



HAL
open science

Perception d'information par des retours vibrotactiles pour une mise en œuvre plus flexible des procédés robotisés de fabrication additive.

Sébastien Ibarboure

► **To cite this version:**

Sébastien Ibarboure. Perception d'information par des retours vibrotactiles pour une mise en œuvre plus flexible des procédés robotisés de fabrication additive.. Interface homme-machine [cs.HC]. Université de Bordeaux, 2021. Français. NNT : 2021BORD0161 . tel-03361862

HAL Id: tel-03361862

<https://theses.hal.science/tel-03361862v1>

Submitted on 1 Oct 2021

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

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

THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE
DOCTEUR
DE L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX
PRÉPARÉE À L'ESTIA
ÉCOLE DOCTORALE MATHÉMATIQUE ET
INFORMATIQUE

Par **Sébastien IBARBOURE**

Perception d'informations par des retours vibrotactiles pour une
mise en œuvre plus flexible des procédés robotisés de
fabrication additive.

Sous la direction de : **Nadine COUTURE**
Co-directeur : **Emmanuel DUC**

Soutenue à l'ESTIA, le 22 juin 2021

Devant la commission d'examen composée de :

Olivier CAHUC	Professeur de l'Université de Bordeaux	Président
Isabelle PECCI	Maître de conférences/HDR de l'Université de Lorraine	Rapporteure
Jean-Yves HASCOËT	Professeur de l'École Centrale Nantes	Rapporteur
Anne ROUDAUT	Associate Professor de University of Bristol	Examinatrice
Tristan GOBIN	Codirecteur de HAL Robotics	Invité
Nadine COUTURE	Professeur d'ESTIA	Directrice
Emmanuel DUC	Professeur de SIGMA-CLERMONT	Directeur
Sébastien BOTTECCHIA	Enseignant-Chercheur d'ESTIA	Encadrant/Invité

Résumé

Cette thèse montre que « l'interaction directe d'un opérateur au cours de la mise en œuvre du procédé industriel de fabrication additive pour améliorer la fabrication est possible ». Aujourd'hui, la mise en œuvre de la Chaîne Numérique ne permet pas de réagir naturellement à l'apparition d'un aléa de fabrication. Or, il apparaît que la fabrication à la demande de produits engendre souvent des aléas durant le processus. La première section du mémoire est consacrée à un état de l'art sur la Fabrication Interactive à partir duquel nous proposons une boucle d'interaction Humain-Robot. Cette boucle permet l'interruption du processus automatique pour apporter une modification locale, directement depuis la cellule de fabrication. Un des verrous à lever est de permettre la perception des valeurs des critères de la fabrication par l'opérateur en temps réel et en mobilité. Pour cela, nous avons exploré les retours vibrotactiles. Ainsi, dans la seconde section du mémoire est présentée TacTool, une application web conçue et réalisée afin d'aider la conception de systèmes vibrotactiles. À partir d'une combinaison de 21 caractéristiques, sélectionnées interactivement et par catégories, l'utilisateur se voit proposer des recommandations sur la conception du dispositif de communication vibrotactile caractérisé. Ces recommandations sont sélectionnées dans un ensemble de 181 recommandations issues de la revue de 97 références comprises entre 1960 et 2020. Dans la dernière section, grâce à la conception d'un bracelet vibrotactile appelé ViMA (Vibrotactile Monitoring Armband), nous avons conçu 20 items vibrotactiles, dont nous avons évalué la capacité à être reconnus. Ainsi, cette évaluation et une enquête auprès de 27 experts de la fabrication additive ont permis de définir 18 symboles vibrotactiles permettant d'informer un opérateur pour la surveillance des procédés automatisés de fabrication additive.

