ME</i> = 4)
<i>0.5/Adapté + 0.5/Acceptable</i>	5	60.0 % (<i>ME</i> = 2)
<i>Acceptable</i>	18	83.3 % (<i>ME</i> = 3)
<i>0.5/Acceptable + 0.5/Inacceptable</i>	11	100 % (<i>ME</i> = 0)
<i>Inacceptable</i>	5	100 % (<i>ME</i> = 0)

rapport à U) avec le modèle, et par là même, avec la base de règles, alors que seulement 55%–60% des signaux *Adaptés* sont compatibles avec le modèle.

Cela signifie que la connaissance générale sur le confort vibrotactile, exprimée par la base de règles, est pratiquement la même dans les deux contextes, pour les signaux jugés comme inacceptables ou quasiment inacceptables. Cependant, le grand nombre de signaux mal évalués parmi les stimuli *Adaptés* peut indiquer soit la nécessité d’un critère sensoriel supplémentaire, lié au domaine aéronautique, soit le besoin de modifier la base de règles pour traiter les cas ambigus. Néanmoins, plusieurs expériences et discussions avec les deux experts seront nécessaires afin de répondre de manière plus poussée à cette question.

En conclusion, l’hypothèse énoncée au début de cette section, selon laquelle la structure de la connaissance générale associée à la perception vibrotactile est la même dans le domaine automobile et aéronautique, a été partiellement confirmée par l’analyse de portabilité. Même si plusieurs expériences et analyses seront nécessaires pour mieux comprendre et raffiner, à la fois le modèle expert et l’équivalence entre les deux domaines, les premiers résultats obtenus dans cette direction sont très satisfaisants. Notons également qu’à notre connaissance ces investigations représentent la première tentative de lier les modèles de confort vibrotactile obtenus pour les domaines automobile et aéronautique.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, en s'appuyant sur les études et résultats des deux chapitres précédents, plusieurs aspects liés à la modélisation des patterns vibrotactiles ont été traités. Ainsi, par des expériences psychophysiques réalisées sur un banc de test spécialement conçu pour étudier les signaux vibrotactiles (banc *MISAC*), deux modèles à base de règles floues ont été proposés : un *modèle psychophysique* et un *modèle expert*.

Le modèle psychophysique, portant sur des variables d'entrée physiques et mesurables, permet de décomposer la notion de "confort vibrotactile" sur trois critères psychophysiques déterminés dans le chapitre 2 et validés dans le chapitre 3. Le choix de ces critères confère au modèle psychophysique un caractère général en ce qui concerne la perception et le confort des stimuli vibrotactiles.

En utilisant une technique efficace pour générer sa base de règles (proposée dans la section 4.2.4), le modèle atteint sur l'ensemble de 48 signaux vibrotactiles une erreur globale de 12.5% et un taux d'évaluation correcte de 91.7% (par rapport à une tolérance de 19.5% sur l'évaluation globale). La pertinence du modèle a été ensuite examinée par une procédure de validation croisée, qui a confirmé sa capacité de généralisation par un taux d'évaluation correcte de 85.6% et une erreur globale de 15.6%.

La performance du modèle étant validée, nous avons concentré notre attention sur les règles linguistiques obtenues, afin d'identifier les patterns comportementaux importants. Ainsi, l'analyse qualitative réalisée dans la section 4.3.4 a révélé l'existence de deux patterns comportementaux portant sur les variables psychophysiques des signaux. Nous rappelons donc l'effet non-monotone que l'activation du canal Pacinien (par E_P) a sur le confort perçu, ainsi que l'importance d'une "texture vibrotactile" dans les signaux, quantifiée par la variable ICS . C'est donc pour la première fois, à notre connaissance, que ces patterns psychophysiques des signaux vibrotactiles sont exhibés dans un modèle de confort. Des expériences plus avancées dans ces directions permettront de consolider ces premiers constats.

En bilan final, l'analyse qualitative du modèle psychophysique, renforcée par les bons résultats quantitatifs obtenus, a été bien reçue par les partenaires industriels du projet. En outre, ils considèrent que la structure linguistique de la base de règles permet de comprendre facilement les différentes interactions entre l'entrée et la sortie.

Ensuite, nous avons présenté une interface utilisateur graphique permettant de particulariser le modèle psychophysique réalisé pour une sous-population donnée ou pour un contexte d'utilisation spécifique. Ainsi, dans l'environnement visuel et intuitif de l'interface, le modèle général a été individualisé pour les sujets de moins de 35 ans, en ajustant les fonctions d'appartenance des variables et en réapprenant la base de règles du modèle. La particularisation de la connaissance générale pour une population spécifique, plus homogène, a permis d'améliorer les performances du modèle et de trouver les règles linguistiques qui le distinguent par rapport au modèle général.

Un deuxième modèle, développé sur les évaluations subjectives d'un expert en ergonomie automobile, a ensuite été proposé. Contrairement au modèle psychophysique, il vise à décomposer la notion de "confort vibrotactile" sur trois critères sensoriels-ergonomiques (*propriété, enfoncement, adaptation au contexte*) et a été spécialement conçu pour le do-

maine automobile.

Le modèle expert obtient sur l'ensemble de 48 signaux vibrotactiles des résultats similaires à ceux du modèle psychophysique, avec une erreur globale de 14.6% et un taux d'évaluation correcte de 89.6%. Notons que le modèle a été testé "tel que" et qu'aucune étape d'apprentissage n'a été employée.

Afin de tester la portabilité du modèle dans le domaine aéronautique, les expériences réalisées ont été répétées par un expert du domaine aéronautique qui a évalué les signaux dans ce contexte. Deux situations distinctes ont été analysées : une portabilité exacte, où le modèle automobile a été appliqué directement et une portabilité adaptée, qui consiste à ajuster les valeurs modales pour les symboles de sortie avant d'appliquer le modèle.

Dans le cas de la portabilité exacte, un taux d'évaluation correcte de 75% est obtenu, alors que pour la portabilité adaptée, cet indicateur monte à 81.3%. Ces valeurs indiquent que, dans une certaine mesure, la même connaissance générale caractérise les deux contextes. La répartition des signaux mal évalués montre que les deux contextes se rapprochent plus sur l'axe négatif que sur l'axe positif. Des analyses supplémentaires et des discussions avec les deux experts pourront consolider ces premières conclusions.

Notons en final que les deux modèles étudiés présentent deux visions différentes sur la perception vibrotactile. A l'avenir, nous envisageons de relier les deux modèles, ce qui permettra d'identifier les relations entre les variables psychophysiques des signaux et les critères sensoriels-ergonomiques employés par l'expert. Étant donné que l'emploi à grande échelle de stimuli vibrotactiles en est encore à ses balbutiements, les deux modèles réalisés constituent un pas important vers la compréhension du phénomène et la conception d'effets vibrotactiles avancés.

Conclusions et Perspectives

Sommaire

5.1 Contributions	137
5.2 Perspectives	140

Dans ce mémoire la problématique des signaux vibrotactiles envoyés au doigt, a été considérée dans le contexte de l'interaction homme-machine à travers les interfaces tactiles. En effet, comme montré par des études récentes, l'évolution des dispositifs à écran tactile est en croissance continue, conquérant chaque année de nouveaux produits et marchés. L'intérêt des utilisateurs pour ce nouveau type de dispositifs est ainsi devenu évident.

Néanmoins, le chaînon manquant de cette évolution est la *réaction* du dispositif face à une *action* humaine, ou autrement dit, le manque d'un retour après l'interaction. Comme nous l'avons précisé dans le chapitre 2, ce handicap peut être contourné par l'ajout de patterns vibrotactiles envoyés directement au doigt de l'utilisateur. Cette approche, guidée par la théorie des ressources multiples, rend l'utilisation des interfaces tactiles plus sûre et plus fiable, notamment dans des domaines comme l'automobile et l'aéronautique, où les ressources visuelles de l'utilisateur sont engagées dans d'autres tâches. Nous constatons donc un début de transformation des interfaces *tactiles* en interfaces *haptiques*.

5.1 Contributions

Les travaux réalisés dans cette thèse sont en accord avec les attendus du projet *FUI-MISAC*. Ils sont essentiellement concentrés sur deux axes de recherche :

- (a) la caractérisation psychophysique des signaux vibrotactiles par des techniques de traitement de signal ;
- (b) la modélisation, à l'aide de la logique floue, de certains aspects sensoriels liés à l'emploi des signaux vibrotactiles ;

Caractérisation des signaux vibrotactiles. Cette première contribution de la thèse a porté sur la définition d'un ensemble de variables caractéristiques pour les signaux vibrotactiles, en s'appuyant sur les propriétés et la composition psychophysique du sens tactile. Ainsi, l'étude bibliographique réalisée a conduit à retenir comme principales variables : (a) l'énergie au fil du temps dans la gamme de fréquence du canal Pacinien (E_p) ; (b) la vitesse positive normalisée (\overline{V}^+), pour refléter l'activation neuronale du canal Non-Pacinien I ; (c)

la complexité spectrale de la vibration (*ICS*), pour refléter le couplage des deux canaux sus-mentionnés.

Afin de définir les trois variables ci-dessus, nous nous sommes appuyés sur les données d'accélération de la dalle tactile, mesurées sur la couche extérieure du dispositif, à l'endroit où les utilisateurs perçoivent les signaux. Il convient de mentionner l'apport de la transformée en ondelettes continue et du scalogramme pour l'analyse temps-fréquence de signaux vibrotactiles à travers leurs données d'accélération.

Ainsi, en s'appuyant essentiellement sur le scalogramme, qui représente la distribution de l'énergie du signal dans l'espace temps-fréquence, les trois variables caractéristiques ont été analytiquement définies dans le chapitre 3. Leur conformité psychophysique a été ensuite validée par des mesures de corrélation avec la dissimilarité perceptuelle entre les signaux vibrotactiles. Nous avons ainsi obtenu une corrélation de 91% pour E_p , de 82% pour \bar{V}^+ et de 66% pour *ICS*.

La caractérisation psychophysique réalisée par les trois variables, ainsi que l'emploi du scalogramme pour l'analyse des signaux vibrotactiles, représentent un des aspects novateurs de cette thèse.

Modèle psychophysique du confort vibrotactile. Suite aux bons résultats obtenus dans l'étape de caractérisation des signaux vibrotactiles, un modèle psychophysique à base de règles floues, dont l'entrée est constituée des trois variables précédentes, a été proposé. Le modèle est employé pour prédire le niveau de confort induit par un signal vibrotactile en fonction de ces paramètres psychophysiques. Il représente la principale contribution de cette thèse à l'étude des patterns haptiques.

En s'appuyant sur ces trois variables physiques, qui sont indépendantes du contexte, le modèle psychophysique synthétise une forme de connaissance *générale* sur la perception des signaux vibrotactiles issus d'une interface haptique. Ainsi, sous réserve de nouvelles expériences, nous pouvons supposer que le modèle psychophysique peut être facilement appliqué ou adapté dans différents domaines où l'interaction homme-machine a besoin d'être enrichie par les patterns vibrotactiles, tels que interfaces tactiles à bord des véhicules et avions, distributeurs automatiques de billets, machines à café/boissons, etc.

Afin d'étayer cette affirmation, nous avons calculé la performance quantitative du modèle, qui atteint, sur un ensemble diversifié de 48 signaux vibrotactiles, une erreur globale de 12.5% et un taux d'évaluation correcte de 91.7%. De plus, le modèle montre sa capacité à généraliser ses prédictions de confort pour des données inconnues, à savoir une erreur globale de 15.3% et un taux d'évaluation correcte de 85.3%.

La connaissance obtenue à travers le modèle psychophysique a permis l'identification de deux patterns comportementaux importants pour la perception vibrotactile :

- (a) l'influence non-monotone de l'activation du canal Pacinien sur le confort perçu ; ainsi, il est recommandé qu'un signal vibrotactile active de manière faible ou moyenne le canal Pacinien afin d'être perçu comme agréable ;
- (b) l'importance d'avoir un certain degré de complexité spectrale dans les signaux vibrotactiles ; l'idée est ensuite d'examiner dans quelle mesure la complexité spectrale telle

que définie peut expliquer la notion de *texture vibrotactile* qui permettra la conception de patterns vibrotactiles complexes, au delà d'une simple validation de l'action sur la surface ;

Les deux patterns comportementaux, issus de l'analyse qualitative de la base de règles, sont intégrés dans les livrables du projet *MISAC*. Étant donné l'aspect novateur de ces patterns pour le domaine automobile et aéronautique, ainsi que les bonnes performances quantitatives obtenues, le modèle psychophysique général a été agréé par tous les partenaires du projet, et en particulier par les partenaires industriels.

Afin de faciliter la dissémination du modèle, une interface utilisateur graphique a été implémentée. Elle permet d'utiliser le modèle et de visualiser les données de manière intuitive, dans un environnement graphique. Elle permet aussi d'ajuster le modèle pour différentes sous-populations ou contextes d'utilisation.

En dernière analyse, n'oublions pas l'apport de la méthode de *Sélection-Réduction* pour générer la base de règles du système, qui contribue de manière substantielle aux performances quantitatives obtenues. Sa complexité calculatoire réduite et sa prédictibilité la recommande comme une alternative fiable à d'autres méthodes plus complexes pour extraire les règles floues à partir de données numériques. Des expériences supplémentaires et des comparaisons plus poussées devraient permettre d'établir de manière plus générale l'intérêt, ainsi que les limites de cette méthode.

Modèle expert. La troisième contribution de cette thèse s'inscrit aussi dans l'axe de modélisation. Elle porte sur la conception d'un modèle ergonomique de la perception vibrotactile. En s'appuyant sur les évaluations d'un expert en ergonomie automobile, le modèle décompose la notion de "confort vibrotactile" sur trois critères sensoriels.

Il convient de noter que le modèle réalisé prend en compte la notion ergonomique de "contexte" et, contrairement au modèle psychophysique générique, est ciblé pour le domaine automobile. La base de règles du modèle, qui synthétise la connaissance ergonomique au contexte automobile sur le confort induit par les stimuli vibrotactiles, a été fournie directement par l'expert. Eu égard au fait que les variables d'entrée n'ont pas été associées à un univers numérique, un système symbolique flou a été considéré afin d'implémenter le modèle. Nous avons ensuite montré que les performances quantitatives obtenues sont bonnes, c.à.d. une erreur globale de 14.6% et un taux d'évaluation correcte de 89.6%, ce qui valide la pertinence de la base de règles obtenue dans le contexte automobile.

Puis, la possibilité de porter le modèle expert *automobile* dans le contexte *aéronautique* a été étudiée. Les résultats obtenus en ajustant les valeurs modales des symboles indiquent un taux d'évaluation correcte de 81.3%, ce qui a permis de partiellement valider l'adéquation de la base de règles pour le domaine aéronautique. De plus, l'analyse réalisée sur les signaux mal évalués par le modèle montre que leur distribution n'est pas uniforme dans l'espace des variables d'entrée. Ainsi, nous avons trouvé que la plus grande partie des signaux mal évalués, c.à.d. incompatibles avec le modèle, sont localisés sur l'axe positif de l'adaptation. Il a donc été suggéré que l'ajout d'une variable supplémentaire, représentative pour le domaine aéronautique, pourrait améliorer les performances du modèle pour ces signaux.

En bilan final, les résultats obtenus sur les trois contributions majeures de cette thèse ont permis d'acquérir de nouvelles connaissances, importantes pour l'analyse et la conception de signaux vibrotactiles. Étant donné l'aspect novateur de ces travaux dans le domaine de la perception vibrotactile, au delà d'une validation plus poussée par des nouvelles expériences, plusieurs perspectives ou pistes d'amélioration peuvent être considérées.

5.2 Perspectives

En suivant la structure globale du manuscrit, les principales perspectives de ces travaux s'articulent autour des deux grands axes de recherche explorés, c.à.d. la caractérisation et la modélisation des signaux vibrotactiles, mais aussi autour d'un nouvel axe qui concerne la conception de stimuli multi-modaux, où la modalité haptique est fusionnée avec les modalités auditive et visuelle afin de créer des sensations multimodales complexes.

Ainsi, à court terme, les résultats du modèle psychophysique peuvent être utilisés comme point de départ pour approfondir la connaissance sur la *texturisation vibrotactile* en utilisant une version améliorée de l'index de complexité spectrale, prenant aussi en compte l'évolution temporelle de la complexité. Dans le même contexte, l'emploi d'autres indicateurs psychophysiques issus du scalogramme peut améliorer la caractérisation et l'analyse des textures vibrotactiles et, par là même, la conception de signaux capables d'induire les mêmes sensations tactiles qu'une texture réelle.

Notons également que la maîtrise de la texture vibrotactile a aussi des implications à long terme, qui dépassent largement le cadre de cette thèse, pouvant aller vers le domaine de la réalité augmentée et des systèmes immersif haptiques. Cette hypothèse est principalement soutenue par les variables extraites du scalogramme, qui quantifient des propriétés psychophysiques générales du sens tactile et qui sont indépendantes du contexte. Par exemple, on peut supposer que l'activation du canal Pacinien par un gant haptique ou par un signal vibrotactile issu d'un écran capacitif a la même variable physique associée, et que celle-ci peut être déterminée à partir du scalogramme, comme montré dans le chapitre 3.

En restant sur l'axe de la caractérisation des signaux, il sera intéressant de quantifier les critères sensoriels-ergonomiques utilisés par le modèle expert, à partir du scalogramme. Cela permettra de lier les deux modèles, psychophysique et expert, et par là même de disposer d'une connaissance plus complète sur le confort perçu. A cette fin, la décomposition supplémentaire de l'*adaptation* des signaux en plusieurs critères sensoriels *élémentaires*, tels que l'intensité, la durée, la réactivité, etc., est envisagée.

En ce qui concerne l'axe de la modélisation, une extension naturelle du modèle psychophysique est la prise en compte des patterns vibrotactiles complexes, associés aux différentes composantes virtuelles, telles que les claviers tactiles, les sliders, ou les rotarys. Compte tenu des bons résultats obtenus dans ce contexte, la logique floue est envisagée comme principale méthode de modélisation.

Une autre perspective importante pouvant être dégagée concerne la liaison entre le modèle automobile et le modèle aéronautique. Il sera donc intéressant d'explorer plus en détails les particularités de ces deux domaines vis-à-vis de la perception vibrotactile et

ensuite d'étudier dans quelle mesure un modèle *commun* automobile-aéronautique pourra être réalisé.

A plus long terme, l'intégration des aspects contextuels, automobiles ou aéronautiques, dans le modèle psychophysique général pourra être corroborée par l'inversion du modèle afin de répondre à une consigne de confort définie par l'utilisateur, en lui envoyant les signaux vibrotactiles correspondant à cette consigne. Dans cette optique, la caractérisation mécanique du banc haptique permettra de déterminer directement les paramètres du signal électrique à envoyer à l'actionneur afin d'obtenir un certain effet vibrotactile ou un certain niveau de confort.

Finalement, en ce qui concerne la conception des stimuli multi-modaux, il sera intéressant d'analyser d'abord la synergie haptique-audio et de voir comment la modalité audio influe sur la modalité haptique. Étant des séries temporelles, les signaux sonores peuvent être analysés par une transformée en ondelettes continue. Une analyse en parallèle des scalogrammes pour les signaux vibratoires et audio permettra de déterminer la correspondance entre les deux stimuli et d'identifier l'influence réciproque des deux modalités. Ensuite, les variables caractéristiques des signaux audio pourront être intégrées dans les deux modèles réalisés, afin de formaliser la conception de stimuli multi-modaux.