Abstract

This PhD Thesis shows that “the direct interaction of an operator during the execution of an industrial additive manufacturing process to improve the fabrication is possible.” Currently, the execution of the Digital Thread for additive manufacturing does not allow to naturally react to the apparition of a manufacturing issue. Yet, it appears that the fabrication of products on demand often generates issues with the process. The first part of this dissertation is focus on a state-of-the-art on the Interactive Fabrication from which we are proposing a human robot interaction loop. This loop allows the interruption of the manufacturing process to carry out localizer modification, directly from the manufacturing robot unit. One of the challenges to solve to allow this interaction is to provide an interface that allows operators to monitor values of different criteria linked to the fabrication in real time while being mobile. Thus, the second part of the dissertation presents TacTool, a web application designed and implemented to help with the design of vibrotactile displays. From the combination of 21 features, interactively selected from 4 categories, the user is then provided with guidelines about the conception of a vibrotactile communication display that matches his or her specifications. These guidelines are picked from a set of 181 guidelines from a review of 97 references issued between 1960 and 2020. In the last part, thanks to the conception of a vibrotactile armband called ViMA (Vibrotactile Monitoring Armband), we have created 20 vibrotactile items for which we evaluated their capacity to be recognized by a group of users. Thereby, this evaluation and a survey with 27 experts of the additive manufacturing processes result in the creation of 18 vibrotactile symbols that can be used by an operator to monitor of automatized additive manufacturing process.

Remerciements

Je remercie tout d'abord M. le président du jury Pr. Olivier CAHUC d'avoir accepté de présider le jury lors de cette soutenance de thèse. Je souhaite ensuite remercier les rapporteurs Dr. Isabelle PECCI et Pr. Jean-Yves HASCOËT pour leurs précieux retours ainsi que le temps qu'ils ont consacré à mon manuscrit. Je remercie ensuite Dr. Anne ROUDAULT pour sa participation en qualité d'examineur et Tristan GOBIN en qualité d'invité apportant un regard industriel à mon travail.

Je veux également remercier mon encadrement, Pr. Nadine COUTURE, Pr. Emmanuel DUC et Dr. Sébastien BOTTECCHIA. Ce manuscrit est l'accomplissement de ces trois années de travail ensemble. Merci pour votre temps et vos conseils. Je tiens à remercier spécialement Emmanuel DUC qui m'a donné l'opportunité de faire cette thèse. J'espère que vous avez pu apprécier tous les trois de m'accompagner, et que j'ai pu également vous apporter lors de ces trois années.

Je remercie tous mes collègues de l'ESTIA, les enseignants-chercheurs, ingénieurs de recherche, les ingénieurs d'ESTIA Tech, les membres de l'administration et ORLI, notamment pour la logistique lors de la soutenance. Je tiens aussi à remercier l'équipe du projet HINDCON, notamment Maylis UHART, Joseph CANOU, Pierre DIAZ et Vincent MARGIMEL pour les bons moments que nous avons passés à couler le béton. Merci à Octavian CUREA, pour ton aide précieuse et surtout de dernière minute.

Je tiens à remercier tout particulièrement mes collègues doctorants qui m'ont supporté pour certains pendant 3 ans, pour d'autres (les plus chanceux) pendant seulement quelques mois. Merci donc les représentants des contrées bretonnes, basques, bordelaises, de touraines, savoyardes et tunisiennes. J'ai apprécié de passer ces années de thèse à vos côtés, compagnons de galère, autour du café ou des bières, qu'il pleuve (dans le bureau parfois) ou à la plage. Parmi eux, je souhaite remercier Valentine CAZAUBON pour son humour basque, Cindy BECHER pour son écoute (et le débat du proxys), Stélian CAMARA DIT PINTO pour son expertise balistique, Camille VERNEJOUX pour son énergie sans fin et à Laurent TERRENOIR pour avoir écrit ma biographie.

Je remercie finalement Sena, ma femme, de m'avoir accompagné et supporté pendant ces 3 ans de thèse. Merci, car si ça a été dur pour moi parfois, j'ai toujours pu compter sur toi. Merci à Aitor d'avoir illuminé la fin de ces 3 ans de thèse. Je remercie aussi mes parents et ma famille pour leur soutien.