Multi-Dimensional Scaling et Matrice de Dissimilarité Perceptuelle

Sommaire

A.1 Multi-Dimensional Scaling	143
A.2 Matrice de Dissimilarité Perceptuelle	146

A.1 Multi-Dimensional Scaling

Le *Multi-Dimensional Scaling*, abrégé *MDS*, est une technique statistique utilisée pour la visualisation de l'information, introduite par Shepard [Shepard 1962a, Shepard 1962b], et améliorée par Kruskal [Kruskal 1964a, Kruskal 1964b]. La technique de MDS consiste à représenter M objets par M points dans un espace métrique à N dimensions, de manière à ce que les distances entre ces points correspondent au mieux aux dissimilarités entre les objets [Kruskal 1964a]. Cela revient donc à faire une *projection* de l'espace des dissemblances dans l'espace des distances métriques.

La correspondance (*distances*) \Leftrightarrow (*dissimilarités*) est obtenue par un algorithme itératif, décrit dans [Kruskal 1964b], qui consiste à maximiser la qualité de la projection, évaluée par une fonction de coût appelée *stress*. La fonction de stress originale proposée dans [Kruskal 1964b] est décrite par l'équation (A.1), même si beaucoup d'autres mesures pour évaluer la qualité de la projection peuvent être utilisées.

$$Stress = \sqrt{\frac{\sum (d_{i,j} - \hat{d}_{i,j})^2}{\sum d_{i,j}^2}}; \quad \forall i, j = 1, \dots, M \quad (\text{A.1})$$

où $d_{i,j}$ représente la dissemblance entre les objets i et j , et $\hat{d}_{i,j}$ représente la distance Euclidienne dans l'espace métrique à N dimensions entre les points i et j . Notons que d'autres métriques, telles que la distance de Manhattan, peuvent être employées à la place de la distance Euclidienne.

Fondamentalement, avant d'appliquer l'algorithme de MDS nous devons disposer d'une matrice de dissimilarités entre $M \times M$ paires d'objets. Ensuite, l'algorithme affecte un point $P_i = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ dans un espace N -dimensionnel pour chaque objet i , et procède aux calculs de toutes les distances $\hat{d}_{i,j}$ entre P_i et P_j , $\forall i, j = 1, \dots, M$. La qualité de la projection est évaluée par la fonction *stress* et, après par un processus itératif, les points P_i sont altérés dans le sens où ils minimisent cette fonction.

144 Annexe A. Multi-Dimensional Scaling et Matrice de Dissimilarité Perceptuelle

TABLE A.1 – Dissimilarités perceptuelles entre 14 couleurs avec $\lambda \in [434nm, 674nm]$. Données de [Ekman 1954, Groenen 2005].

nm	434	445	465	472	490	504	537	555	584	600	610	628	651	674
434	–													
445	.14	–												
465	.58	.50	–											
472	.58	.56	.19	–										
490	.82	.78	.53	.46	–									
504	.94	.91	.83	.75	.39	–								
537	.93	.93	.90	.90	.69	.38	–							
555	.96	.93	.92	.91	.74	.55	.27	–						
584	.98	.98	.98	.98	.93	.86	.78	.67	–					
600	.93	.96	.99	.99	.98	.92	.86	.81	.42	–				
610	.91	.93	.98	1.00	.98	.98	.95	.96	.63	.26	–			
628	.88	.89	.99	.99	.99	.98	.98	.97	.73	.50	.24	–		
651	.87	.87	.95	.98	.98	.98	.98	.98	.80	.59	.38	.15	–	
674	.84	.86	.97	.96	1.00	.99	1.00	.98	.77	.72	.45	.32	.24	–

Notons que l'ensemble des solutions triviales à ce problème est représenté par tous les cas où $N \geq M - 1$, qui nous fournissent une projection parfaite entre les deux espaces, et donc une valeur de *Stress* égale à zéro [Shepard 1962a]. Néanmoins, dans la pratique, la dimension de l'espace est généralement fixée à $N = 2$ ou $N = 3$, créant ainsi une représentation 2D ou 3D des distances entre les objets.

Cependant, toutes les représentations obtenues ne sont pas fiables, et beaucoup d'attention doit être accordée à la valeur finale, c.à.d. optimale, du paramètre *Stress*, qui définit la qualité de la représentation. Une valeur très élevée du paramètre *Stress* indique une projection distordue, qui ne respecte pas les dissimilarités entre les M objets. Généralement, une valeur de $Stress \leq 0.1$ dénote une projection excellente, alors qu'une valeur $Stress > 0.15$ dénote une cartographie trop distordue, qui ne peut pas être acceptée.

Donnons un exemple intuitif illustrant l'intérêt de la MDS. Les données dans le Tableau A.1 représentent les différences perceptuelles entre 14 couleurs de longueur d'onde comprise entre 434 et 674 nm [Ekman 1954, Groenen 2005]. La diagonale de cette matrice est zéro, pour indiquer qu'il n'y a pas de dissemblance entre une couleur et elle-même. De la même façon, les dissimilarités sont traitées de manière symétrique, i.e. $d_{i,j} = d_{j,i}, \forall i, j$, ce qui entraîne que seulement la moitié inférieure de la matrice est nécessaire pour représenter les objets.

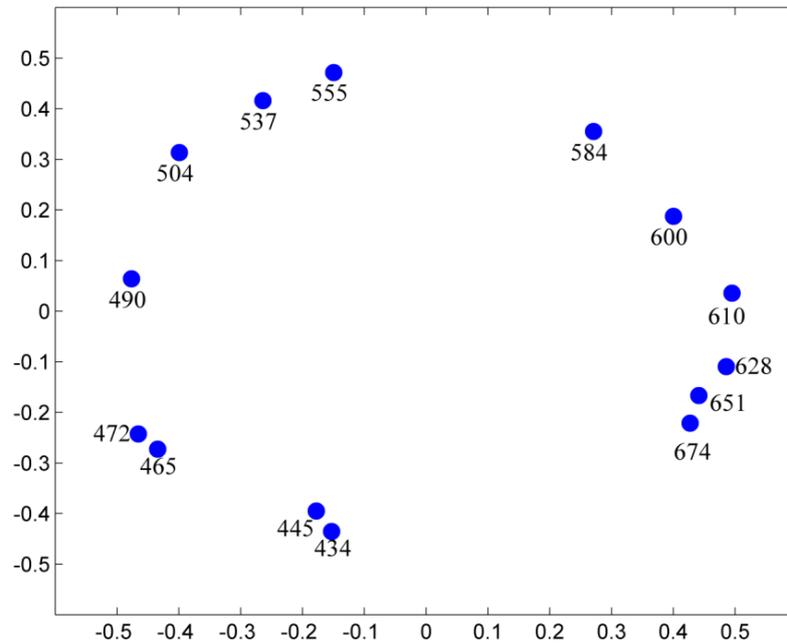


FIGURE A.1 – Représentation MDS pour $N = 2$ de la matrice de dissimilarités dans Tableau A.1. La valeur de *Stress* de la représentation est 0.0231.

Après avoir appliqué l’algorithme de la MDS à $N = 2$ dimensions, nous trouvons la représentation graphique de la figure A.1, qui est une illustration de la roue des couleurs. La valeur de stress associée est $Stress = 0.0231$, ce qui indique une excellente représentation des dissimilarités en distances métriques. Dans la figure A.1, les couleurs proches les unes des autres sur la représentation MDS sont aussi celle perçues comme très similaires : violet (434nm) et l’indigo (445nm). Inversement, les couleurs diamétralement opposées sur le cercle sont perçues comme très dissemblables : vert (490nm) et orange (610nm). Notons qu’une représentation MDS est invariante aux rotations et aux changements de signe des axes (on obtient une représentation en miroir). Les distances entre les objets ne sont pas altérées par ces transformations.

Comme nous l’avons vu, l’algorithme MDS est très utile pour visualiser un ensemble abstrait de données (généralement de nature subjective). La catégorisation (classification) des données est plus facile sur la représentation MDS et la validation visuelle d’une série d’hypothèses peut également être effectuée directement sur la représentation MDS.

A.2 Matrice de Dissimilarité Perceptuelle

L'objectif principal de l'expérience présentée dans la section 3.2 était de trouver les dissimilarités perceptuelles entre les 18 signaux vibratoires dont les stimuli électriques sont fournis dans le Tableau 3.1. Ces dissimilarités ont été évaluées par 24 sujets sur une échelle de Likert de 1 à 7 (voir section 3.2.2).

Ainsi, on détermine une matrice 18×18 qui contient les dissimilarités (distances) perceptuelles entre les signaux. Cette matrice, appelée D_P , a servi à générer la représentation MDS 2D (en utilisant l'algorithme décrit précédemment), illustrée dans la figure 3.2, où les distances perceptuelles inter-signaux sont projetées dans un espace métrique. La représentation MDS a permis de trouver visuellement des patterns *cachés* dans les données, comme l'effet de la fréquence ou de la durée électrique des signaux, sur la perception tactile (voir [Dabic 2013] pour plus d'informations).

La matrice D_P offre donc une caractérisation *subjective* des signaux vibrotactiles. Pour cette raison, elle est employée dans le chapitre 3 comme vérité terrain *subjective* pour quantifier l'utilité des variables physiques définies pour caractériser les signaux vibrotactiles.

La structure de cette matrice est donnée dans le Tableau A.2. Notons qu'elle a été pré-traitée pour la rendre *symétrique* et à *diagonale zéro*, qui sont des conditions essentielles pour pouvoir ensuite appliquer l'algorithme de la MDS.

TABLE A.2 – Matrice D_P contenant les distances perceptuelles entre les 18 signaux vibrotactiles présentées dans le Tableau 3.1.

Signal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	0.0	3.92	2.69	3.35	3.46	4.88	2.31	4.77	3.35	4.19	4.35	5.62	1.92	3.92	3.08	3.69	4.35	5.19
2	3.92	0.0	4.04	4.04	4.73	5.00	3.81	2.65	4.31	4.35	4.96	4.54	4.81	2.62	4.62	4.85	5.00	5.62
3	2.69	4.04	0.0	2.50	2.73	4.31	2.77	5.15	2.58	3.27	3.96	5.23	3.27	4.23	2.12	3.00	3.04	4.73
4	3.35	4.04	2.50	0.0	3.23	4.19	3.46	4.85	3.08	2.92	3.58	5.00	3.69	4.38	3.23	2.19	3.23	4.04
5	3.46	4.73	2.73	3.23	0.0	3.46	4.19	5.31	2.69	3.92	2.15	4.81	4.31	5.15	3.27	3.08	2.35	3.38
6	4.88	5.00	4.31	4.19	3.46	0.0	4.65	4.92	3.81	3.77	3.08	2.46	5.04	5.00	5.12	4.62	4.15	2.85
7	2.31	3.81	2.77	3.46	4.19	4.65	0.0	4.42	3.31	4.35	4.38	5.62	3.69	4.00	3.35	3.96	4.15	5.08
8	4.77	2.65	5.15	4.85	5.31	4.92	4.42	0.0	4.92	4.35	5.46	5.35	5.58	3.46	5.54	5.35	5.85	5.38
9	3.35	4.31	2.58	3.08	2.69	3.81	3.31	4.92	0.0	3.65	3.19	4.73	4.27	4.73	3.35	3.54	3.42	4.31
10	4.19	4.35	3.27	2.92	3.92	3.77	4.35	4.35	3.65	0.0	3.54	4.38	4.73	4.58	4.00	3.27	4.12	4.15
11	4.35	4.96	3.96	3.58	2.15	3.08	4.38	5.46	3.19	3.54	0.0	4.58	5.23	4.15	4.00	3.12	3.12	3.62
12	5.62	4.54	5.23	5.00	4.81	2.46	5.62	5.35	4.73	4.38	4.58	0.0	5.96	5.15	5.77	5.31	4.69	3.62
13	1.92	4.81	3.27	3.69	4.31	5.04	3.69	5.58	4.27	4.73	5.23	5.96	0.0	4.23	3.12	3.77	3.96	5.38
14	3.92	2.62	4.23	4.38	5.15	5.00	4.00	3.46	4.73	4.58	4.15	5.15	4.23	0.0	4.92	4.96	5.00	5.12
15	3.08	4.62	2.12	3.23	3.27	5.12	3.35	5.54	3.35	4.00	4.00	5.77	3.12	4.92	0.0	3.46	3.35	4.62
16	3.69	4.85	3.00	2.19	3.08	4.62	3.96	5.35	3.54	3.27	3.12	5.31	3.77	4.96	3.46	0.0	3.77	4.42
17	4.35	5.00	3.04	3.23	2.35	4.15	4.15	5.85	3.42	4.12	3.12	4.69	3.96	5.00	3.35	3.77	0.0	4.04
18	5.19	5.62	4.73	4.04	3.38	2.85	5.08	5.38	4.31	4.15	3.62	3.62	5.38	5.12	4.62	4.42	4.04	0.0

Mesures d'Accélération

En utilisant le dispositif expérimental décrit dans la section 3.2.1, 18 signaux vibrotactiles ont été générés en faisant varier trois paramètres électriques : la fréquence, la durée et la forme d'onde. A l'aide d'un accéléromètre placé directement sur la surface tactile du banc haptique, des mesures d'accélération ont été enregistrées pour chaque signal vibrotactile, comme indiqué dans la section 3.3.2. A partir de ces mesures, et en respectant les consignes détaillées dans la même section, l'*accélération effective* des signaux est ensuite délimitée par les points D , i.e. de début, et F , i.e. de fin. Dans la figure 3.3 du chapitre 3, une mesure d'accélération complète, i.e. de 5 s, et l'accélération effective correspondante sont données à titre d'exemple pour le signal vibrotactile numéro 5.

En conséquence, dans cette section les mesures d'accélération effective pour six autres signaux vibrotactiles sont illustrées dans les figures B.1, B.2, B.3, B.4, B.5 et B.6. Leurs caractéristiques électriques sont aussi incluses dans les commentaires des figures. Les six signaux vibrotactiles choisis sont considérés comme représentatifs de l'ensemble des 18 signaux. Les autres n'ont pas été représentés pour des raisons d'espace.

Ensuite, dans le Tableau B.1, nous retrouvons, pour chacun des 18 signaux vibrotactiles, la localisation des points D et F et la durée totale de l'accélération effective, c.à.d. la durée de sortie des signaux. A partir de la position des points D et F , exprimée par un numéro d'échantillon (voir Tableau B.1), la durée de sortie des mesures est calculée comme suit :

$$DS = \frac{F - D}{F_s} \times 1000 [ms] \quad (B.1)$$

Pour ce calcul, une fréquence d'échantillonnage $F_s = 5 \text{ KHz}$ a été considérée, comme indiqué par l'équation 3.1.

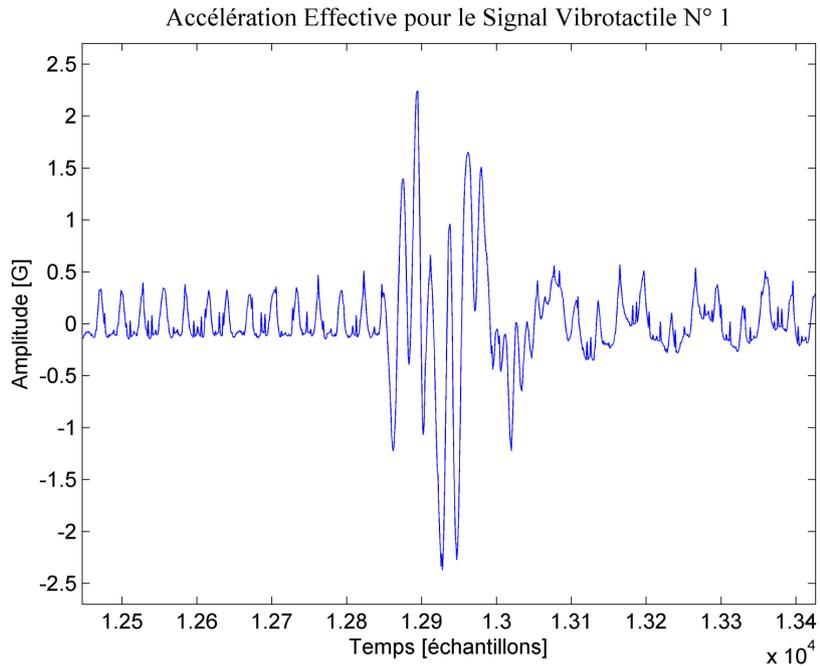


FIGURE B.1 – Mesure de l'accélération effective pour le signal vibrotactile *numéro 1*, défini par les paramètres électriques : {*sinus*, 60 Hz, 7.8 ms}.

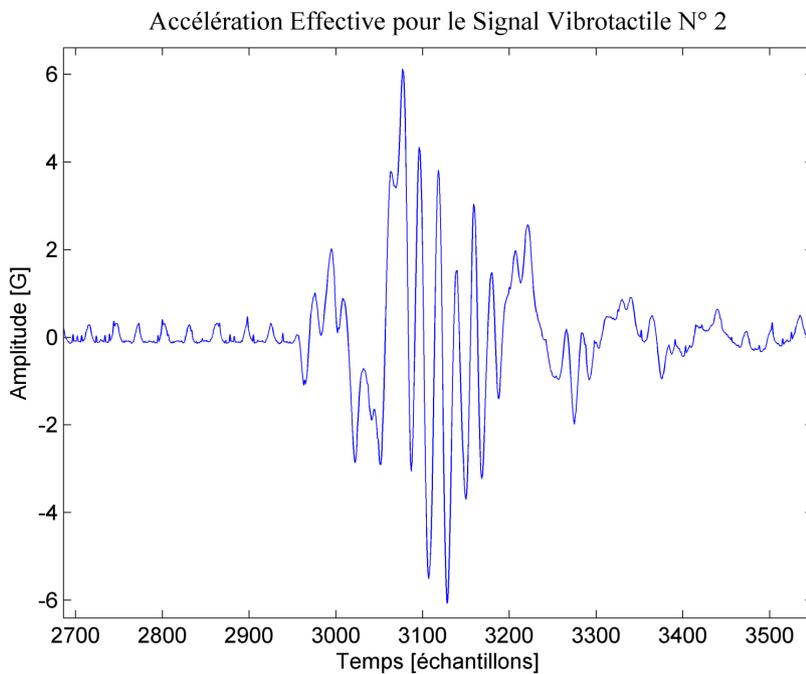


FIGURE B.2 – Mesure de l'accélération effective pour le signal vibrotactile *numéro 2*, défini par les paramètres électriques : {*sinus*, 60 Hz, 23.4 ms}.

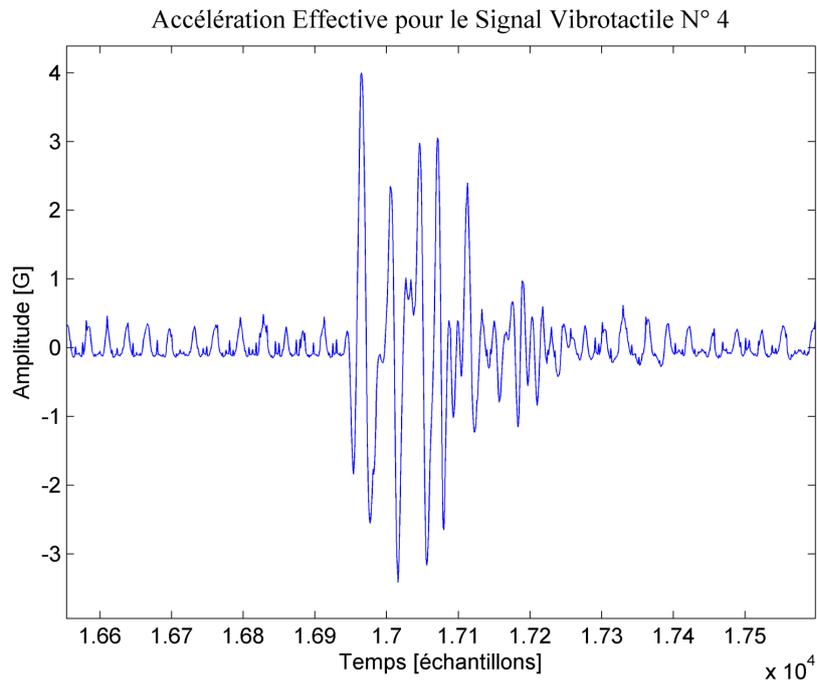


FIGURE B.3 – Mesure de l'accélération effective pour le signal vibrotactile *numéro 4*, défini par les paramètres électriques : {*sinus*, 130 Hz, 23.4 ms}.

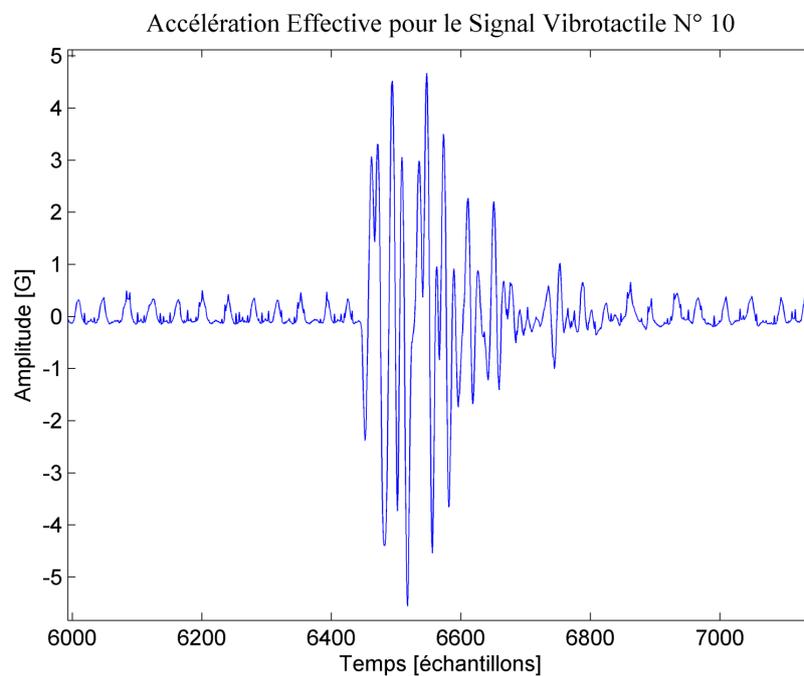


FIGURE B.4 – Mesure de l'accélération effective pour le signal vibrotactile *numéro 10*, défini par les paramètres électriques : {*carré*, 130 Hz, 23.4 ms}.

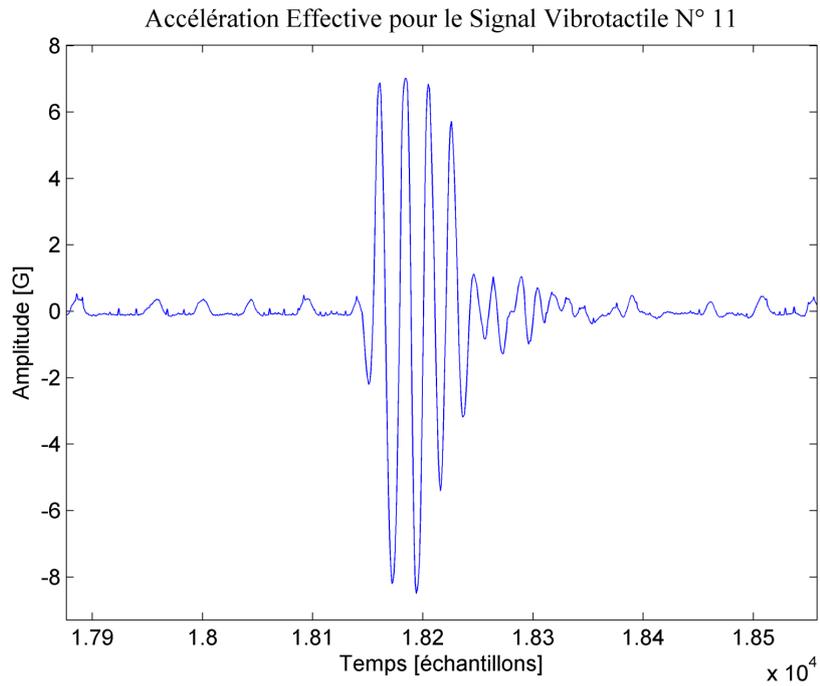


FIGURE B.5 – Mesure de l'accélération effective pour le signal vibrotactile *numéro 11*, défini par les paramètres électriques : {carré, 200 Hz, 7.8 ms}.

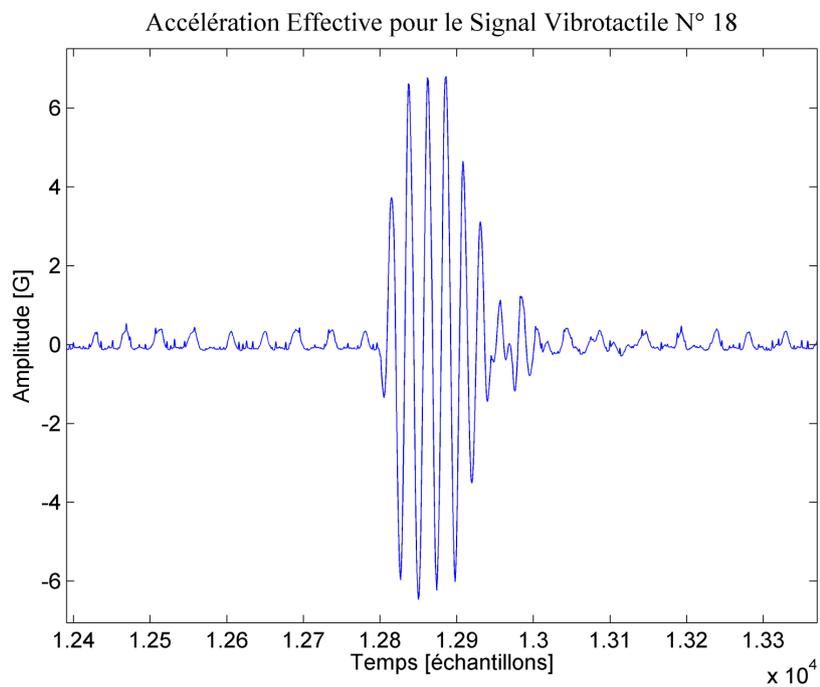


FIGURE B.6 – Mesure de l'accélération effective pour le signal vibrotactile *numéro 18*, défini par les paramètres électriques : {triangle, 200 Hz, 23.4 ms}.

TABLE B.1 – Point de début et de fin et durée de sortie mesurée sur l'accélération effective pour les 18 signaux vibrotactiles présentés dans le Tableau 3.1.

Code Signal	Point de début D [échantillon]	Point de fin F [échantillon]	Longueur
1	12850	13050	40 <i>ms</i>
2	2957	3307	70 <i>ms</i>
3	4313	4470	31.4 <i>ms</i>
4	16950	17190	48 <i>ms</i>
5	13849	13972	24.6 <i>ms</i>
6	3505	3677	34.4 <i>ms</i>
7	3944	4145	40.2 <i>ms</i>
8	4687	5051	72.8 <i>ms</i>
9	11170	11300	26 <i>ms</i>
10	6445	6670	45 <i>ms</i>
11	18140	18260	24 <i>ms</i>
12	6762	6967	41 <i>ms</i>
13	5741	5960	43.8 <i>ms</i>
14	3990	4317	65.4 <i>ms</i>
15	3259	3419	32 <i>ms</i>
16	5250	5487	47.4 <i>ms</i>
17	4431	4557	25.2 <i>ms</i>
18	12800	12970	34 <i>ms</i>

Inférence Floue. Exemples Numériques

C.1 Exemple pour un système de *Mamdani*

Dans cette section nous présenterons un exemple numérique complet pour l'inférence floue dans un système de *Mamdani*. Les cinq principales étapes (fuzzification, conjonction, implication, agrégation et defuzzification) sont détaillées et illustrées par des figures.

Conditions préalables. Soit un système de Mamdani constitué de deux variables d'entrée A et B et d'une variable de sortie S . Les partitions des variables sont telles qu'illustrées dans la figure C.1. Ainsi, A est divisée en $K_A = 3$ sous-ensembles flous, B est divisée en $K_B = 2$ sous-ensembles flous, et la sortie S est divisée en $K_S = 3$ sous-ensembles flous.

Ensuite, soit $\{BR\}$ la base de règle floues du système, définie par un expert humain, ou apprise automatiquement à partir d'ensembles de données en utilisant une méthode au choix, tel que la méthode de *Sélection-Réduction* présentée dans la section 4.2.4.

TABLE C.1 – Base de règles floues $\{BR\}$.

Règle	Entrée A	Entrée B	Sortie S
R_1	A^1	B^1	S^2
R_2	A^1	B^2	S^3
R_3	A^2	B^1	S^2
R_4	A^2	B^2	S^3
R_5	A^3	B^1	S^1
R_6	A^3	B^2	S^2

Soit encore un vecteur d'entrée E appartenant à l'ensemble de données :

$$E = (x_1, x_2) = (0.6, 0.3); \quad (C.1)$$

où $x_1 = 0.6$ et $x_2 = 0.3$ sont des valeurs numériques appartenant aux univers de discours des variables linguistiques A et B .

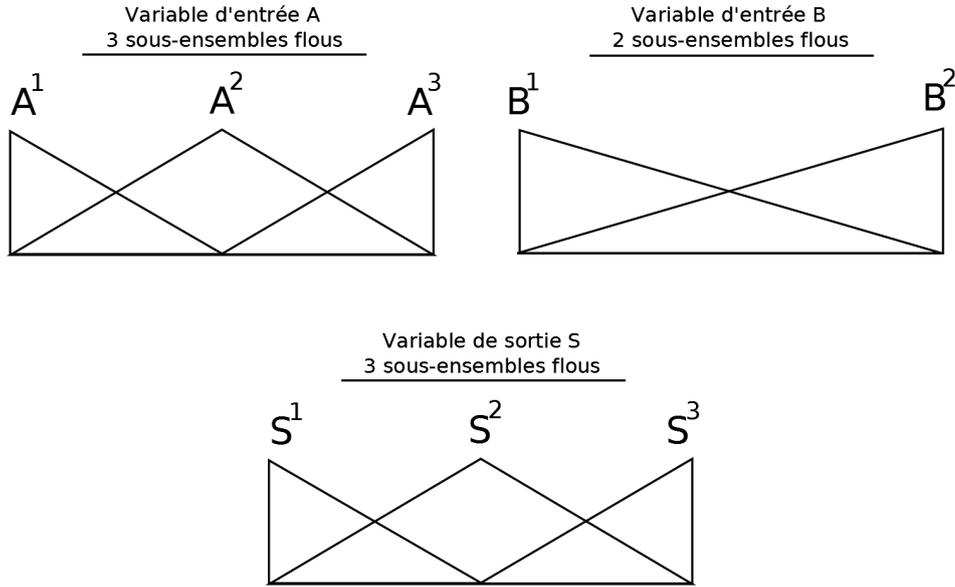


FIGURE C.1 – Partitions des variables du système.

Fuzzification. Les descriptions linguistiques floues pour le vecteur E sont définies ci-après¹, où “+” représente l’union de sous-ensembles flous. Elles sont obtenues comme illustré dans la figure C.2.

$$\begin{aligned}\Phi_A(x_1) &= 0.0/A^1 + 0.8/A^2 + 0.2/A^3; \\ \Phi_B(x_2) &= 0.7/B^1 + 0.3/B^2;\end{aligned}\tag{C.2}$$

Combinaison des prémisses. La conjonction des variables d’entrées, en utilisant l’opérateur *produit arithmétique* est la suivante :

$$\begin{aligned}\Phi_A(x_1) \times \Phi_B(x_2) &= 0.0/(A^1 \& B^1) + 0.0/(A^1 \& B^2) \\ &+ 0.56/(A^2 \& B^1) + 0.24/(A^2 \& B^2) \\ &+ 0.14/(A^3 \& B^1) + 0.06/(A^3 \& B^2);\end{aligned}\tag{C.3}$$

où les nombres devant les conjonctions de symboles représentent le degré d’activation pour la règle floue correspondant à cette conjonction. Par exemple, pour $0.56/(A^2 \& B^1)$, le nombre 0.56 représente le degré d’activation de la règle R_3 .

Implication et Agrégation. La conjonction des variables d’entrée présentée dans l’équation C.3 va activer toutes les règles $R_i \in \{BR\}$ pour lesquelles le degré d’activation est supérieur à zéro. Chaque règle R_i activée par l’exemple numérique E infère sa sortie en fonction de son degré d’activation et de l’opérateur d’implication choisi.

¹ Veuillez noter que si l’on veut construire $\{BR\}$ à partir des exemples, alors la description linguistique floue associée à la sortie numérique (y) du vecteur E est aussi nécessaire.

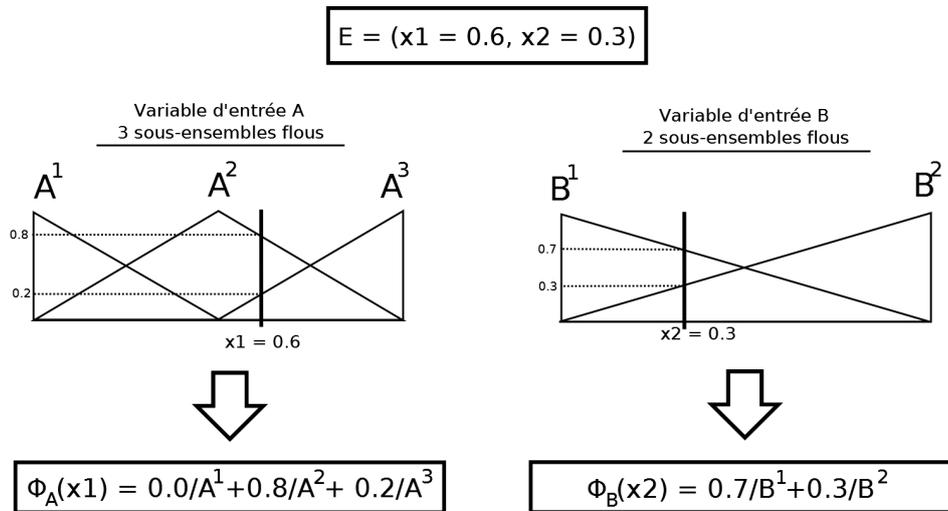


FIGURE C.2 – Exemples de descriptions linguistiques floues.

L'étape d'implication consiste donc à établir le degré de la sortie étant donné le degré d'activation d'une règle. Toutes les sorties inférées par les règles activées sont ensuite agrégées dans un seul sous-ensemble flou, en utilisant l'opérateur d'agrégation prédéfini.

Dans le cas des opérateurs *min* pour l'implication et *max* pour l'agrégation, ces deux étapes sont illustrées dans la figure C.3, partant de la conjonction exprimée par l'équation C.3 et la base de règles présentée dans le Tableau C.1.

Defuzzification. La dernière étape de l'inférence est celle de *defuzzification*, où la sortie agrégée, exprimée par un sous-ensemble flou (voir figure C.3), est convertie en une valeur numérique, qui représente la sortie numérique *prédite* par le système pour le vecteur d'entrée E .

L'opérateur choisi pour réaliser la defuzzification est *le centre de gravité*, définie par l'équation ci-dessous :

$$y = \frac{\sum_i y_i \cdot \mu(y_i)}{\sum_i \mu(y_i)} \tag{C.4}$$

où y_i représentent les points sur l'univers de discours de la sortie agrégée (U_S), et $\mu(y_i)$ représente la valeur de la fonction d'appartenance de la sortie agrégée pour le point $y_i \in U_S$, c.à.d. la fonction d'appartenance du sous-ensemble flou de la sortie agrégée.

En utilisant l'équation C.4, la sortie numérique y pour le vecteur d'entrée E est calculée comme illustrée dans la figure C.4.

$$E = (x_1 = 0.6; x_2 = 0.3) \implies y = 0.51 \tag{C.5}$$

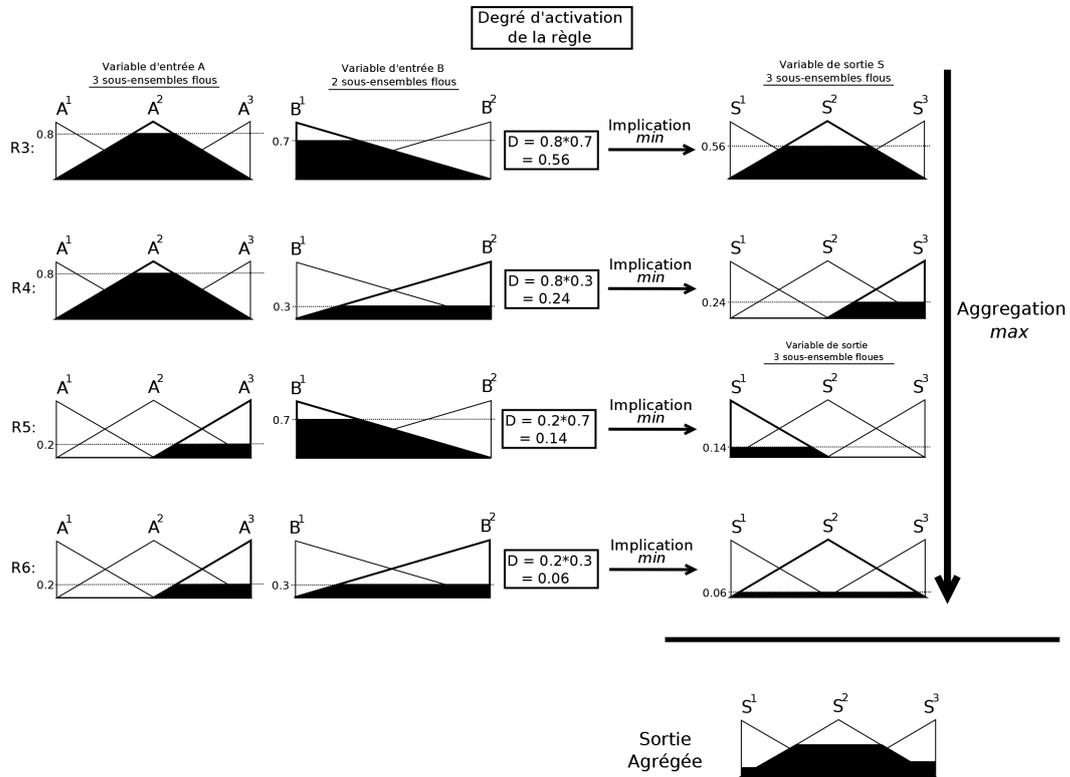


FIGURE C.3 – Illustration des étapes d'implication et agrégation. Le vecteur d'entrée E active seulement les règles R_3, R_4, R_5 et R_6 avec un degré supérieur à zéro.