Sommaire

1	Introduction	23
1.1	La fabrication additive	23
1.2	La réalité augmentée tactile	28
1.2.1	La perceptualisation d'informations	28
1.2.2	La tactilisation ou la représentation tactile de données	29
1.2.3	La réalité augmentée : le continuum entre réalité et virtuel	30
1.2.4	La Fabrication Interactive : le continuum entre industrialisation et artisanat	30
1.3	Questions de recherches, organisation du mémoire et contributions	31
2	Vers une Fabrication Interactive industrielle	33
2.1	Un état de l'art sur la Fabrication Interactive	33
2.1.1	Des environnements de conception	34
2.1.2	Un unique espace pour la conception et la fabrication	39
2.1.3	Une mise en œuvre manuelle assistée	43
2.2	Une Chaîne Numérique Interactive	49
2.2.1	La mise en œuvre industrielle actuelle	49
2.2.2	La consolidation de la Chaîne Numérique	56
2.2.3	Une boucle d'interaction au cours de la fabrication	57
2.2.4	La maîtrise du procédé pour une Fabrication Interactive industrielle	60
2.3	Le besoin : une ambiance sensorielle pour le suivi d'un système commandé numériquement en temps réel	61
2.3.1	Une définition d'ambiance pour la fabrication additive	61
2.3.2	La représentation sensorielle des phénomènes physiques	63
2.3.3	Le choix de la modalité tactile	75
3	Conception d'interfaces vibrotactiles	79
3.1	État de l'art sur les interfaces de communication vibrotactile	79
3.1.1	Comment produire des stimuli distinguables les uns des autres?	79
3.1.2	Comment construire un dispositif vibrotactile?	94
3.1.3	Comment encoder l'information par des stimuli vibrotactiles?	96
3.1.4	Synthèse	103
3.2	TacTool, un outil d'assistance pour le design vibrotactile	103
3.2.1	Les recommandations	105
3.2.2	TacTool avec une carte mentale	105
3.2.3	TacTool avec une application web	106
3.2.4	Comment sont étiquetées les recommandations?	107
3.2.5	Comment sont triées les recommandations?	108
3.2.6	Comment utiliser TacTool?	109

3.2.7	Bilan de TacTool	115
4	La fabrication additive augmentée	119
4.1	La création d'un dispositif vibrotactile pour la surveillance des procédés automatisés	119
4.1.1	Une ambiance vibrotactile par présentation variable et répétée d'un message séquentiel évolutif	120
4.1.2	Vibrotactile Monitoring Armband (ViMA)	122
4.1.3	L'implémentation de ViMA	127
4.2	L'évaluation de ViMA	129
4.2.1	Le mode de présentation, les hypothèses et le protocole	129
4.2.2	Le protocole	131
4.2.3	Analyses et résultats	135
4.2.4	Discussion	145
4.3	ViMAAM : ViMA pour la fabrication additive	151
4.3.1	Le suivi des procédés de fabrication par dépôt de matière	151
4.3.2	La création d'un ensemble de symboles pour la fabrication additive	152
4.3.3	Vers une seconde expérimentation	160
4.4	Conclusion et perspectives	165
5	Conclusion	167
A	La liste des recommandations de TacTool	173
B	Formulaire de consentement libre et éclairé	197
C	Évaluation des motifs produits par un bracelet vibrotactile	199
	Bibliographie	203

Table des figures

1.1	Cellule de fabrication de la machine BeAM permettant la fabrication de pièces métalliques par projection de poudre.	25
1.2	Exemple d'une pièce mécanique de démonstration fabriquée sur la plateforme Addimadour.	25
1.3	Vue de la cellule robotisée de fabrication WAAM présente sur la plateforme Addimadour.	26
1.4	Exemple de pièce de taille intermédiaire qui a nécessité plusieurs dizaines d'heures de fabrication ainsi que plusieurs opérations d'usinage pour l'obtention des surfaces finales.	26
1.5	Aperçu de la cellule de fabrication HINDCON avec à droite l'outil d'extrusion de béton, au milieu un exemple de pièce fabriquée et à gauche l'outil d'usinage.	27
1.6	Continuum de Milgram entre réalité et virtualité.	30
2.1	Comparaison entre trois modalités de fabrication : la fabrication manuelle (cas de l'artisanat), la fabrication numérique (cas de la fabrication industrielle) et la Fabrication Interactive (la proposition de Willis <i>et al.</i> [268]).	34
2.2	Classement des pays par le nombre de Fablabs.	35
2.3	Exemple de modélisation à base d'opérations booléennes sur des éléments géométriques (logiciel Fusion 360).	36
2.4	Exemple de modélisation 3D créer manipulation d'un maillage 3D obtenue depuis Blender.	36
2.5	(1)MixFab : Environnement de conception et de modélisation en réalité augmentée. (a-h) Enchaînement d'opérations géométriques basées sur la gestuelle permettant la conception d'une géométrie 3D en fonction du contexte réel. (a) Dessin d'un contour, (b) Extrusion, (c) Plan de coupe, (d,e) Numérisation d'un objet réel et positionnement de sa version numérique, (f) Création d'une poche par retrait du volume du corps principale (g) Orientation d'un second objet numérique avant son retrait du corps principal, (h) Vue de la géométrie finale (Extrait de [264])	37
2.6	Outils SPATA : un pied à coulisse et un rapporteur intelligent (b,c) et leurs homologues analogiques (Extrait de [262]).	37
2.7	Composition 3D Printing : (a,b) 25 stylos pointe-laser spécialisés, (c) Fonctions d'esquisse, de fabrication et de pointage, (d) Aperçu de l'environnement de conception et de fabrication. (Extrait de [156]).	38
2.8	Exemple d'annotations à réaliser directement sur la géométrie proposée par ReForm : (a) Extrusion d'un contour, (b) Perçage et (c) Positionnement et duplication d'un préfabriqué, (d) Annotation d'un contour qui sera usiné (Extrait de [263]).	39