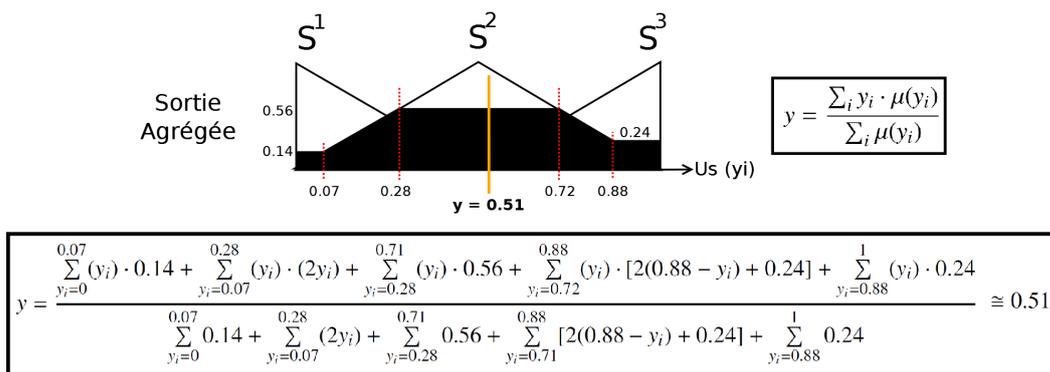


FIGURE C.4 – Illustration de l'étape de defuzzification du système, où la valeur numérique $y = 0.51$ est obtenue avec l'opérateur du centre de gravité.

C.2 Exemple pour un système flou symbolique

Un exemple numérique complet montrant les étapes de l'inférence floue pour un système symbolique est donné dans cette section. Pour plus de clarté, l'exemple donné suit la structure du modèle expert qui est présenté dans la section 4.5.

Conditionnes préalables. Soit le système flou symbolique proposé dans la section 4.5. Il présente ainsi trois variables d'entrée, c.à.d. *Adaptation*, *Propreté*, *Enfoncement*, et une variable de sortie, c.à.d. le *Confort* perçu. La granularité et les étiquettes linguistiques associées à chaque variable sont présentées dans le Tableau C.2.

TABLE C.2 – Les variables d'entrée et sortie du modèle symbolique flou.

Variable	Type	Granularité (K)	Étiquettes Linguistiques
<i>Adaptation</i>	Entrée	3	Adaptée Acceptable Inacceptable
<i>Propreté</i>	Entrée	3	Nette Moyenne Bruitée
<i>Enfoncement</i>	Entrée	5	Trop Fort Adapté Moyen Faible Aucun
<i>Confort</i>	Sortie	5	Très Désagréable Désagréable Neutre Agréable Très Agréable

La base de règles du modèle est celle fournie par l'expert, et présentée dans la section 4.5. Toutefois, pour la commodité du lecteur elle est rappelée dans le Tableau C.3.

Ensuite, soit x un signal vibrotactile appartenant à l'ensemble de signaux. Les évaluations fournies par l'expert pour le signal x , ainsi que les descriptions linguistiques floues obtenues, sont présentées dans le Tableau C.4.

TABLE C.3 – Base de règles floues fournie par l'expert.

	Adaptation	Propreté	Enfoncement	Confort
R_1	Adapté	Nette	Trop Fort	$1/\text{Agréable}$
R_2	Adapté	Nette	Adapté	$1/\text{Très Agréable}$
R_3	Adapté	Nette	Moyen	$1/\text{Agréable}$
R_4	Adapté	Nette	Faible	$0.5/\text{Neutre} + 0.5/\text{Agréable}$
R_5	Adapté	Nette	Aucun	$1/\text{Neutre}$
R_6	Adapté	Moyenne	Trop Fort	$1/\text{Neutre}$
R_7	Adapté	Moyenne	Adapté	$1/\text{Agréable}$
R_8	Adapté	Moyenne	Moyen	$0.5/\text{Neutre} + 0.5/\text{Agréable}$
R_9	Adapté	Moyenne	Faible	$1/\text{Neutre}$
R_{10}	Adapté	Moyenne	Aucun	$0.5/\text{Désagréable} + 0.5/\text{Neutre}$
R_{11}	Adapté	Bruitée	Trop Fort	$0.5/\text{Neutre} + 0.5/\text{Agréable}$
R_{12}	Adapté	Bruitée	Adapté	$1/\text{Agréable}$
R_{13}	Adapté	Bruitée	Moyen	$1/\text{Neutre}$
R_{14}	Adapté	Bruitée	Faible	$0.5/\text{Désagréable} + 0.5/\text{Neutre}$
R_{15}	Adapté	Bruitée	Aucun	$1/\text{Désagréable}$
R_{16}	Acceptable	Nette	Trop Fort	$1/\text{Agréable}$
R_{17}	Acceptable	Nette	Adapté	$0.5/\text{Agréable} + 0.5/(\text{Très Agréable})$
R_{18}	Acceptable	Nette	Moyen	$0.5/\text{Neutre} + 0.5/\text{Agréable}$
R_{19}	Acceptable	Nette	Faible	$1/\text{Neutre}$
R_{20}	Acceptable	Nette	Aucun	$1/\text{Désagréable}$
R_{21}	Acceptable	Moyenne	Trop Fort	$0.5/\text{Neutre} + 0.5/\text{Agréable}$
R_{22}	Acceptable	Moyenne	Adapté	$1/\text{Agréable}$
R_{23}	Acceptable	Moyenne	Moyen	$1/\text{Neutre}$
R_{24}	Acceptable	Moyenne	Faible	$0.5/\text{Désagréable} + 0.5/\text{Neutre}$
R_{25}	Acceptable	Moyenne	Aucun	$0.5/\text{Désagréable} + 0.5/\text{Neutre}$
R_{26}	Acceptable	Bruitée	Trop Fort	$1/\text{Neutre}$
R_{27}	Acceptable	Bruitée	Adapté	$1/\text{Agréable}$
R_{28}	Acceptable	Bruitée	Moyen	$0.5/\text{Désagréable} + 0.5/\text{Neutre}$
R_{29}	Acceptable	Bruitée	Faible	$1/\text{Désagréable}$
R_{30}	Acceptable	Bruitée	Aucun	$1/\text{Désagréable}$
R_{31}	Inacceptable	Nette	Trop Fort	$1/\text{Neutre}$
R_{32}	Inacceptable	Nette	Adapté	$1/\text{Agréable}$
R_{33}	Inacceptable	Nette	Moyen	$0.5/\text{Désagréable} + 0.5/\text{Neutre}$
R_{34}	Inacceptable	Nette	Faible	$1/\text{Désagréable}$
R_{35}	Inacceptable	Nette	Aucun	$0.5/\text{Désagréable} + 0.5/(\text{Très Désagréable})$
R_{36}	Inacceptable	Moyenne	Trop Fort	$1/\text{Neutre}$
R_{37}	Inacceptable	Moyenne	Adapté	$1/\text{Neutre}$
R_{38}	Inacceptable	Moyenne	Moyen	$1/\text{Désagréable}$
R_{39}	Inacceptable	Moyenne	Faible	$0.5/\text{Désagréable} + 0.5/(\text{Très Désagréable})$
R_{40}	Inacceptable	Moyenne	Aucun	$1/\text{Très Désagréable}$
R_{41}	Inacceptable	Bruitée	Trop Fort	$1/\text{Désagréable}$
R_{42}	Inacceptable	Bruitée	Adapté	$1/\text{Désagréable}$
R_{43}	Inacceptable	Bruitée	Moyen	$1/\text{Très Désagréable}$
R_{44}	Inacceptable	Bruitée	Faible	$1/\text{Très Désagréable}$
R_{45}	Inacceptable	Bruitée	Aucun	$1/\text{Très Désagréable}$

TABLE C.4 – Évaluations de l'expert sur les trois critères sensoriels pour le signal vibrotactile d'entrée x .

Variable	Évaluations (deux blocs)	Description Linguistique Floue
<i>Adaptation</i>	$\frac{\text{Adaptée}}{\text{Acceptable}}$	0.5/Adaptée + 0.5/Acceptable + 0.0/Inacceptable
<i>Propreté</i>	$\frac{\text{Moyenne}}{\text{Nette}}$	0.5/Nette + 0.5/Moyenne + 0.0/Bruitée
<i>Enfoncement</i>	$\frac{\text{Faible}}{\text{Faible}}$	0.0/(Trop Fort) + 0.0/Adaptée + 0.0/Moyen + 1.0/Faible + 0.0/Aucun

Fuzzification. Nous rappelons que la fuzzification est l'étape dans laquelle les données numériques d'entrée sont transformées en descriptions linguistiques floues. Ainsi, si les objets à modéliser sont directement décrits par des descriptions linguistiques floues, l'étape de fuzzification peut être contournée. En conséquence, la définition des fonctions d'appartenance pour les variables d'entrée est superflue.

Combinaison des antécédents. A partir des descriptions linguistiques floues obtenues (voir le Tableau C.4), et en utilisant le produit arithmétique comme opérateur de combinaison ($\top(a, b) = a * b$), l'entrée agrégée pour le signal x est :

$$\begin{aligned} & (0.5/\text{Adaptée} + 0.5/\text{Acceptable} + 0.0/\text{Inacceptable}) \times \\ & (0.5/\text{Nette} + 0.5/\text{Moyenne} + 0.0/\text{Bruitée}) \times \\ & (0.0/(\text{Trop Fort}) + 0.0/\text{Adaptée} + 0.0/\text{Moyen} + 1.0/\text{Faible} + 0.0/\text{Aucun}) \end{aligned} \quad (\text{C.6})$$

ou encore :

$$\begin{aligned} & 0.25/\{\text{Adaptée, Nette, Faible}\} + 0.25/\{\text{Adaptée, Moyenne, Faible}\} + \\ & 0.25/\{\text{Acceptable, Nette, Faible}\} + 0.25/\{\text{Acceptable, Moyenne, Faible}\} \end{aligned} \quad (\text{C.7})$$

Projection. La projection de l'entrée agrégée sur la base de règles, en utilisant comme opérateur de projection la somme borne, c.à.d. $\perp(a, b) = \min(a + b, 1)$, donne :

$$\begin{aligned} & 0.25/\{0.5/\text{Neutre} + 0.5/\text{Agréable}\} + 0.25/\{\text{Neutre}\} + \\ & 0.25/\{\text{Neutre}\} + 0.25/\{0.5/\text{Désagréable} + 0.5/\text{Neutre}\} \end{aligned} \quad (\text{C.8})$$

ou encore :

$$0.125/\{\text{Agréable}\} + 0.75/\{\text{Neutre}\} + 0.125/\{\text{Désagréable}\} \quad (\text{C.9})$$

Ainsi, le signal x appartient plutôt à la classe de sortie *Neutre*.

Defuzzification. Ensuite, la sortie symbolique obtenue peut être defuzzifiée afin d'obtenir une valeur numérique, représentant, dans notre cas, le degré de confort prédit par le système. En utilisant la méthode des hauteurs, et les valeurs modales des symboles (fixées aux valeurs nominales de l'échelle $\{-2, -1, 0, +1, +2\}$), nous obtenons :

$$y = \frac{\sum_{i=1}^{K_{Out}} \mu_{S_i} \cdot M_i}{\sum_{i=1}^{K_{Out}} \mu_{S_i}} = \frac{0.125 \times 1 + 0.75 \times 0 + 0.125 \times (-1)}{0.125 + 0.75 + 0.125} = 0 \quad (\text{C.10})$$

Veillez noter que étant donnée le choix des opérateurs et l'architecture du système, le dénominateur dans l'équation ci-dessus vaut toujours 1, c.à.d. la somme des degrés d'appartenance aux symboles de sortie est toujours égale à 1. Pour plus de détails voir la section 4.5.4.

Analyse Numérique de la Redondance de la Base de Règles

D.1 Introduction et Présentation de la Méthode

Interprétabilité de la base de règles. L'importance d'une base de règles compréhensible et interprétable a été évoquée plusieurs fois dans ce manuscrit. Dans le cas où la base de règles est apprise automatiquement par une méthode donnée, le seul critère pris en compte est la performance du système. Les aspects liés à l'interprétabilité et/ou à la cohérence, bien qu'ils soient importants, sont souvent ignorés. Selon [Bodenhofer 2003, Alonso 2011] l'*interprétabilité* est définie comme "la possibilité d'estimer le comportement d'un système flou en lisant et en comprenant la *base de règles*". Ainsi la lisibilité de la base de règles est très importante pour assurer l'interprétabilité d'un système.

Notons que l'interprétabilité d'un système flou n'est pas limitée à l'étude de la base de règles et que beaucoup d'autres facteurs entrent en ligne de compte (pour une analyse complète voir [Mencar 2013]). Néanmoins, dans cette section nous nous limitons à cet aspect de l'analyse d'interprétabilité, afin de réduire la dimension de la base de règles à travers une étude de redondance. Ainsi, cette réduction amène à des bases de règles plus compactes, qui sont plus faciles à lire et à interpréter par les êtres humains.

Redondance de règles floues. En utilisant des variables linguistiques uniformément partitionnées, la base de règles obtenue présente généralement un niveau de lisibilité acceptable. Dans ces conditions, l'interprétabilité peut être augmentée en simplifiant la base de règles, c.à.d. en réduisant le nombre de règles. Les règles visées par cette simplification sont généralement celles qui sont les plus redondantes ou superflues, c.à.d. qui ne contribuent pas significativement à la performance du système. Leur détection et suppression allège la base de règles, en la rendant plus compréhensible, ce qui facilite à la fois la diffusion de la connaissance vers un public non-spécialiste, et aussi l'identification de certains patterns comportementaux.

On distingue dans la littérature deux types de redondances pour une base de règles [Galichet 1998] : de chevauchement et d'interpolation. Afin de traiter le premier type, des mesures de similarité entre les sous-ensembles flous sont utilisées pour ensuite fusionner deux ou plusieurs sous-ensembles "similaires" ; cela permet de réduire le nombre des règles floues associées (voir [Setnes 1998]). D'autre part, la redondance d'interpolation permet d'éliminer des règles dans des zones de "plateau" dans lesquelles d'autres règles offrent plus ou moins la même information (voir [Koczy 1997]).

Dans cette section nous allons traiter seulement la redondance d'interpolation, en considérant que la partition uniforme des univers des discours, choisie sur des critères psychophysiques (voir la section 4.2.1), ne conduit pas à un chevauchement élevé entre les sous-ensembles flous. Par rapport à d'autres méthodes basées uniquement sur des distances et sur la structure des règles [Koczy 1997, Ciliz 2005], la méthode présentée ci-après considère aussi le concept d'*influence commune* de deux règles R_i et R_j sur l'ensemble de données.

Une méthode similaire, basée sur le *déclenchement commun* (*co-firing*) de deux règles R_i et R_j , a été proposée dans [Pancho 2013] afin de faciliter une analyse visuelle de la base de règles et identifier les éventuelles incohérences entre les règles. Cependant, le *déclenchement commun* est basé uniquement sur le nombre d'exemples qui activent les deux règles, sans prendre en compte leurs degrés d'activation (voir ci-après). De plus, dans [Pancho 2013] la réduction de la base de règles est réalisée manuellement, sur la base de trois indicateurs numériques : le déclenchement commun, le degré de couverture de la règle et le taux d'évaluation correcte de la règle (*goodness of the rule*). Néanmoins, aucun de ces indicateurs n'exprime clairement le degré de redondance d'une règle par rapport à la base de règles.

Ainsi, nous présentons ci-dessous une méthode qui permet de calculer un *index de redondance* pour chaque règle à l'aide duquel les règles les plus redondantes peuvent être facilement identifiées et éliminées.

Étant donné une base de règles et un ensemble de données entrée-sortie, une règle R_i est considérée *redondante* si les données qui l'activent, activent aussi des règles "voisines" qui induisent des comportements similaires à celui de R_i . Ainsi, si R_i est éliminée, les données qu'elle a *influencées* seront prises en compte par l'ensemble des règles voisines.

Par ailleurs, les règles non-redondantes sont généralement des règles *isolées* qui partagent peu de données avec les autres règles du système. Nous distinguons deux types principaux de règle isolée :

- (a) les règles positionnées à l'extrémité de l'espace qui définissent le comportement du système pour des valeurs limites des variables d'entrée ;
- (b) les règles qui modélisent des changements brusques dans le comportement du système, c.à.d. des discontinuités ;

Afin de quantifier la redondance des règles, l'algorithme décrit ci-après s'appuie sur les notions de *distance* entre règles et d'*influence* d'une règle sur les données.

Présentation de la méthode. Soit BR une base avec N règles floues. Soit $s_j \in \mathfrak{R}^{M+1}$, $\forall j = 1, \dots, N_S$ (M variables d'entrée et une de sortie) un ensemble d'échantillons, c.à.d. exemples numériques entrée-sortie. Nous définissons le degré avec lequel l'échantillon s_j active la règle R_i comme suit :

$$\delta_{s_j}^{R_i} = \left(\prod_{m=1}^M \mu_{s_j^m} \right) \mu_{s_j^O} \quad (\text{D.1})$$

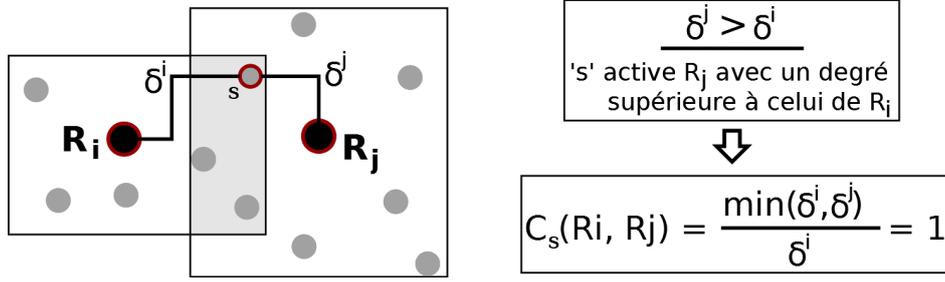


FIGURE D.1 – Influence commune de deux règles floues sur un échantillon “s”.

où $\mu_{s_j^m}$ représente le degré d'appartenance de la m -ième variable numérique d'entrée de l'échantillon s_j à la prémisse correspondante de la règle R_i ; et $\mu_{s_j^o}$ représente le degré d'appartenance pour la variable de sortie.

Ensuite, soit $D(R_i, R_j)$ la distance entre les règles R_i et R_j vues comme des points dans un espace $(M + 1)$ -dimensionnel (entrée et sortie). Pour une partition uniforme des univers des discours, $D(R_i, R_j)$ peut être facilement définie en utilisant la distance de Manhattan (*cityblock*). Par exemple, la distance de Manhattan entre les règles ci-dessus

$$\begin{aligned} R_i &: \text{SI } A \text{ est } A_1 \text{ ALORS } B \text{ est } B_1 \\ R_j &: \text{SI } A \text{ est } A_3 \text{ ALORS } B \text{ est } B_2 \end{aligned} \quad (\text{D.2})$$

est $D_M(R_i, R_j) = |1 - 3| + |1 - 2| = 3$.

Étant donné deux règles, R_i et R_j , et un échantillon s , soit $C_s(R_i, R_j)$ le niveau d'influence commune de R_i et R_j sur l'échantillon s défini par :

$$C_s(R_i, R_j) = \frac{\min(\delta_s^{R_i}, \delta_s^{R_j})}{\delta_s^{R_i}}, \forall s \in \mathfrak{R}^{M+1}, \text{ tel que } \delta_s^{R_i} > 0 \quad (\text{D.3})$$

Remarquons que $C_s(R_i, R_j)$ n'est pas symétrique, il est calculé dans le sens de R_i , et peut être traduit par “le pourcentage de l'activation de la règle R_i par l'échantillon “s”, c.à.d. $\delta_s^{R_i}$, qui est pris en compte (compensé) par R_j ”. Ainsi, comme illustré dans la figure D.1, si “s” active d'avantage R_j que R_i , c.à.d. $\delta_s^{R_j} > \delta_s^{R_i}$, alors $C_s(R_i, R_j)$ vaut 1.

Ensuite, le niveau d'influence commune est normalisé par la distance $D(R_i, R_j)$ entre les règles R_i et R_j :

$$C_s^{Norm}(R_i, R_j) = \frac{\min(\delta_s^{R_i}, \delta_s^{R_j})}{\delta_s^{R_i}} \frac{1}{D(R_i, R_j)} \quad (\text{D.4})$$

L'influence commune normalisée globale pour la règle R_i et l'échantillon s est ensuite calculée en étendant l'équation D.4 sur l'ensemble des règles :

$$C_s^{Norm}(R_i, \{BR\}) = \frac{\sum_{r=1}^N \frac{\min(\delta_s^{R_i}, \delta_s^{R_r})}{\delta_s^{R_i}}}{\sum_{r=1}^N D(R_i, R_r)}, \quad r \neq i \quad (\text{D.5})$$

L'équation ci-dessus indique dans quelle mesure l'influence de R_i sur l'échantillon “s” est prise en compte par l'ensemble des règles. Si $C_s^{Norm}(R_i, \{BR\}) > 1$, alors cette influence

est totalement compensée par les autres règles. Ainsi, plus $C_s^{Norm}(R_i, \{BR\})$ est élevée, plus la règle R_i est redondante dans $\{BR\}$ par rapport à l'échantillon "s".

Dans ces conditions, l'algorithme pour calculer la redondance des règles est le suivant :

- (RR-1) Les degrés d'activation $\delta_{s_j}^{R_i}$ sont calculés pour $\forall i = 1, \dots, N, \forall j = 1, \dots, N_S$ en utilisant l'équation D.1.
- (RR-2) Pour une règle R_i , l'influence commune normalisée globale ($C_{s_j}^{Norm}(R_i, \{BR\})$) est calculée pour tous les échantillons s_j qui activent la règle, c.à.d. pour lesquels $\delta_{s_j}^{R_i} > 0$, en utilisant l'équation D.5.
- (RR-3) L'index de redondance (IR) de la règle R_i dans $\{BR\}$ pour l'ensemble de données $s_j, \forall j = 1, \dots, N_S^{R_i}$ qui l'activent, est calculé comme suit :

$$IR(R_i) = \sum_{j=1}^{N_S^{R_i}} C_{s_j}^{Norm}(R_i, \{BR\}), \quad \forall j = 1, \dots, N_S^{R_i}, \quad \text{tel que } \delta_{s_j}^{R_i} > 0 \quad (D.6)$$

En itérant (RR-1)–(RR-3) pour toutes les règles $R_i \in \{BR\}$ nous obtenons un index de redondance associé à chaque règle, ce qui nous permet de déterminer les règles les plus redondantes qui peuvent être éliminées afin d'améliorer la lisibilité de la base de règles, et par la même, l'interprétabilité du système.

Néanmoins, notons que l'applicabilité de l'algorithme présenté est limitée à la base de règles. Aucun changement n'est fait au niveau des fonctions d'appartenance des variables. Ainsi, une attention particulière doit être accordée lors de la suppression des règles car le système risque de perdre sa capacité de généralisation. Eu égard à cet aspect, l'algorithme ci-dessus doit être utilisé de manière *semi-automatique* dans le sens où la suppression des règles doit d'abord être validée par un être humain. Son application pour la base de règles du modèle psychophysique est présentée dans la section D.2.

La réduction de la base de règles permet donc de choisir les règles les plus significatives, qui sont les piliers du système, tout en gardant une bonne performance quantitative. La connaissance générale sur un phénomène, exprimée par la base de règles du système, peut ainsi être synthétisée par un nombre $N' < N$ de règles, ce qui facilite la diffusion et la compréhension du phénomène par des non-spécialistes.

Dans la section D.2, à partir de la base de règles obtenue avec la méthode de *Sélection–Réduction* (voir la section 4.2.4) une analyse quantitative de la redondance de règles est effectuée afin d'identifier et *potentiellement* éliminer les règles les plus redondantes.

La redondance est déterminée pour chaque règle floue $R_i \in \{BR\}$ en utilisant la méthode présentée au-dessus. Veuillez noter que la base de règles du système, ainsi que l'index de redondance sont déterminés en utilisant l'ensemble complet des 48 signaux vibrotactiles.

D.2 Analyse numérique

Le Tableau D.1 illustre la base de règles finale du système. La dernière colonne représente l'index de redondance de la règle (IR), calculé avec la relation D.6. La règle R_{12} , en jaune, est ainsi considérée comme la règle la plus redondante car ayant un index $IR(R_{12}) = 4.66$.

L'effet que l'élimination de différentes règles a sur les performances du système est indiqué dans le Tableau D.2. Ainsi, si R_{12} , la règle la plus redondante, est éliminée, la performance du système reste à peu près la même. Ceci indique que IR a bien identifié R_{12} comme une règle redondante, qui n'apporte pas une information essentielle.

Après, si R_6 , la deuxième règle la plus redondante règle, est éliminée, la performance du système ne diminue pas, mais au contraire, elle s'améliore. Ceci indique non seulement que R_6 est une règle redondante, mais aussi qu'elle est une règle "maligne" pour le système qui pourrait être éliminée dans l'étape de réduction de la méthode $S-R$. La raison pour laquelle elle n'a pas été éliminée dans l'étape de réduction est liée au seuil d'amélioration¹, fixé à $S = 5\%$, qui n'a pas été atteint (voir (R-3) dans la section 4.2.4).

Ensuite, nous remarquons que les règles $R_9 - R_{10}$, présentant un index de redondance très faible, sont très importantes pour le système, vu que leur suppression affecte considérablement la performance du système. L'importance de ces règles, qui définissent un pattern comportemental, a été aussi discutée dans la section 4.3.4.

Même si l'index de redondance est fourni pour chaque règle, il est conseillé que seulement *une* règle, la plus redondante, soit supprimée à chaque fois, et qu'ensuite IR soit recalculé pour la base de règles ainsi obtenue ($\{BR\} \setminus R_i$).

Dans ces conditions, le Tableau D.3 présente l'index de redondance des règles, en considérant que la règle R_{12} (affichée en gris) a été supprimée. Notons que R_6 est maintenant devenue la règle la plus redondante. L'algorithme est ensuite répété (Tableaux D.3–D.8), et la règle la plus redondante, c.à.d. R_i , où $i = \arg \max_i \{IR(R_i)\}$, est supprimée à chaque fois. L'effet cumulatif de toutes ces suppressions sur la performance du système est illustré dans le Tableau D.9.

¹Le rôle de ce seuil est d'éviter que des règles importantes soient automatiquement éliminées, sans consulter l'utilisateur. Ainsi, l'élimination d'une règle doit amener à une amélioration de l'erreur d'au moins $S[\%]$ pour être effectuée sans l'avis de l'utilisateur.

TABLE D.1 – Base de règles floues obtenue avec la méthode de *Sélection–Réduction* sur l'ensemble de 48 signaux vibrotactiles.

	E_P	\bar{V}^+	ICS	Confort	IR
R_1	Très Faible	Faible	Élevée	<i>Désagréable</i>	1.29
R_2	Très Faible	Moyenne	Élevée	<i>Très Désagréable</i>	1.00
R_3	Très Faible	Élevée	Élevée	<i>Désagréable</i>	1.73
R_4	Faible	Faible	Moyenne	<i>Agréable</i>	1.90
R_5	Faible	Faible	Élevée	<i>Très Agréable</i>	2.27
R_6	Faible	Moyenne	Moyenne	<i>Neutre</i>	4.21
R_7	Faible	Moyenne	Élevée	<i>Neutre</i>	3.58
R_8	Faible	Élevée	Élevée	<i>Neutre</i>	3.26
R_9	Moyenne	Faible	Faible	<i>Très Désagréable</i>	0
R_{10}	Moyenne	Faible	Moyenne	<i>Très Agréable</i>	1.18
R_{11}	Moyenne	Moyenne	Moyenne	<i>Neutre</i>	3.07
R_{12}	Moyenne	Moyenne	Élevée	<i>Neutre</i>	4.66
R_{13}	Élevée	Faible	Moyenne	<i>Neutre</i>	1.42
R_{14}	Très Élevée	Faible	Moyenne	<i>Désagréable</i>	1.23
R_{15}	Très Élevée	Moyenne	Moyenne	<i>Très Désagréable</i>	0.81

TABLE D.2 – Erreur globale (Δ) et taux d'évaluation correcte (TEC) du système en enlevant différentes règles. La base de règles $\{BR\}$ est celle du Tableau D.1.

Règle Éliminée	IR	Base de règles	Erreur globale (Δ)	Taux d'évaluation correcte (TEC)
\emptyset	–	$\{BR\} \setminus \emptyset$	12.54 %	91.7 %
R_{12}	4.66	$\{BR\} \setminus R_{12}$	12.55 %	91.7 %
R_6	4.21	$\{BR\} \setminus R_6$	12.44 %	91.7 %
R_9	0	$\{BR\} \setminus R_9$	17.43 %	83.3 %
R_{10}	1.18	$\{BR\} \setminus R_{10}$	18.40 %	72.9 %

TABLE D.3 – Base de règles floues et index de redondance obtenu après la suppression de la règle R_{12} (en gris).

	E_P	\bar{V}^+	ICS	Confort	IR
R_1	Très Faible	Faible	Élevée	<i>Désagréable</i>	1.38
R_2	Très Faible	Moyenne	Élevée	<i>Très Désagréable</i>	1.08
R_3	Très Faible	Élevée	Élevée	<i>Désagréable</i>	1.85
R_4	Faible	Faible	Moyenne	<i>Agréable</i>	1.95
R_5	Faible	Faible	Élevée	<i>Très Agréable</i>	2.43
R_6	Faible	Moyenne	Moyenne	<i>Neutre</i>	4.07
R_7	Faible	Moyenne	Élevée	<i>Neutre</i>	3.27
R_8	Faible	Élevée	Élevée	<i>Neutre</i>	2.93
R_9	Moyenne	Faible	Faible	<i>Très Désagréable</i>	0
R_{10}	Moyenne	Faible	Moyenne	<i>Très Agréable</i>	1.28
R_{11}	Moyenne	Moyenne	Moyenne	<i>Neutre</i>	2.62
R_{12}	Moyenne	Moyenne	Élevée	<i>Neutre</i>	–
R_{13}	Élevée	Faible	Moyenne	<i>Neutre</i>	0.99
R_{14}	Très Élevée	Faible	Moyenne	<i>Désagréable</i>	1.33
R_{15}	Très Élevée	Moyenne	Moyenne	<i>Très Désagréable</i>	0.87

TABLE D.4 – Base de règles floues et index de redondance obtenu après la suppression de règles R_{12} et R_6 (en gris).

	E_P	\bar{V}^+	ICS	Confort	IR
R_1	Très Faible	Faible	Élevée	<i>Désagréable</i>	1.03
R_2	Très Faible	Moyenne	Élevée	<i>Très Désagréable</i>	1.16
R_3	Très Faible	Élevée	Élevée	<i>Désagréable</i>	1.52
R_4	Faible	Faible	Moyenne	<i>Agréable</i>	1.32
R_5	Faible	Faible	Élevée	<i>Très Agréable</i>	2.62
R_6	Faible	Moyenne	Moyenne	<i>Neutre</i>	–
R_7	Faible	Moyenne	Élevée	<i>Neutre</i>	1.97
R_8	Faible	Élevée	Élevée	<i>Neutre</i>	2.24
R_9	Moyenne	Faible	Faible	<i>Très Désagréable</i>	0
R_{10}	Moyenne	Faible	Moyenne	<i>Très Agréable</i>	1.40
R_{11}	Moyenne	Moyenne	Moyenne	<i>Neutre</i>	1.76
R_{12}	Moyenne	Moyenne	Élevée	<i>Neutre</i>	–
R_{13}	Élevée	Faible	Moyenne	<i>Neutre</i>	1.05
R_{14}	Très Élevée	Faible	Moyenne	<i>Désagréable</i>	1.43
R_{15}	Très Élevée	Moyenne	Moyenne	<i>Très Désagréable</i>	0.94

TABLE D.5 – Base de règles floues et index de redondance obtenu après la suppression de règles R_{12} , R_6 et R_5 (en gris).

	E_P	\bar{V}^+	ICS	Confort	IR
R_1	Très Faible	Faible	Élevée	<i>Désagréable</i>	1.11
R_2	Très Faible	Moyenne	Élevée	<i>Très Désagréable</i>	1.31
R_3	Très Faible	Élevée	Élevée	<i>Désagréable</i>	1.71
R_4	Faible	Faible	Moyenne	<i>Agréable</i>	1.33
R_5	Faible	Faible	Élevée	<i>Très Agréable</i>	–
R_6	Faible	Moyenne	Moyenne	<i>Neutre</i>	–
R_7	Faible	Moyenne	Élevée	<i>Neutre</i>	2.11
R_8	Faible	Élevée	Élevée	<i>Neutre</i>	2.42
R_9	Moyenne	Faible	Faible	<i>Très Désagréable</i>	0
R_{10}	Moyenne	Faible	Moyenne	<i>Très Agréable</i>	1.01
R_{11}	Moyenne	Moyenne	Moyenne	<i>Neutre</i>	1.98
R_{12}	Moyenne	Moyenne	Élevée	<i>Neutre</i>	–
R_{13}	Élevée	Faible	Moyenne	<i>Neutre</i>	1.17
R_{14}	Très Élevée	Faible	Moyenne	<i>Désagréable</i>	1.62
R_{15}	Très Élevée	Moyenne	Moyenne	<i>Très Désagréable</i>	0.94

TABLE D.6 – Base de règles floues et index de redondance obtenu après la suppression de règles R_{12} , R_6 , R_5 et R_8 (en gris).

	E_P	\bar{V}^+	ICS	Confort	IR
R_1	Très Faible	Faible	Élevée	<i>Désagréable</i>	1.21
R_2	Très Faible	Moyenne	Élevée	<i>Très Désagréable</i>	1.43
R_3	Très Faible	Élevée	Élevée	<i>Désagréable</i>	1.45
R_4	Faible	Faible	Moyenne	<i>Agréable</i>	1.33
R_5	Faible	Faible	Élevée	<i>Très Agréable</i>	–
R_6	Faible	Moyenne	Moyenne	<i>Neutre</i>	–
R_7	Faible	Moyenne	Élevée	<i>Neutre</i>	1.69
R_8	Faible	Élevée	Élevée	<i>Neutre</i>	–
R_9	Moyenne	Faible	Faible	<i>Très Désagréable</i>	0
R_{10}	Moyenne	Faible	Moyenne	<i>Très Agréable</i>	1.17
R_{11}	Moyenne	Moyenne	Moyenne	<i>Neutre</i>	1.98
R_{12}	Moyenne	Moyenne	Élevée	<i>Neutre</i>	–
R_{13}	Élevée	Faible	Moyenne	<i>Neutre</i>	1.31
R_{14}	Très Élevée	Faible	Moyenne	<i>Désagréable</i>	1.86
R_{15}	Très Élevée	Moyenne	Moyenne	<i>Très Désagréable</i>	1.07

TABLE D.7 – Base de règles floues et index de redondance obtenu après la suppression de règles R_{12} , R_6 , R_5 , R_8 et R_{11} (en gris).

	E_P	\overline{V}^+	ICS	Confort	IR
R_1	Très Faible	Faible	Élevée	<i>Désagréable</i>	1.37
R_2	Très Faible	Moyenne	Élevée	<i>Très Désagréable</i>	1.63
R_3	Très Faible	Élevée	Élevée	<i>Désagréable</i>	1.23
R_4	Faible	Faible	Moyenne	<i>Agréable</i>	0.62
R_5	Faible	Faible	Élevée	<i>Très Agréable</i>	–
R_6	Faible	Moyenne	Moyenne	<i>Neutre</i>	–
R_7	Faible	Moyenne	Élevée	<i>Neutre</i>	1.44
R_8	Faible	Élevée	Élevée	<i>Neutre</i>	–
R_9	Moyenne	Faible	Faible	<i>Très Désagréable</i>	0
R_{10}	Moyenne	Faible	Moyenne	<i>Très Agréable</i>	1.28
R_{11}	Moyenne	Moyenne	Moyenne	<i>Neutre</i>	–
R_{12}	Moyenne	Moyenne	Élevée	<i>Neutre</i>	–
R_{13}	Élevée	Faible	Moyenne	<i>Neutre</i>	0.21
R_{14}	Très Élevée	Faible	Moyenne	<i>Désagréable</i>	2.04
R_{15}	Très Élevée	Moyenne	Moyenne	<i>Très Désagréable</i>	1.16

TABLE D.8 – Base de règles floues et index de redondance obtenu après la suppression de règles R_{12} , R_6 , R_5 , R_8 , R_{11} et R_{14} (en gris).

	E_P	\overline{V}^+	ICS	Confort	IR
R_1	Très Faible	Faible	Élevée	<i>Désagréable</i>	1.57
R_2	Très Faible	Moyenne	Élevée	<i>Très Désagréable</i>	2.01
R_3	Très Faible	Élevée	Élevée	<i>Désagréable</i>	1.48
R_4	Faible	Faible	Moyenne	<i>Agréable</i>	0.70
R_5	Faible	Faible	Élevée	<i>Très Agréable</i>	–
R_6	Faible	Moyenne	Moyenne	<i>Neutre</i>	–
R_7	Faible	Moyenne	Élevée	<i>Neutre</i>	1.71
R_8	Faible	Élevée	Élevée	<i>Neutre</i>	–
R_9	Moyenne	Faible	Faible	<i>Très Désagréable</i>	0
R_{10}	Moyenne	Faible	Moyenne	<i>Très Agréable</i>	1.51
R_{11}	Moyenne	Moyenne	Moyenne	<i>Neutre</i>	–
R_{12}	Moyenne	Moyenne	Élevée	<i>Neutre</i>	–
R_{13}	Élevée	Faible	Moyenne	<i>Neutre</i>	0
R_{14}	Très Élevée	Faible	Moyenne	<i>Désagréable</i>	–
R_{15}	Très Élevée	Moyenne	Moyenne	<i>Très Désagréable</i>	0

TABLE D.9 – Erreur globale (Δ) et taux d'évaluation correcte (TEC) du système en enlevant différentes règles. Encore une fois, la base de règles $\{BR\}$ est celle du Tableau D.1.