2.9	Patching Physical Object : (a) Apparition d'un défaut de fabrication dû au décalage des couches dans le plan horizontal. (b) Détection du défaut et des couches à retirer en rouge. (c) Pièce corrigée. (d) Cellule de fabrication regroupant une buse d'impression 3D, un outil d'usinage et un scanner 3D. (Extrait de [238])	40
2.10	Rebouclage entre le l'objet réel et le modèle numérique (Extrait de [263]).	41
2.11	Aperçu de la cellule de fabrication mise en œuvre par ReFORM : (a) Vitre en réalité augmentée, (b) Scanner 3D, (c) Outil d'extrusion et d'usinage (Extrait de [263]).	41
2.12	Comparaison du processus de Fabrication Interactive et de celui de Fabrication par Composition (Extrait de [122]).	42
2.13	Processus de mise à jour du programme machine (G-Code) suite à une interaction de l'utilisateur. En rouge : la géométrie déjà fabriquée, en vert clair : la géométrie qui sera fabriquée (Extrait de [122]).	42
2.14	RoMA : un environnement de conception interactive en collaboration avec un robot industriel. Sur le plateau est visible la moitié de l'objet en cours de modélisation par le concepteur (Extrait de [179]).	43
2.15	RoMA : Vue depuis le casque de réalité augmentée des outils de conception numérique. Dans cet environnement de réalité augmentée, l'utilisateur utilise les doigts de sa main libre afin de placer un plan d'esquisse nécessaire à la création des contours du modèle 3D qu'il crée. (Extrait de [179]).	43
2.16	Imprimante 3D contrôlée depuis une fenêtre tactile qui permet une mise en œuvre du procédé couche après couche (Extrait de [268]).	44
2.17	FreeD : un outil de sculpture intégrant un système de correction en temps réel de la position de l'outil en fonction d'une surface virtuelle (Extrait de [279]).	45
2.18	Exemples de réalisation faite à FreeD : (1) Personnalisation de la sculpture par hybridation de plusieurs modèles 3D. (2) Déformation automatique du modèle 3D provoqué par un enlèvement volontairement excessif de matière. (3) Texturation assistée par l'ordinateur de la surface ((a) modèle d'origine, (b) surface finale) (Extrait de [279]).	46
2.19	D-COIL : un outil de conception reposant sur la création d'un artefact de conception (objet imprimé) par la mise en œuvre manuelle d'un outil de fabrication additive. Sur la photo, on trouve un plateau de fabrication, une souris 3D pour sélectionner les opérations géométriques à réaliser, un extrudeur manuel de cire pour matérialiser chaque étape du processus de conception et un outil de coupe permettant de supprimer des éléments de l'objet produit (Extrait de [181]).	47
2.20	(1) Illustration du processus de conception permis par D-Coil. (2) Comparaison du dépôt de matière avec et sans assistance. (3) Exemples d'opérations géométriques pouvant être appliquées à un contour (Extrait de [180]).	48
2.21	Schéma de la Chaîne Numérique pour une mise en œuvre classique de la fabrication, élaboré à partir de [17, 159, 186].	50
2.22	(1) Modèle STL et (2) visualisation du programme outil obtenu avec le « slicer » Simplify3D pour impression 3D plastique.	51
2.23	Modélisation en tranche (ici la couche 0) avec le détail des principaux paramètres pour impression 3D plastique, générée à partir de Simplify3D.	51
2.24	Effondrement de l'empilement des couches sous leur propre masse (Projet H2020 HINDCON).	53