Base de règles	Erreur globale (Δ)	Taux d'évaluation correcte (TEC)
$\{BR\}$	12.54 %	91.7 %
$\{BR\} \setminus \{R_{12}\}$	12.55 %	91.7 %
$\{BR\} \setminus \{R_{12}, R_6\}$	12.45 %	91.7 %
$\{BR\} \setminus \{R_{12}, R_6, R_5\}$	12.25 %	91.7 %
$\{BR\} \setminus \{R_{12}, R_6, R_5, R_8\}$	12.34 %	91.7 %
$\{BR\} \setminus \{R_{12}, R_6, R_5, R_8, R_{11}\}$	13.83 %	89.6 %
$\{BR\} \setminus \{R_{12}, R_6, R_5, R_8, R_{11}, R_{14}\}$	13.83 %	89.6 %

TABLE D.10 – Base de règles *finale* avec $(NR)' = 9$ règles.

	E_P	\bar{V}^+	ICS	Confort
R_1	Très Faible	Faible	Élevée	<i>Désagréable</i>
R_2	Très Faible	Moyenne	Élevée	<i>Très Désagréable</i>
R_3	Très Faible	Élevée	Élevée	<i>Désagréable</i>
R_4	Faible	Faible	Moyenne	<i>Agréable</i>
R_5	Faible	Moyenne	Élevée	<i>Neutre</i>
R_6	Moyenne	Faible	Faible	<i>Très Désagréable</i>
R_7	Moyenne	Faible	Moyenne	<i>Très Agréable</i>
R_8	Élevée	Faible	Moyenne	<i>Neutre</i>
R_9	Très Élevée	Moyenne	Moyenne	<i>Très Désagréable</i>

D.3 Discussion

Comme nous pouvons le voir dans le Tableau D.9, la mesure proposée arrive à bien identifier les règles redondantes à chaque itération. En conséquence, la base de règles initiale, c.à.d. $\{BR\}$, a été réduite de 40% en passant de $NR = 15$ règles à $(NR)' = 9$ règles, alors que l'erreur globale du système (Δ) est augmentée seulement de 10% ($\Delta = 13.83\%$ par rapport à $\Delta = 12.54\%$). La base de règles finale à $(NR)' = 9$ règles floues est illustrée dans le Tableau D.10. Précisons néanmoins que dans le cas où les données d'entrée n'activent aucune règle, la sortie du système est déterminée par défaut à la valeur équiprobable $Out = 0.5$ (point milieu de l'intervalle normalisé $I_{CG} = [0, 1]$), ce qui correspond à la valeur modale du sous-ensemble flou de sortie *Neutre*.

Veillez aussi remarquer que l'index de redondance des règles ne reste pas constant, et change d'une itération à l'autre, en fonction de la règle qui a été éliminée précédemment. Ainsi, la suppression de la règle R_{14} dans le Tableau D.8, affecte considérablement l'index de redondance des règles voisines (R_{13} et R_{15}), qui maintenant restent les seules règles capables d'expliquer le comportement du modèle pour des valeurs *Élevées* ou *Très Élevées* de E_p .

Étant donnée que l'algorithme est itéré plusieurs fois, une condition de *stop* doit être spécifiée. En fonction de l'objectif final, une telle condition peut être :

- fixer le nombre de règles $(NR)'$ à garder, si l'objectif est de retenir les plus importantes $(NR)'$ règles ;
- fixer la variation maximale sur l'erreur globale (Δ), c.à.d. itérer l'algorithme et supprimer à chaque fois la règle la plus redondante, tant que l'erreur globale du système ne dépasse pas $x[\%]$;
- définir une mesure conjointe, qui prend en compte simultanément le nombre de règles et l'erreur du système ;

Cependant, dans les trois cas définis ci-dessus, une consultation avec le designer du système sur les règles à éliminer est toujours recommandée.

L'utilité de la mesure de redondance proposée dans cette section est confirmée par les bons résultats obtenus sur la base de règles du modèle psychophysique. Néanmoins, à ce stade, plusieurs autres expériences, sur d'autres base de règles, et dans d'autres situations, sont nécessaires afin de formaliser l'algorithme présenté, et de complètement valider sa pertinence.

Liste de publications de l'auteur

Revue d'audience internationale

1. Liviu-Cristian Duțu, Gilles Mauris, Philippe Bolon, Stéphanie Dabic et Jean-Marc Tissot. *A Fuzzy Rule-Based Model of Vibrotactile Perception via an Automobile Haptic Screen*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. *Accepté en décembre 2014. A paraître 2015.*

Conférences d'audience internationale avec actes

2. Liviu-Cristian Duțu, Gilles Mauris, Philippe Bolon, Stéphanie Dabic et Jean-Marc Tissot. *A Fuzzy Model Relating Vibrotactile Signal Characteristics to Haptic Sensory Evaluations*. In Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications (CIVEMSA), 2013 IEEE International Conference on, pages 49–54. IEEE, 2013.
3. Liviu-Cristian Duțu, Gilles Mauris, Philippe Bolon, Stéphanie Dabic et Jean-Marc Tissot. *A Fuzzy Rule-Based Haptic Perception Model for Automotive Vibrotactile Display*. In Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems (IPMU), pages 576–585. Springer, 2014.

Conférences d'audience nationale et francophone avec actes

4. Liviu-Cristian Duțu, Gilles Mauris, Philippe Bolon, Stéphanie Dabic et Jean-Marc Tissot. *Un Modèle Psychophysique Flou pour l'Évaluation Hédonique de Signaux Vibrotactiles*. In Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications (LFA), pages 25–32, 2014.

Livrables du projet MISAC

5. Stéphanie Dabic, Camille Chauvelin, Liviu-Cristian Duțu, Gilles Mauris et Philippe Bolon. *Rapport de caractéristiques de stimuli efficaces*. Livrable D4.5, Consortium Projet MISAC, THALES Avionics, Bordeaux, France, 21 Mars 2013, 27 pages.
6. Liviu-Cristian Duțu, Gilles Mauris et Philippe Bolon. *Rapport des modèles de type "computational intelligenc" de la perception tactile et du confort associé*. Livrable D4.6, Consortium Projet MISAC, VALEO Annemasse, Annemasse, France, 30 Septembre 2014, 119 pages.
7. Liviu-Cristian Duțu, Gilles Mauris et Philippe Bolon. *Code source du logiciel d'évaluation et de commande intelligente des stimuli à appliquer en fonction des tâches d'activité*. Livrable D4.7. Livraison prévue en Mars 2015.

Bibliographie

- [Abe 1995] Shigeo Abe and Ming-Shong Lan. *Fuzzy rules extraction directly from numerical data for function approximation*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 25, no. 1, pages 119–129, 1995. (Cité à la page 95.)
- [Alapetite 2012] Alexandre Alapetite, Rune Fogh, David Zammit-Mangion, Christian Zammit, Ian Agius, Marco Fabbri, Marco Pregnolato and Loïc Becouarn. *Direct tactile manipulation of the flight plan in a modern aircraft cockpit*. In Proceedings of HCI Aero, 2012. (Cité à la page 7.)
- [Alonso 2011] Jose M. Alonso and Luis Magdalena. *Special issue on interpretable fuzzy systems*. Information Sciences, vol. 181, no. 20, pages 4331–4339, 2011. (Cité à la page 163.)
- [Altinsoy 2009] M. Ercan Altinsoy and Sebastian Merchel. *Audiotactile feedback design for touch screens*. In Haptic and Audio Interaction Design, pages 136–144. Springer, 2009. (Cité à la page 15.)
- [Auger 1996] François Auger, Patrick Flandrin, Paulo Gonçalves and Olivier Lemoine. *Time-frequency toolbox*, 1995–1996. (Cité aux pages xi, xii, 33, 35, 36 and 62.)
- [Azadi 2014] Mojtaba Azadi and Lynette A. Jones. *Evaluating vibrotactile dimensions for the design of tactons*. IEEE Transactions on Haptics, vol. 7, no. 1, pages 14–23, 2014. (Cité à la page 14.)
- [Bäck 1993] Thomas Bäck and Hans-Paul Schwefel. *An overview of evolutionary algorithms for parameter optimization*. Evolutionary Computation, vol. 1, no. 1, pages 1–23, 1993. (Cité à la page 38.)
- [Banter 2010] Bruce Banter. *Touch screens and touch surfaces are enriched by haptic force-feedback*. Information Display, vol. 26, no. 3, pages 26–30, 2010. (Cité à la page 12.)
- [Bencheikh 2013] Nabil Bencheikh and Fabien Vermont. *Banc de Test Haptique pour MISAC*. Confidentiel, CEDRAT Technologies, 2013. (Cité à la page 81.)
- [Benoit 2005] Eric Benoit, Laurent Foulloy and Gilles Mauris. *Fuzzy approaches for measurement*. Handbook of Measuring System Design, 2005. (Cité à la page 90.)
- [Bensmaia 2000] Sliman Bensmaia and Mark Hollins. *Complex tactile waveform discrimination*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 108, no. 3, pages 1236–1245, 2000. (Cité à la page 25.)
- [Bensmaia 2002] Sliman Bensmaia. *A transduction model of the Meissner corpuscle*. Mathematical Biosciences, vol. 176, no. 2, pages 203–217, 2002. (Cité aux pages 27 and 68.)

- [Bensmaïa 2005] Sliman Bensmaïa, Mark Hollins and Jeffrey Yau. *Vibrotactile intensity and frequency information in the Pacinian system : A psychophysical model*. Perception & Psychophysics, vol. 67, no. 5, pages 828–841, 2005. (Cité aux pages 26, 67 and 71.)
- [Blagojević 2013] Mladenka Blagojević, Milica Šelmić, Dragana Macura and Dragana Šarac. *Determining the number of postal units in the network—Fuzzy approach, Serbia case study*. Expert Systems with Applications, vol. 40, no. 10, pages 4090–4095, 2013. (Cité à la page 95.)
- [Blattner 1989] Meera M. Blattner, Denise A. Sumikawa and Robert M. Greenberg. *Earcons and icons : Their structure and common design principles*. Human–Computer Interaction, vol. 4, no. 1, pages 11–44, 1989. (Cité à la page 13.)
- [Boashash 1988] Boualem Boashash. *Note on the use of the Wigner distribution for time-frequency signal analysis*. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, vol. 36, no. 9, pages 1518–1521, 1988. (Cité aux pages 32 and 34.)
- [Bodenhofer 2003] Ulrich Bodenhofer and Peter Bauer. *A formal model of interpretability of linguistic variables*. In Interpretability Issues in Fuzzy Modeling, pages 524–545. Springer, 2003. (Cité à la page 163.)
- [Bolanowski 1988] Stanley J. Bolanowski, George A. Gescheider, Ronald T. Verrillo and Christine M. Checkosky. *Four channels mediate the mechanical aspects of touch*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 84, pages 1680–1694, 1988. (Cité aux pages xi, 18, 22, 24 and 28.)
- [Bombardier 2009] Vincent Bombardier, Emmanuel Schmitt and Patrick Charpentier. *A fuzzy sensor for color matching vision system*. Measurement, vol. 42, no. 2, pages 189–201, 2009. (Cité à la page 90.)
- [Bonissone 1997] Piero P. Bonissone. *Soft computing : the convergence of emerging reasoning technologies*. Soft Computing, vol. 1, no. 1, pages 6–18, 1997. (Cité à la page 38.)
- [Bos 1986] Jan D. Bos and Martien L. Kapsenberg. *The skin immune system Its cellular constituents and their interactions*. Immunology Today, vol. 7, no. 7, pages 235–240, 1986. (Cité à la page 15.)
- [Bouchikhi 2011] El H. Bouchikhi, Vincent Choqueuse, Mohamed Benbouzid, Jean-Frederic Charpentier and Georges Barakat. *A comparative study of time-frequency representations for fault detection in wind turbine*. In IECON 2011-37th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, pages 3584–3589. IEEE, 2011. (Cité à la page 37.)
- [Bouchon-Meunier 1995] Bernadette Bouchon-Meunier, Ronald R. Yager and Lotfi A. Zadeh. *Fuzzy logic and soft computing*. World Scientific, 1995. (Cité à la page 128.)

- [Bouchon-Meunier 2013] Bernadette Bouchon-Meunier, Marie-Jeanne Lesot and Christophe Marsala. *Modelling and management of subjective information in a fuzzy setting*. International Journal of General Systems, vol. 42, pages 3–19, 2013. (Cité aux pages 43 and 90.)
- [Brewster 2004] Stephen Brewster and Lorna M. Brown. *Tactons : structured tactile messages for non-visual information display*. In Proceedings of the Fifth Conference on Australasian User Interface, volume 28, pages 15–23. Australian Computer Society, 2004. (Cité à la page 13.)
- [Brewster 2005] Stephen Brewster and Alison King. *The design and evaluation of a vibrotactile progress bar*. In Eurohaptics Conference, 2005 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005. World Haptics 2005, pages 499–500. IEEE, 2005. (Cité à la page 9.)
- [Brewster 2007] Stephen Brewster, Faraz Chohan and Lorna M. Brown. *Tactile feedback for mobile interactions*. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pages 159–162. ACM, 2007. (Cité aux pages xi, 9 and 10.)
- [Brewster 2010] Stephen Brewster and Aurora Constantin. *Tactile feedback for ambient awareness in mobile interactions*. In Proceedings of the 24th BCS Interaction Specialist Group Conference, pages 412–417. British Computer Society, 2010. (Cité aux pages 13 and 14.)
- [Brown 2005] Lorna M. Brown, Stephen A Brewster and Helen C Purchase. *A first investigation into the effectiveness of tactons*. In Eurohaptics Conference, 2005 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005. World Haptics 2005., pages 167–176. IEEE, 2005. (Cité aux pages 13 and 14.)
- [Brown 2006] Lorna M. Brown, Stephen A Brewster and Helen C Purchase. *Multidimensional tactons for non-visual information presentation in mobile devices*. In Proceedings of the 8th Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, pages 231–238. ACM, 2006. (Cité à la page 14.)
- [Burnham 2002] Kenneth P. Burnham and David R. Anderson. *Model selection and multi-model inference : a practical information-theoretic approach*. Springer, 2002. (Cité à la page 74.)
- [Casillas 2002] Jorge Casillas, Oscar Cordón and Francisco Herrera. *COR : A methodology to improve ad hoc data-driven linguistic rule learning methods by inducing cooperation among rules*. Systems, Man, and Cybernetics, Part B : Cybernetics, IEEE Transactions on, vol. 32, no. 4, pages 526–537, 2002. (Cité aux pages 95, 99 and 100.)

- [Casillas 2005] Jorge Casillas, Oscar Cordón, Iñaki Fernández de Viana and Francisco Herrera. *Learning cooperative linguistic fuzzy rules using the best–worst ant system algorithm*. International Journal of Intelligent Systems, vol. 20, no. 4, pages 433–452, 2005. (Cité aux pages 99 and 100.)
- [Chang 2008] Pei-Chann Chang, Chen-Hao Liu and Robert K. Lai. *A fuzzy case-based reasoning model for sales forecasting in print circuit board industries*. Expert Systems with Applications, vol. 34, no. 3, pages 2049–2058, 2008. (Cité à la page 95.)
- [Chang 2011] Wonsuk Chang, Wonil Hwang and Yong Gu Ji. *Haptic seat interfaces for driver information and warning systems*. International Journal of Human-Computer Interaction, vol. 27, no. 12, pages 1119–1132, 2011. (Cité à la page 12.)
- [Chauvelin 2014] Camille Chauvelin, Thibault Sagi, Philippe Coni, Jean-Marc André, Christophe Jauze and Véronique Lespinet-Najib. *Haptics on a touch screen : characterization of perceptual thresholds*. International Journal of Human-Computer Interaction, 2014. In press. (Cité à la page 21.)
- [Chen 2010] Hsiang-Yu Chen, Jaeyoung Park, Hong Z. Tan and Steve Dai. *Redundant coding of simulated tactile key clicks with audio signals*. In Haptics Symposium, 2010 IEEE, pages 29–34. IEEE, 2010. (Cité à la page 15.)
- [Choudhary 2013] Vikas Choudhary and Krzysztof Iniewski. *Mems : Fundamental technology and applications*. CRC Press, 2013. (Cité à la page 16.)
- [Ciliz 2005] M. Kemal Ciliz. *Rule base reduction for knowledge-based fuzzy controllers with application to a vacuum cleaner*. Expert Systems with Applications, vol. 28, no. 1, pages 175–184, 2005. (Cité à la page 164.)
- [Clarke 2006] K Robert Clarke, Paul J Somerfield and M Gee Chapman. *On resemblance measures for ecological studies, including taxonomic dissimilarities and a zero-adjusted Bray–Curtis coefficient for denuded assemblages*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, vol. 330, no. 1, pages 55–80, 2006. (Cité à la page 67.)
- [Cohen 1989] Leon Cohen. *Time-frequency distributions-a review*. Proceedings of the IEEE, vol. 77, no. 7, pages 941–981, 1989. (Cité à la page 32.)
- [Coni 2011] Philippe Coni, Philippe Mozer and Jean Noel Perbet. *Haptic Feedback On Cockpit Environment Submitted To Vibration Stress*. In EuroDisplay, 2011. (Cité aux pages 7 and 22.)
- [Cordón 2000] Oscar Cordón and Francisco Herrera. *A proposal for improving the accuracy of linguistic modeling*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 8, no. 3, pages 335–344, 2000. (Cité aux pages 99, 100, 101 and 111.)

- [Cordón 2001] Oscar Cordón, Francisco Herrera and Pedro Villar. *Generating the knowledge base of a fuzzy rule-based system by the genetic learning of the data base*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 9, no. 4, pages 667–674, 2001. (Cité à la page 92.)
- [Cózar 2014] Javier Cózar, Luis de la Ossa and José A Gámez. *Learning TSK-0 linguistic fuzzy rules by means of local search algorithms*. Applied Soft Computing, vol. 21, pages 57–71, 2014. (Cité à la page 99.)
- [Craig 1972] James C. Craig. *Difference threshold for intensity of tactile stimuli*. Perception & Psychophysics, vol. 11, no. 2, pages 150–152, 1972. (Cité à la page 18.)
- [Curt 2011] Corinne Curt, Aurélie Talon and Gilles Mauris. *A dam assessment support system based on physical measurements, sensory evaluations and expert judgements*. Measurement, vol. 44, no. 1, pages 192–201, 2011. (Cité à la page 90.)
- [Dabic 2013] Stéphanie Dabic, Jordan Navarro, Jean-Marc Tissot and Remy Versace. *User perceptions and evaluations of short vibrotactile feedback*. Journal of Cognitive Psychology, vol. 25, no. 3, pages 299–308, 2013. (Cité aux pages 52 and 146.)
- [de Vries 2009] Sjoerd C. de Vries, Jan B. F. Van Erp and Raymond J. Kiefer. *Direction coding using a tactile chair*. Applied Ergonomics, vol. 40, no. 3, pages 477–484, 2009. (Cité à la page 12.)
- [Dictionaries 2014] Oxford Dictionaries. *Oxford Dictionaries : "touchscreen"*, Octobre 2014. (Cité à la page 1.)
- [Duțu 2013] Liviu-Cristian Duțu, Gilles Mauris, Philippe Bolon, Stéphanie Dabic and Jean-Marc Tissot. *A fuzzy model relating vibrotactile signal characteristics to haptic sensory evaluations*. In Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications (CIVEMSA), 2013 IEEE International Conference on, pages 49–54. IEEE, 2013. (Cité à la page 78.)
- [Duțu 2014a] Liviu-Cristian Duțu, Gilles Mauris, Philippe Bolon, Stéphanie Dabic and Jean-Marc Tissot. *A Fuzzy Rule-Based Haptic Perception Model for Automotive Vibrotactile Display*. In Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems, pages 576–585. Springer, 2014. (Cité à la page 116.)
- [Duțu 2014b] Liviu-Cristian Duțu, Gilles Mauris, Philippe Bolon, Stéphanie Dabic and Jean-Marc Tissot. *Un Modèle Psychophysique Flou pour l'Évaluation Hédonique de Signaux Vibrotactiles*. In Actes des Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications (LFA), 2014. (Cité à la page 116.)
- [Ekman 1954] Gosta Ekman. *Dimensions of color vision*. The Journal of Psychology, vol. 38, no. 2, pages 467–474, 1954. (Cité aux pages xviii and 144.)
- [Emre Cek 2010] M. Emre Cek, Murat Ozgoren and F. Acar Savaci. *Continuous time wavelet entropy of auditory evoked potentials*. Computers in Biology and Medicine, vol. 40, no. 1, pages 90–96, 2010. (Cité à la page 71.)

- [Engelbrecht 2007] Andries P. Engelbrecht. *Computational intelligence : an introduction*. John Wiley & Sons, 2007. (Cité aux pages 37, 38, 39, 40, 41 and 46.)
- [Enriquez 2006] Mario Enriquez, Karon MacLean and Christian Chita. *Haptic phonemes : basic building blocks of haptic communication*. In Proceedings of the 8th International Conference on Multimodal Interfaces, pages 302–309. ACM, 2006. (Cité aux pages 13 and 14.)
- [Farge 1992] Marie Farge. *Wavelet transforms and their applications to turbulence*. Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 24, no. 1, pages 395–458, 1992. (Cité aux pages 37, 59 and 61.)
- [Ferrero 2007] Alessandro Ferrero, Simona Salicone and Grazia Todeschini. *A fuzzy method for the identification of the sources producing harmonic pollution in the electric network*. Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2007. IMTC 2007. IEEE, 2007. (Cité à la page 95.)
- [Flandrin 1998] Patrick Flandrin. *Time-frequency/time-scale analysis*, volume 10. Academic Press, 1998. (Cité à la page 34.)
- [Forta 2009] Nazim Gizem Forta. *Vibration intensity difference thresholds*. PhD thesis, University of Southampton, 2009. (Cité aux pages 17, 18, 20, 22 and 28.)
- [Foulloy 1993] Laurent Foulloy. *Qualitative control and fuzzy control : towards a writing methodology*. AI Communications, vol. 6, no. 3, pages 147–154, 1993. (Cité à la page 90.)
- [Foulloy 1994] Laurent Foulloy. *Typologie des contrôleurs flous*. Logique Floue, Eds. MASSON, Observatoire Français des Techniques Avancées, pages 80–107, 1994. (Cité à la page 47.)
- [Franzén 1969] Ove Franzén. *The dependence of vibrotactile threshold and magnitude functions on stimulation frequency and signal level : A perceptual and neural comparison*. Scandinavian Journal of Psychology, vol. 10, no. 1, pages 289–298, 1969. (Cité aux pages xi, 20 and 21.)
- [Gabor 1946] Dennis Gabor. *Theory of communication. Part 1 : The analysis of information*. Electrical Engineers-Part III : Radio and Communication Engineering, Journal of the Institution of, vol. 93, no. 26, pages 429–441, 1946. (Cité aux pages 30 and 31.)
- [Galichet 1995] Sylvie Galichet and Laurent Foulloy. *Fuzzy controllers : synthesis and equivalences*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 3, no. 2, pages 140–148, 1995. (Cité aux pages 90 and 91.)
- [Galichet 1998] Sylvie Galichet and Laurent Foulloy. *Size reduction in fuzzy rulebases*. In IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1998., volume 3, pages 2107–2112. IEEE, 1998. (Cité à la page 163.)

- [Gardner 1998] Matt W. Gardner and Steve R. Dorling. *Artificial neural networks (the multilayer perceptron)—a review of applications in the atmospheric sciences*. Atmospheric Environment, vol. 32, no. 14-15, pages 2627–2636, 1998. (Cité à la page 41.)
- [Gescheider 1985] George A. Gescheider, Bradley F Sklar, Clayton L Van Doren and Ronald T. Verrillo. *Vibrotactile forward masking : psychophysical evidence for a triplex theory of cutaneous mechanoreception*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 78, no. 2, pages 534–543, 1985. (Cité à la page 22.)
- [Gescheider 1999] George A. Gescheider, M.E. Berryhill, Ronald T. Verrillo and Stanley J. Bolanowski. *Vibrotactile temporal summation : probability summation or neural integration ?* Somatosensory & Motor Research, vol. 16, pages 229–242, 1999. (Cité aux pages xi, 24, 25 and 26.)
- [Gescheider 2004] George A. Gescheider, Stanley J. Bolanowski and Ronald T. Verrillo. *Some characteristics of tactile channels*. Behavioural Brain Research, vol. 148, pages 35–40, 2004. (Cité aux pages xi, 17, 22, 23, 24, 25, 26, 28 and 79.)
- [Ghanbari 2013] Arash Ghanbari, Seyed M. R. Kazemi, Farhad Mehmanpazir and Mohammad Masoud Nakhostin. *A Cooperative Ant Colony Optimization-Genetic Algorithm approach for construction of energy demand forecasting knowledge-based expert systems*. Knowledge-Based Systems, vol. 39, pages 194–206, 2013. (Cité à la page 99.)
- [Gonçalves 1998] Paulo Gonçalves and Richard G. Baraniuk. *Pseudo affine Wigner distributions : Definition and kernel formulation*. IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 46, no. 6, pages 1505–1516, 1998. (Cité à la page 34.)
- [Groenen 2005] Patrick J. F. Groenen and Michel Velden. *Multidimensional scaling*. Wiley Online Library, 2005. (Cité aux pages xviii and 144.)
- [Grossmann 1984] Alex Grossmann and Jean Morlet. *Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape*. SIAM journal on mathematical analysis, vol. 15, no. 4, pages 723–736, 1984. (Cité à la page 61.)
- [Guillaume 2001] Serge Guillaume. *Designing fuzzy inference systems from data : an interpretability-oriented review*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 9, no. 3, pages 426–443, 2001. (Cité à la page 97.)
- [Gupta 1991] Madan M. Gupta and J. Qi. *Theory of T-norms and fuzzy inference methods*. Fuzzy Sets and Systems, vol. 40, no. 3, pages 431–450, 1991. (Cité à la page 44.)
- [Harazin 2007] Barbara Harazin and Agnieszka Harazin-Lechowska. *Effect of changes in finger skin temperature on vibrotactile perception threshold*. International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health, vol. 20, no. 3, pages 223–227, 2007. (Cité à la page 22.)

- [Hart 1988] Sandra G. Hart and Lowell E. Staveland. *Development of NASA-TLX (Task Load Index) : Results of empirical and theoretical research*. Advances in Psychology, vol. 52, pages 139–183, 1988. (Cité à la page 10.)
- [Haykin 1999] Simon Haykin. *Neural network : A comprehensive foundation*. Pearson Education, 1999. (Cité aux pages 40, 41 and 42.)
- [Hlawatsch 1992] Franz Hlawatsch and G. Faye Boudreaux-Bartels. *Linear and quadratic time-frequency signal representations*. IEEE Signal Processing Magazine, vol. 9, no. 2, pages 21–67, 1992. (Cité aux pages 32, 34 and 36.)
- [Hoggan 2007] Eve Hoggan, Sohail Anwar and Stephen Brewster. *Mobile multi-actuator tactile displays*. In Haptic and Audio Interaction Design, pages 22–33. Springer, 2007. (Cité à la page 10.)
- [Hoggan 2008a] Eve Hoggan, Stephen Brewster and Jody Johnston. *Investigating the effectiveness of tactile feedback for mobile touchscreens*. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pages 1573–1582. ACM, 2008. (Cité aux pages xi, 9, 10 and 11.)
- [Hoggan 2008b] Eve Hoggan, Topi Kaaresoja, Pauli Laitinen and Stephen Brewster. *Crossmodal congruence : the look, feel and sound of touchscreen widgets*. In Proceedings of the 10th International Conference on Multimodal Interfaces, pages 157–164. ACM, 2008. (Cité à la page 15.)
- [Hwang 2011] Jihong Hwang and Wonil Hwang. *Vibration perception and excitatory direction for haptic devices*. Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 22, no. 1, pages 17–27, 2011. (Cité à la page 21.)
- [Ioannou 2003] Irina Ioannou. *Mise en oeuvre d'une approche symbolique floue pour la maîtrise de la qualité des produits alimentaires par contrôle du procédé*. PhD thesis, Clermont-Ferrand 2, 2003. (Cité à la page 125.)
- [Ioannou 2004] Irina Ioannou, Nathalie Perrot, Corinne Curt, Irène Allais, Laure Agioux, Roch-Boris Edoura-Gaena, Gilles Mauris, Gilles Trystram and Joseph Hossenlopp. *The fuzzy symbolic approach for the control of sensory properties in food processes*. In D. Ruan and X. Zeng, editeurs, Intelligent Sensory Evaluation, pages 175–195. Springer-Verlag, 2004. (Cité à la page 90.)
- [Ishibuchi 1994] Hisao Ishibuchi, Ken Nozaki, Hideo Tanaka, Yukio Hosaka and Masanori Matsuda. *Empirical study on learning in fuzzy systems by rice taste analysis*. Fuzzy Sets and Systems, vol. 64, no. 2, pages 129–144, 1994. (Cité à la page 107.)
- [Jaffard 2001] Stéphane Jaffard, Yves Meyer and Robert D. Ryan. *Wavelets : tools for science and technology*. Siam, 2001. (Cité à la page 32.)
- [Johnson 2001] Kenneth O. Johnson. *The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors*. Current Opinion in Neurobiology, vol. 11, no. 4, pages 455–461, 2001. (Cité à la page 16.)

- [Jones 1998] Gareth Jones. *Genetic and evolutionary algorithms*. Encyclopedia of Computational Chemistry. John Wiley and Sons, 1998. (Cité à la page 38.)
- [Kim 2008] Seung-Chan Kim, Tae-Hon Yang, Byung-Kil Han and Dong-Soo Kwon. *Interaction with a display panel-An evaluation of surface-transmitted haptic feedback*. In International Conference on Control, Automation and Systems, 2008. ICCAS 2008., pages 278–283. IEEE, 2008. (Cité à la page 12.)
- [Kim 2014] Huhn Kim and Haewon Song. *Evaluation of the safety and usability of touch gestures in operating in-vehicle information systems with visual occlusion*. Applied ergonomics, vol. 45, no. 3, pages 789–798, 2014. (Cité à la page 7.)
- [Kirkpatrick 1983] Scott Kirkpatrick, Daniel C. Gelatt and Mario P. Vecchi. *Optimization by simulated annealing*. Science, vol. 220, no. 4598, pages 671–680, 1983. (Cité à la page 40.)
- [Klauer 2006] Sheila G. Klauer, Thomas A. Dingus, Vicki L. Neale, Jeremy D. Sudweeks and David J. Ramsey. *The impact of driver inattention on near-crash/crash risk : An analysis using the 100-car naturalistic driving study data*. Rapport technique, 2006. (Cité à la page 7.)
- [Koczy 1997] Laszlo T. Koczy and Kaoru Hirota. *Size reduction by interpolation in fuzzy rule bases*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B : Cybernetics, vol. 27, no. 1, pages 14–25, 1997. (Cité aux pages 163 and 164.)
- [Konak 2006] Abdullah Konak, David W. Coit and Alice E. Smith. *Multi-objective optimization using genetic algorithms : A tutorial*. Reliability Engineering & System Safety, vol. 91, no. 9, pages 992–1007, 2006. (Cité à la page 40.)
- [Koskinen 2008] Emilia Koskinen. *Optimizing tactile feedback for virtual buttons in mobile devices*. PhD thesis, Helsinki University of Technology, 2008. (Cité à la page 12.)
- [Kruskal 1964a] Joseph B. Kruskal. *Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis*. Psychometrika, vol. 29, no. 1, pages 1–27, 1964. (Cité à la page 143.)
- [Kruskal 1964b] Joseph B. Kruskal. *Nonmetric multidimensional scaling : a numerical method*. Psychometrika, vol. 29, no. 2, pages 115–129, 1964. (Cité à la page 143.)
- [Lay-Ekuakille 2014] Aimé Lay-Ekuakille, Patrizia Vergallo, Giuseppe Griffo, Francesco Conversano, Sergio Casciaro, Shabana Urooj, Vikrant Bhateja and Antonio Trabacca. *Entropy Index in Quantitative EEG Measurement for Diagnosis Accuracy*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014. (Cité à la page 71.)
- [Lee 2008] Ju-Hwan Lee and Charles Spence. *Assessing the benefits of multimodal feedback on dual-task performance under demanding conditions*. In Proceedings of the 22nd British HCI Group Annual Conference on People and Computers : Culture,

- Creativity, Interaction-Volume 1, pages 185–192. British Computer Society, 2008. (Cité à la page 12.)
- [Lee 2011] Duke Lee. *The state of the touch-screen panel market in 2011*. In *Inf Disp*, volume 27, pages 12–16, 2011. (Cité aux pages xi, 6 and 7.)
- [Leung 2007] Rock Leung, Karon MacLean, Martin Bue Bertelsen and Mayukh Saubhasik. *Evaluation of haptically augmented touchscreen gui elements under cognitive load*. In *Proceedings of the 9th International Conference on Multimodal Interfaces*, pages 374–381. ACM, 2007. (Cité à la page 9.)
- [Levrat 1997] Eric Levrat, Alexandre Voisin, S. Bombardier and J. Bremont. *Subjective evaluation of car seat comfort with fuzzy set techniques*. *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 12, no. 11-12, pages 891–913, 1997. (Cité à la page 90.)
- [Likert 1932] Rensis Likert. *A technique for the measurement of attitudes*. *Archives of Psychology*, 1932. (Cité à la page 52.)
- [Looft 1996] Fred J. Looft. *Response of monkey glabrous skin mechanoreceptors to random noise sequences : II. Dynamic stimulus state analysis*. *Somatosensory & Motor Research*, vol. 13, no. 1, pages 11–28, 1996. (Cité aux pages 27 and 68.)
- [Lurie 2007] Alain Lurie, Christophe Marsala, Sarah Hartley, Bernadette Bouchon-Meunier and Daniel Dusser. *Patients' perception of asthma severity*. *Respiratory Medicine*, vol. 101, no. 10, pages 2145–2152, 2007. (Cité à la page 90.)
- [MacLean 2003] Karon MacLean and Mario Enriquez. *Perceptual design of haptic icons*. In *Proc. of EuroHaptics*, pages 351–363, 2003. (Cité à la page 13.)
- [Mallat 1999] Stéphane Mallat. *A wavelet tour of signal processing*. Academic press, 1999. (Cité à la page 61.)
- [Mamdani 1975] Ebrahim H. Mamdani and Sedrak Assilian. *An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller*. *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 7, no. 1, pages 1–13, 1975. (Cité à la page 47.)
- [MarketsAndMarkets 2012] MarketsAndMarkets. *In-Car Entertainment (Infotainment) [ICE] System Market - Global Forecast & Analysis by OEM & Aftermarket (2011-2016)*, Mars 2012. (Cité à la page 7.)
- [Matsuzaki 2012] Naoyuki Matsuzaki, Tetsuro Nagasawa, Csaba Juhász, Sandeep Sood and Eishi Asano. *Independent predictors of neuronal adaptation in human primary visual cortex measured with high-gamma activity*. *Neuroimage*, vol. 59, no. 2, pages 1639–1646, 2012. (Cité à la page 16.)
- [Mauris 1994] Gilles Mauris, Eric Benoit and Laurent Foulloy. *Fuzzy symbolic sensors—From concept to applications*. *Measurement*, vol. 12, no. 4, pages 357–384, 1994. (Cité aux pages 47 and 90.)

- [Mauris 1996] Gilles Mauris, Eric Benoit and Laurent Foulloy. *The aggregation of complementary information via fuzzy sensors*. *Measurement*, vol. 17, pages 235–249, 1996. (Cité aux pages 90 and 128.)
- [Mauris 2002] Gilles Mauris and Laurent Foulloy. *A fuzzy symbolic approach to formalize sensory measurements : an application to a comfort sensor*. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 51, no. 4, pages 712–715, 2002. (Cité à la page 90.)
- [McAdam 2009] Christopher McAdam and Stephen Brewster. *Distal tactile feedback for text entry on tabletop computers*. In *Proceedings of the 23rd British HCI Group Annual Conference on People and Computers : Celebrating People and Technology*, pages 504–511. British Computer Society, 2009. (Cité à la page 10.)
- [McGill 1968] William J. McGill and J. P. Goldberg. *A study of the near-miss involving Weber's law and pure-tone intensity discrimination*. *Perception & Psychophysics*, vol. 4, no. 2, pages 105–109, 1968. (Cité à la page 18.)
- [McGlone 2010] Francis McGlone and David Reilly. *The cutaneous sensory system*. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, vol. 34, no. 2, pages 148–159, 2010. (Cité aux pages 15, 16, 24 and 28.)
- [Mencar 2013] Corrado Mencar. *Interpretability of Fuzzy Systems*. In *Fuzzy Logic and Applications*, pages 22–35. Springer, 2013. (Cité à la page 163.)
- [Misiti 1997] Michel Misiti, Yves Misiti, Georges Oppenheim and Jean-Michel Poggi. *Wavelet toolbox*. *Matlab User's Guide*, 1997. (Cité à la page 64.)
- [Mitchell 1998] Melanie Mitchell. *An introduction to genetic algorithms*. MIT press, 1998. (Cité aux pages 38, 39 and 40.)
- [Moreno 2003] Pedro J. Moreno, Purdy P. Ho and Nuno Vasconcelos. *A Kullback-Leibler divergence based kernel for SVM classification in multimedia applications*. In *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2003. (Cité à la page 74.)
- [Morioka 2001] Miyuki Morioka. *Psychophysical Investigation of the Perception of Hand-transmitted Vibration*. PhD thesis, Southampton University, 2001. (Cité à la page 18.)
- [Morioka 2006] Miyuki Morioka and Michael J. Griffin. *Magnitude-dependence of equivalent comfort contours for fore-and-aft, lateral and vertical hand-transmitted vibration*. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 295, no. 3, pages 633–648, 2006. (Cité aux pages 21 and 54.)
- [Morley 1990] John W. Morley and Mark J. Rowe. *Perceived pitch of vibrotactile stimuli : effects of vibration amplitude, and implications for vibration frequency coding*. *The Journal of Physiology*, vol. 431, no. 1, pages 403–416, 1990. (Cité à la page 19.)