2.25	Comparaison du coût de la fabrication additive et de la fabrication par injection plastique pour une coque de téléphone (Extrait de [121]).	55
2.26	Carte de chaleur représentant en rouge la surface totale de supports nécessaire en fonction de l'orientation de la pièce dans la cellule de fabrication (Extrait de [209]).	57
2.27	Chaîne Numérique Interactive : l'adaptation de la stratégie de fabrication par l'interaction directe de l'opérateur avec le procédé au cours de la fabrication.	58
2.28	Comparaison de l'opérateur de fabrication par enlèvement de matière (gauche) avec l'opérateur de fabrication additive (droite). L'opérateur de fabrication additive est un simple acteur en comparaison de du rôle traditionnel des opérateurs qui ont mis en place une expertise sensorielle permettant de détecter l'apparition d'un dysfonctionnement.	62
3.1	Structure de la peau glabre et velue. (Par Thomas Haslwanter CCBY-SA3.0 [94]).	80
3.2	Les différents axes perceptuels des stimuli vibrotactiles.	82
3.3	Illustration d'un signal vibrotactile variant en intensité (1) ou en fréquence (2).	84
3.4	Modulation d'un signal sinusoïdal de 250 Hz (1) par un signal de modulation de 10 Hz (2).	85
3.5	Un exemple de deux motifs temporels : représentation en code Morse des lettres S et U, en alternant des stimuli courts ou longs.	86
3.6	Une simple illustration du concept de morphe. Le chronogramme au centre (2) est un signal morphe résultat de la concaténation d'un <i>signal rampe</i> (1) et d'un signal <i>signal échelon</i> (3).	87
3.7	Trois différents rythmes (R1, R2 et R3) produits en contrôlant la durée du stimulus ou du temps mort entre deux stimuli.	88
3.8	Comparaison de deux motifs spatiaux sur les doigts d'une main, illustrant la méthode classique de création utilisant une activation simultanée des vibreurs (à gauche) et la méthode OST (à droite).	91
3.9	Illustration des différentes illusions tactiles produites par l'activation synchrone ou asynchrone des vibreurs.	92
3.10	TacTool formalisé sous la forme d'une carte mentale.	106
3.11	Structure de la base de données, générée depuis PhpmyAdmin.	107
3.12	Algorithme permettant la génération des requêtes SQL en fonction des choix de conceptions de l'utilisateur.	109
3.13	La vue d'accueil de TacTool où sont opérés les choix de conception de l'utilisateur.	110
3.14	La vue solution où l'utilisateur retrouve le sous-ensemble de recommandations obtenu après le tri effectué depuis la base de données.	111
3.15	Un retour vibrotactile continu basé sur la variation d'intensité, de rythme ou d'une combinaison des deux permettant d'informer, par exemple, d'un obstacle se rapprochant.	113
3.16	Retour vibrotactile combinant rythme et intensité.	114
3.17	(3 motifs vibratoires basés sur le rythme (gauche) représentant par exemple 3 types d'obstacles. Un retour vibrotactile continu utilisant un motif 2D permettant, par exemple, d'informer l'utilisateur de la proximité d'un obstacle de type représenté par l'item 2 (droite).	114