- [Muniak 2007] Michael A. Muniak, Supratim Ray, Steven S. Hsiao, J. Frank Dammann and Sliman Bensmaia. *The neural coding of stimulus intensity : linking the population response of mechanoreceptive afferents with psychophysical behavior*. The Journal of Neuroscience, vol. 27, no. 43, pages 11687–11699, 2007. (Cité aux pages 26 and 71.)
- [Nozaki 1997] Ken Nozaki, Hisao Ishibuchi and Hideo Tanaka. *A simple but powerful heuristic method for generating fuzzy rules from numerical data*. Fuzzy Sets and Systems, vol. 86, no. 3, pages 251–270, 1997. (Cité aux pages 95 and 99.)
- [Pancho 2013] David P. Pancho, Jose M. Alonso, Oscar Cerdón, Arnaud Quirin and Luis Magdalena. *FINGRAMS : visual representations of fuzzy rule-based inference for expert analysis of comprehensibility*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 21, no. 6, pages 1133–1149, 2013. (Cité aux pages 93 and 164.)
- [Paneels 2013] Sabrina Paneels, Margarita Anastassova, Steven Strachan, Sophie Pham Van, Saranya Sivacoumarane and Christian Bolzmacher. *What's around me ? Multi-actuator haptic feedback on the wrist*. In World Haptics Conference (WHC), 2013, pages 407–412. IEEE, 2013. (Cité à la page 12.)
- [Perrot 2006] Nathalie Perrot, Irina Ioannou, Irène Allais, Corinne Curt, Joseph Hossenlopp and Gilles Trystram. *Fuzzy concepts applied to food product quality control : A review*. Fuzzy Sets and Systems, vol. 157, no. 9, pages 1145–1154, 2006. (Cité à la page 90.)
- [Peters 2009] Ryan M. Peters, Erik Hackeman and Daniel Goldreich. *Diminutive digits discern delicate details : fingertip size and the sex difference in tactile spatial acuity*. The Journal of Neuroscience, vol. 29, no. 50, pages 15756–15761, 2009. (Cité à la page 21.)
- [Pitts 2009] Matthew J. Pitts, Mark A Williams, Tom Wellings and Alex Attridge. *Assessing subjective response to haptic feedback in automotive touchscreens*. In Proceedings of the 1st International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, pages 11–18. ACM, 2009. (Cité aux pages 12 and 15.)
- [Pitts 2012a] Matthew J. Pitts, Gary Burnett, Lee Skrypchuk, Tom Wellings, Alex Attridge and Mark A. Williams. *Visual-haptic feedback interaction in automotive touchscreens*. Displays, vol. 33, no. 1, pages 7–16, 2012. (Cité aux pages xi, 11 and 12.)
- [Pitts 2012b] Matthew J. Pitts, Lee Skrypchuk, Tom Wellings, Alex Attridge and Mark A. Williams. *Evaluating user response to in-car haptic feedback touchscreens using the lane change test*. Advances in Human-Computer Interaction, vol. 2012, page 2, 2012. (Cité aux pages 12 and 15.)
- [Pongrac 2008] Helena Pongrac. *Vibrotactile perception : examining the coding of vibrations and the just noticeable difference under various conditions*. Multimedia Systems, vol. 13, no. 4, pages 297–307, 2008. (Cité à la page 18.)

- [Poupyrev 2002] Ivan Poupyrev, Shigeaki Maruyama and Jun Rekimoto. *Ambient touch : designing tactile interfaces for handheld devices*. In Proceedings of the 15th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pages 51–60. ACM, 2002. (Cité à la page 9.)
- [Richter 2010] Hendrik Richter, Ronald Ecker, Christopher Deisler and Andreas Butz. *HapTouch and the 2+1 state model : potentials of haptic feedback on touch based in-vehicle information systems*. In Proceedings of the 2nd International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, pages 72–79. ACM, 2010. (Cité à la page 12.)
- [Rioul 1991] Olivier Rioul and Martin Vetterli. *Wavelets and signal processing*. IEEE Signal Processing Magazine, vol. 8, pages 14–38, 1991. (Cité aux pages 30, 31, 59 and 61.)
- [Rioul 1992] Olivier Rioul and Patrick Flandrin. *Time-scale energy distributions : a general class extending wavelet transforms*. IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 40, pages 1746–1757, 1992. (Cité aux pages 30, 31 and 34.)
- [Robles-De-La-Torre 2010] Gabriel Robles-De-La-Torre. *International Society for Haptics : Haptic technology, an animated explanation*. Isfh. org, 2010. (Cité à la page 2.)
- [Rosso 2001] Osvaldo A. Rosso, Susana Blanco, Juliana Yordanova, Vasil Kolev, Alejandra Figliola, Martin Schürmann and Erol Başar. *Wavelet entropy : a new tool for analysis of short duration brain electrical signals*. Journal of Neuroscience Methods, vol. 105, no. 1, pages 65–75, 2001. (Cité à la page 71.)
- [Ryu 2010] Jonghyun Ryu, Chil-Woo Lee and Seungmoon Choi. *Improving vibrotactile pattern identification for mobile devices using perceptually transparent rendering*. In Proceedings of the 12th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services, pages 257–260. ACM, 2010. (Cité aux pages 13 and 14.)
- [Self 2008] B. P. Self, Jan B. F. Van Erp, L. Eriksson and L. R. Elliott. *Human factors issues of tactile displays for military environments*. Tactile Displays for Orientation, Navigation and Communication in Air, Sea and Land Environments, 2008. (Cité à la page 12.)
- [Sello 2003] Stefano Sello. *Wavelet entropy and the multi-peaked structure of solar cycle maximum*. New Astronomy, vol. 8, no. 2, pages 105–117, 2003. (Cité à la page 71.)
- [Setnes 1998] Magne Setnes, Robert Babuska, Uzay Kaymak and Hans R. van Nauta Lemke. *Similarity measures in fuzzy rule base simplification*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B : Cybernetics, vol. 28, no. 3, pages 376–386, 1998. (Cité à la page 163.)

- [Shepard 1962a] Roger N. Shepard. *The analysis of proximities : Multidimensional scaling with an unknown distance function. I.* Psychometrika, vol. 27, no. 2, pages 125–140, 1962. (Cité aux pages 143 and 144.)
- [Shepard 1962b] Roger N. Shepard. *The analysis of proximities : Multidimensional scaling with an unknown distance function. II.* Psychometrika, vol. 27, no. 3, pages 219–246, 1962. (Cité à la page 143.)
- [Stankovic 2014] Ljubisa Stankovic, Srdjan Stankovic and Milos Dakovic. *From the STFT to the Wigner Distribution [Lecture Notes].* IEEE Signal Processing Magazine, vol. 31, no. 3, pages 163–174, 2014. (Cité à la page 36.)
- [Staszewski 1997] Wieslaw J. Staszewski, Keith Worden and Geof R. Tomlinson. *Time–frequency analysis in gearbox fault detection using the Wigner–Ville distribution and pattern recognition.* Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 11, no. 5, pages 673–692, 1997. (Cité aux pages 32 and 36.)
- [Statista 2014] Inc. Statista. *Global market share held by leading smartphone vendors from 4th quarter 2009 to 2nd quarter 2014*, 2014. (Cité à la page 2.)
- [Stevens 1957] Stanley S. Stevens. *On the psychophysical law.* Psychological Review, vol. 64, no. 3, page 153, 1957. (Cité à la page 19.)
- [Stevens 1968] Stanley S. Stevens. *Tactile vibration : Change of exponent with frequency.* Perception & Psychophysics, vol. 3, no. 3, pages 223–228, 1968. (Cité aux pages xi, 19, 20 and 21.)
- [Stevens 2002] Alan Stevens, A Quimby, A Board, T Kersloot and P Burns. *Design guidelines for safety of in-vehicle information systems.* Rapport technique, Transport Research Laboratory, February 2002. (Cité à la page 7.)
- [Szmajda 2010] Mirosław Szmajda, Krzysztof Górecki and Janusz Mroczka. *Gabor transform, SPWVD, Gabor-Wigner transform and wavelet transform-tools for power quality monitoring.* Metrology and Measurement Systems, vol. 17, no. 3, pages 383–396, 2010. (Cité aux pages 31 and 34.)
- [Takagi 1985] Tomohiro Takagi and Michio Sugeno. *Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control.* IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, no. 1, pages 116–132, 1985. (Cité à la page 47.)
- [Ternes 2008] David Ternes and Karon E. Maclean. *Designing large sets of haptic icons with rhythm.* In Haptics : perception, devices and scenarios, pages 199–208. Springer, 2008. (Cité à la page 14.)
- [Tikka 2006] Ville Tikka and Pauli Laitinen. *Designing haptic feedback for touch display : Experimental study of perceived intensity and integration of haptic and audio.* In Haptic and Audio Interaction Design, pages 36–44. Springer, 2006. (Cité aux pages 14 and 15.)

- [Tissot 2012] Jean-Marc Tissot. *Haptic feedback touch-sensitive interface module*, April 26 2012. WO Patent App. PCT/FR2011/000,567. (Cité à la page 51.)
- [Tognola 1997] Gabriella Tognola, Ferdinando Grandori and Paolo Ravazzani. *Time-frequency distributions of click-evoked otoacoustic emissions*. *Hearing Research*, vol. 106, no. 1, pages 112–122, 1997. (Cité à la page 37.)
- [Torrence 1998] Christopher Torrence and Gilbert P. Compo. *A practical guide to wavelet analysis*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 79, no. 1, pages 61–78, 1998. (Cité à la page 63.)
- [Trivino 2013] Gracian Trivino and Michio Sugeno. *Towards linguistic descriptions of phenomena*. *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 54, no. 1, pages 22–34, 2013. (Cité à la page 46.)
- [Truchetet 1998] Frédéric Truchetet. *Ondelettes pour le signal numérique*. Hermes, 1998. (Cité à la page 62.)
- [Tudu 2009] Bipan Tudu, Animesh Metla, Barun Das, Nabarun Bhattacharyya, Arun Jana, Devdulal Ghosh and Rajib Bandyopadhyay. *Towards versatile electronic nose pattern classifier for black tea quality evaluation : An incremental fuzzy approach*. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, no. 9, pages 3069–3078, 2009. (Cité à la page 95.)
- [Valet 2003] Lionel Valet, Gilles Mauris, Philippe Bolon and Naamen Keskes. *A fuzzy rule-based interactive fusion system for seismic data analysis*. *Information Fusion*, vol. 4, no. 2, pages 123–133, 2003. (Cité aux pages 90 and 118.)
- [Van Erp 2001] Jan B. F. Van Erp and Hendrik A. H. C. Van Veen. *Vibro-tactile information presentation in automobiles*. In *Proceedings of Eurohaptics*, pages 99–104, 2001. (Cité à la page 7.)
- [Van Erp 2004] Jan B. F. Van Erp and Hendrik A. H. C. Van Veen. *Vibrotactile in-vehicle navigation system*. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 7, no. 4, pages 247–256, 2004. (Cité à la page 12.)
- [Van Erp 2005] Jan B. F. Van Erp, Hendrik A. H. C. Van Veen, Chris Jansen and Trevor Dobbins. *Waypoint navigation with a vibrotactile waist belt*. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, vol. 2, no. 2, pages 106–117, 2005. (Cité à la page 12.)
- [Van Erp 2006] Jan B. F. Van Erp, Eric L. Groen, Jelte E. Bos and Hendrik A. H. C. Van Veen. *A tactile cockpit instrument supports the control of self-motion during spatial disorientation*. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 48, no. 2, pages 219–228, 2006. (Cité à la page 12.)
- [Vapnik 2014] Vladimir Vapnik. *Learning With Nontrivial Teacher : Learning using Privileged Information (Keynote Speech)*. In *Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*, 2014. (Cité à la page 42.)

- [Verrillo 1968] Ronald T. Verrillo. *A duplex mechanism of mechanoreception*. The Skin Senses, pages 139–159, 1968. (Cité à la page 22.)
- [Verrillo 1969] Ronald T. Verrillo, Anthony J. Fraioli and Robert L. Smith. *Sensation magnitude of vibrotactile stimuli*. Perception & Psychophysics, vol. 6, no. 6, pages 366–372, 1969. (Cité aux pages xi, 19, 20 and 22.)
- [Verrillo 1975] Ronald T. Verrillo and Anthony J. Capraro. *Effect of stimulus frequency on subjective vibrotactile magnitude functions*. Perception & Psychophysics, vol. 17, no. 1, pages 91–96, 1975. (Cité aux pages xi, 20 and 21.)
- [Verrillo 1980] Ronald T. Verrillo. *Age related changes in the sensitivity to vibration*. Journal of Gerontology, vol. 35, no. 2, pages 185–193, 1980. (Cité à la page 21.)
- [Vetterli 1995] Martin Vetterli and Jelena Kovačević. Wavelets and subband coding, volume 87. Prentice Hall PTR Englewood Cliffs, New Jersey, 1995. (Cité aux pages 32 and 60.)
- [Wang 1992] Li-Xin Wang and Jerry M. Mendel. *Generating fuzzy rules by learning from examples*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 22, no. 6, pages 1414–1427, 1992. (Cité aux pages 95, 101, 105 and 111.)
- [Wang 2003] Li-Xin Wang. *The WM method completed : a flexible fuzzy system approach to data mining*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 11, no. 6, pages 768–782, 2003. (Cité aux pages 98, 99 and 111.)
- [Wei 2014] Side Wei, Gang Ren and Eamonn O’Neill. *Haptic and audio displays for augmented reality tourism applications*. In 2014 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), pages 485–488. IEEE, 2014. (Cité à la page 15.)
- [Wickens 2002] Christopher D. Wickens. *Multiple resources and performance prediction*. Theoretical Issues in Ergonomics Science, vol. 3, pages 159–177, 2002. (Cité à la page 8.)
- [Yan 2009] Ruqiang Yan and Robert X Gao. *Energy-based feature extraction for defect diagnosis in rotary machines*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 58, no. 9, pages 3130–3139, 2009. (Cité à la page 61.)
- [Zadeh 1965] Lotfi A. Zadeh. *Fuzzy Sets*. Information and Control, vol. 8, pages 338–353, 1965. (Cité aux pages 43, 44 and 106.)
- [Zadeh 1973] Lotfi A. Zadeh. *Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, no. 1, pages 28–44, 1973. (Cité à la page 43.)
- [Zadeh 1975a] Lotfi A. Zadeh. *The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning - Part I*. Information Sciences, vol. 8, pages 199–249, 1975. (Cité aux pages 37, 44 and 127.)

- [Zadeh 1975b] Lotfi A. Zadeh. *Fuzzy logic and approximate reasoning*. Synthese, vol. 30, no. 3-4, pages 407–428, 1975. (Cité à la page 42.)
- [Zadeh 1988] Lotfi A. Zadeh. *Fuzzy logic*. Computer, vol. 21, no. 4, pages 83–93, 1988. (Cité à la page 42.)
- [Zadeh 1994] Lotfi A. Zadeh. *Fuzzy logic, neural networks, and soft computing*. Communications of the ACM, vol. 37, no. 3, pages 77–84, 1994. (Cité à la page 38.)
- [Zadeh 1996] Lotfi A. Zadeh. *Fuzzy logic= computing with words*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 4, no. 2, pages 103–111, 1996. (Cité aux pages 42 and 46.)
- [Zadeh 1999] Lotfi A. Zadeh. *From computing with numbers to computing with words. From manipulation of measurements to manipulation of perceptions*. IEEE Transactions on Circuits and Systems I : Fundamental Theory and Applications, vol. 46, no. 1, pages 105–119, 1999. (Cité aux pages 42 and 46.)
- [Zadeh 2001] Lotfi A. Zadeh. *A new direction in AI : Toward a computational theory of perceptions*. AI Magazine, vol. 22, no. 1, page 73, 2001. (Cité à la page 46.)
- [Zeng 2003] Xianyi Zeng and Ludovic Koehl. *Representation of the subjective evaluation of the fabric hand using fuzzy techniques*. International Journal of Intelligent Systems, vol. 18, no. 3, pages 355–366, 2003. (Cité à la page 95.)
- [Zwislocki 1960] Jozef J. Zwislocki. *Theory of Temporal Auditory Summation*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 32, pages 1046–1060, 1960. (Cité à la page 25.)

Résumé : Dans les secteurs de l'automobile et l'aéronautique, l'interaction avec les écrans tactiles peut être rendue plus fiable par l'ajout d'un *retour vibratoire (effet haptique)* envoyé directement au doigt de l'utilisateur au moment du contact avec l'écran. Des patterns vibratoires complexes peuvent ainsi être créés afin d'améliorer la qualité de la sensation perçue et le plaisir de l'utilisation.

Dans ce contexte, notre première contribution concerne l'*analyse de patterns vibratoires* à l'aide de la transformée en ondelettes continue du signal délivré par la dalle, afin d'extraire les caractéristiques les plus saillantes, choisies d'après une étude psychophysique du sens tactile, et qui sont en liaison avec la perception.

A partir de ces caractéristiques, notre deuxième contribution s'articule autour d'un *modèle psychophysique de la perception vibrotactile* élaboré en utilisant des règles floues générées par une méthode originale étendant l'approche classique de Wang-Mendel. Le modèle prédit le niveau de confort induit par un pattern vibratoire en fonction de ses paramètres psychophysiques. Il présente de bonnes performances quantitatives. La connaissance ainsi obtenue a permis l'identification de plusieurs tendances comportementales importantes pour la perception vibrotactile comme l'effet de l'énergie et de la texture vibrotactile.

La troisième contribution porte sur la conception d'un *modèle ergonomique de la perception vibrotactile*, en s'appuyant sur les évaluations d'un expert du domaine *automobile*. Suite aux bonnes performances obtenues, le modèle a été adapté avec succès pour le domaine *aéronautique*.

Les résultats de cette thèse permettent ainsi d'aider les équipementiers en simplifiant la conception des effets haptiques adéquats, destinés à améliorer l'interaction avec les écrans tactiles.

Mots-clés : vibrotactile, logique floue, traitement du signal, interface tactile, évaluation sensorielle

Abstract: In the field of automotive and aeronautical industries, human interaction with touch interfaces can be improved by using *vibratory feedback* or *haptic effects*, directly delivered to the user finger upon screen interaction. This new approach, which *pro-actively* stimulates the tactile sense, provides a safer and reliable way to interact with touch interfaces. Moreover, complex vibrational patterns can be designed in order to offer unique tactile sensations and thus increase user's quality of experience.

In this context, our first contribution focuses on a *time-frequency analysis of vibrational patterns* using the continuous wavelet transform of the signal delivered by the interface, in order to extract its most salient features, chosen based on a psychophysical study of the tactile sense, and which account for human perception.

Using these features, our second contribution is a *psychophysical model of vibrotactile perception* developed using fuzzy logic and an original rule-based extraction method extending the classical Wang-Mendel approach. This model predicts the perceived comfort induced by a vibratory pattern according to its psychophysical properties, and shows good performances. The knowledge retrieved allowed the detection of several behavioral paradigms of vibrotactile perception, such as the effect of energy and texture.

Our third contribution is the development of an *ergonomic model of vibrotactile perception* based on the evaluations of an *automobile* expert. Thanks to its good performances, the model was successfully adapted to the *aeronautics* area.

The results of this thesis provide assistance to equipment suppliers by simplifying the conception of haptic effects intended to improve human interaction with touch interfaces.

Keywords: vibrotactile, fuzzy logic, signal processing, tactile interface, sensory evaluation