3.18	Communication continue d'items vibrotactiles 2D permettant, par exemple, d'annoncer les changements de distance de deux obstacles aux positions T_gauche et T_droite, respectivement la main gauche et droite de l'utilisateur.	115
3.19	Communication discrète d'items vibrotactiles 2D permettant, par exemple, d'annoncer les changements de distance de deux obstacles aux positions T1 et T3. Sur T2 aucune information n'est présentée.	115
4.1	Régionalisation de la position des stimuli vibrotactiles autour du poignet de gauche à droite : Dessous, Extérieur, Dessus et Intérieur. La région verte représente le contour de la région pour laquelle les stimuli ont tendance à être identifiés avec la position matérialisée par le point rouge.	124
4.2	Chronogrammes des différents motifs temporels M0 à M5 utilisés par notre dispositif vibrotactile.	127
4.3	Circuit de pilotage des vibreurs, produit sous EasyEDA.	128
4.4	Représentation graphique des 20 items vibrotactiles produits par la combinaison des motifs M1 à M5 et des 4 positions autour du poignet.	129
4.5	Vue d'ensemble du dispositif expérimental.	132
4.6	Prototype du bracelet vibrotactile.	132
4.7	Interface graphique associée à la tâche perceptuelle permettant à l'utilisateur d'essayer les différents motifs en cliquant sur l'un des 5 boutons.	134
4.8	Interface utilisateur pour renseigner l'item vibrotactile identifié : interface d'entraînement servant aussi à l'évaluation n°1 (à gauche), interface pour l'évaluation n°2 (à droite).	135
4.9	Reconnaissance moyenne des 4 positions de l'item X, à gauche quelque soit le motif et à droite pour les 5 motifs par les utilisateurs de ViMA.	137
4.10	Comparaison des causes d'erreurs pour la reconnaissance de l'item X.	139
4.11	Comparaison de la reconnaissance des différentes dimensions du motif, de la position et du motif de l'item X.	139
4.12	Reconnaissance moyenne des 5 motifs pour les différentes positions de l'item X par les utilisateurs de ViMA.	140
4.13	Matrice de confusion pour la reconnaissance des items.	143
4.14	Matrice de confusion pour la reconnaissance de la position.	144
4.15	Matrice de confusion pour la reconnaissance du motif.	144
4.16	Résultats du retour subjectif des utilisateurs recueilli par une NASA-TLX pour chaque dimension composant les items vibrotactiles.	145
4.17	Résultats Total pour chaque dimension de la NASA-TLX.	146
4.18	Progression moyenne des utilisateurs pour l'identification des motifs, des items et de chaque dimension.	147
4.19	Progression moyenne des utilisateurs pour l'identification de chaque motif.	147
4.20	Comparaison du groupe d'utilisateurs musiciens et non-musiciens pour la reconnaissance du motif.	148
4.21	Matrice de confusion pour la reconnaissance des items pour les musiciens.	150
4.22	Matrice de confusion pour la reconnaissance de la position pour les musiciens.	150
4.23	Matrice de confusion pour la reconnaissance du motif pour les musiciens.	150
4.24	Les 4 motifs retenus pour la création des symboles vibrotactiles de ViMAAM.	160
4.25	Description graphique des symboles représentant les différents états de dysfonctionnement des critères.	163

4.26	Description graphique des symboles représentant les différents regroupements de critères.	164
C.1	Prototype du bracelet vibrotactile évalué.	199
C.2	Interface pour l'évaluation perceptuelle des motifs.	200
C.3	Interface utilisée lors de la phase d'entraînement.	201
C.4	Illustration du mode de présentation AXB	201
C.5	Interface utilisée pour la seconde phase de l'évaluation permettant la sélection d'un motif parmi 5.	202

Liste des tableaux

1.1	Comparaison entre un stimulus visuel et un stimulus vibrotactile.	29
2.1	Exemple de techniques de perceptualisation dans l'espace de conception des représentations sensorielles des grandeurs physiques pour la fabrication additive.	64
3.1	Caractéristiques des différents mécanorécepteurs permettant la perception des déformations de la peau.	81
3.2	21 caractéristiques et leurs valeurs servant à décrire les interfaces vibrotactiles.	104
3.3	Scénario 1 : sélection réalisée par l'opérateur depuis l'interface de TacTool.	112
3.4	Scénario 2 et 3 : sélection réalisée par l'opérateur depuis l'interface de TacTool.	112
3.5	Scénario 4 : sélection réalisée par l'opérateur depuis l'interface de TacTool.	115
4.1	Les différentes itérations réalisées pour la définition de l'interface vibrotactile ViMA depuis TacTool.	124
4.2	Tableau récapitulatif des opérations morphiques identifiées par les utilisateurs de manière seule, puis après suggestion.	136
4.3	Taux de reconnaissance (en %) des positions $V\{x\}$ pour chaque motif $M\{x\}$, ainsi que les moyennes respectives (en gras), quelque soit la reconnaissance de l'item X.	137
4.4	Résultats du test de Friedman pour la comparaison de la reconnaissance de la position en fonction des motifs $M\{x\}$	138
4.5	Origines des erreurs pour l'identification de l'item X.	138
4.6	Comparaisons des trois cas de figure impliquant la mauvaise identification de l'item X.	138
4.7	Taux de reconnaissance (en %) des motifs $M\{x\}$ pour chaque position $V\{x\}$, ainsi que les moyennes respectives (en gras), quelque soit la reconnaissance de l'item X.	139
4.8	Résultat du test de Friedman et du <i>Post-Hoc</i> de Conover pour la comparaison de la reconnaissance du rythme, de la durée et de l'intensité.	140
4.9	Taux de reconnaissance moyen (en %) des 5 motifs quelque soit la reconnaissance de l'item X.	140
4.10	Résultats des tests de Friedman pour la comparaison de la reconnaissance du motif en fonction des positions $V\{x\}$	141
4.11	Test de Friedman et <i>Post Hoc</i> de Conover pour la comparaison de l'identification du motif en fonction de la position.	142
4.12	Taux de reconnaissance moyen (en %) des items X, en fonction de la position et du motif, par les utilisateurs de ViMA.	142

4.13	Test de Friedman et <i>Post-Hoc</i> de Conover pour comparer la reconnaissance de l'item X en fonction de la position.	143
4.14	Test de Friedman et <i>Post-Hoc</i> de Conover pour comparer la reconnaissance de l'item X en fonction de la position.	144
4.15	Regroupement des items en 5 groupes de performances, allant de Gp1, les mieux reconnus, à Gp5, les moins bien reconnus.	145
4.16	Test de Friedman sur les différentes dimensions de la NASA-TLX.	146
4.17	Test de Friedman pour la comparaison de la reconnaissance des différentes dimensions par les utilisateurs au cours des 5 phases d'entraînement.	146
4.18	Test de Friedman pour la comparaison de la reconnaissance des différents motifs par les utilisateurs au cours 5 phases d'entraînement.	148
4.19	Évolution du nombre moyen de motifs $M\{?\}$ au cours des entraînements, puis la moyenne au cours de l'évaluation.	148
4.20	Comparaisons inter-groupes des performances utilisateurs (moyenne et écart type) pour la reconnaissance de 40 items au cours de la phase d'évaluation.	149
4.21	Comparaison par le test de Student des musiciens et non-musiciens pour la reconnaissance des items, du motif et de la position.	149
4.22	Tableau des critères de fabrication additive.	153
4.23	Classement des critères de fabrication par les utilisateurs. Entre parenthèses, le nombre d'experts qui ont fait ce choix de classement.	156
4.24	Propositions de 10 symboles vibrotactiles pour la fabrication additive.	159
4.25	8 symboles représentant par des morphes le regroupement des états des critères liés à la hauteur et des deux critères liés à la température.	161
4.26	Proposition de 9 messages de fabrication communs à l'ensemble des utilisateurs (en gras, les critères en situation normale). Pour rappel, l'expression symbolique des états de chaque critère est expliquée p.148.	164

Glossaire

ambiance sensorielle Une ambiance sensorielle est définie comme l'ensemble des stimuli sensoriels participant à la création d'une atmosphère et dont les stimuli les plus saillants mettent en évidence un élément ou un événement. Pour la fabrication additive, ces stimuli sensoriels se dénotent de l'atmosphère habituelle pour alerter et informer l'opérateur sur le déroulement de la fabrication.

amplitude L'amplitude d'une vibration représente le déplacement maximal parcouru par un point d'un corps en vibration.

attribution spatiale L'attribution spatiale est une technique de représentation de l'information qui attribue spécifiquement une information à une ou plusieurs positions.

correspondance intermodale La correspondance intermodale désigne l'association ou influence d'une perception sensorielle par les perceptions provenant d'autres modalités [222].

dimension vibrotactile Une dimension vibrotactile est une propriété des stimuli vibrotactiles pouvant être utilisés pour coder de l'information. L'ensemble de ces dimensions sont regroupées en 3 catégories basées sur la MS Taxonomie [161] : les propriétés directes qui sont intrinsèques aux signaux vibratoires (fréquence, intensité, forme de l'onde), les propriétés temporelles (durée, rythme) et les propriétés spatiales (position).

Fabrication Interactive La Fabrication Interactive est définie comme une extension du concept de manipulation directe, concept associé au domaine de la réalité virtuelle, appliqué aux procédés numériques de fabrication [268].

forme d'onde La forme de l'onde vibratoire désigne la courbe suivie par l'onde au cours du temps. Les vibrations étudiées sont des vibrations harmoniques généralement de forme sinusoïdale, mais pouvant prendre des formes plus complexes selon le principe des Séries de Fourier.

fréquence La fréquence d'une vibration représente le nombre de fois que se répète le mouvement d'oscillation d'une masse en vibration.

glabre Glabre qualifie la peau dénuée de poils par opposition à la peau velue.

intensité réelle L'intensité réelle est la force produite par la vibration qui dépend de son amplitude et de sa fréquence.

intensité ressentie L'intensité ressentie ou perçue est la force du stimulus vibratoire telle que ressentie par l'utilisateur. Une augmentation de l'intensité réelle ne se traduit pas nécessairement par une augmentation de l'intensité ressentie [112].

item Un item sera utilisé pour désigné un item vibrotactile qui est un élément d'un ensemble défini par une position sur le corps et un motif temporel d'une durée finie.

longitudinal Ce dit d'un dispositif qui est orienté dans le prolongement de la région du corps sur laquelle il est monté, c'est-à-dire suivant l'axe de symétrie de cette région du corps (par opposition à radial). Par exemple : dans le prolongement du bras ou le long de la colonne vertébrale.

masquage spatial Le masquage spatial désigne la réduction de l'audibilité d'un stimulus test, en fonction de la proximité spatiale d'un autre stimulus de même nature.

masquage temporel Le masquage temporel désigne la réduction de l'audibilité d'un stimulus test, en fonction de la proximité temporelle d'un autre stimulus de même nature.

métaphore vibrotactile Une métaphore est une technique de représentation qui associe un signal vibratoire à une information. Nesbitt *et al.* [161] parlent de métaphore directe lorsque ce sont les propriétés intrinsèques du signal sensoriel, spatial lorsque qu'il s'agit de l'agencement spatial des signaux sensoriels ou bien temporel lorsque des changements temporels qui sont choisis pour représenter l'information.

morphe Un morphe est un item vibrotactile qui résulte de la combinaison de deux autres items vibrotactiles dont il est perceptuellement différent, mais avec lesquels il partage des propriétés perceptuelles [47].

motif vibrotactile Un motif vibrotactile désigne l'arrangement des stimuli vibrotactiles dans l'espace et dans le temps.

perceptualisation d'informations La perceptualisation d'informations est la représentation d'information par un ensemble de stimuli sensoriels [28].

radial Ce dit d'un dispositif qui est orienté orthogonalement au prolongement de la région du corps sur laquelle il est monté, c'est-à-dire l'axe orthogonal à l'axe de symétrie de cette région du corps. Par exemple : un bracelet ou une ceinture.

rugosité Par analogie avec le toucher d'une surface, la rugosité qualifie la sensation que produit la forme de l'enveloppe d'un signal vibratoire. La rugosité de la vibration dépend alors des variations d'amplitude et de la distance entre ces pics d'amplitude [23].

seuil de discrimination Le seuil de discrimination est la différence minimale entre deux stimuli pour laquelle un individu est capable de les distinguer. Ce seuil s'applique à l'ensemble des dimensions caractérisant ces stimuli.

seuil de détection Le seuil de détection désigne l'amplitude ou l'intensité minimale pour qu'un stimulus soit perceptible.

signal échelon Un signal est produit par une fonction échelon défini sur R tel que
$$x \mapsto \begin{cases} a & \text{si } x \geq 0, \\ 0 & \text{si } x < 0. \end{cases}$$

signal rampe Un signal est produit par une fonction rampe définie sur R tel que pour $x \mapsto \begin{cases} x & \text{si } x \geq 0, \\ 0 & \text{si } x < 0. \end{cases}$

sommation spatiale La sommation spatiale des stimuli vibratoires correspond à un abaissement du seuil de détection de ces stimuli provoqués par la stimulation combinée de plusieurs récepteurs [80].

sommation temporelle La sommation temporelle correspond à une baisse du seuil de détection d'un stimulus provoqué par une durée de stimulation prolongée [80].

sonification La sonification d'information est la représentation d'information par la modalité sonore [241].

stimulus vibrotactile Un stimulus vibrotactile est une impulsion vibratoire utilisée pour provoquer une réaction de la peau. Le nombre de stimuli par item correspond alors au nombre d'impulsions vibratoires composant cet item.

symbole vibrotactile Un symbole vibrotactile est la représentation d'une information par un item vibrotactile.

tactilisation La tactilisation ou haptisation d'information est la représentation d'information par la modalité tactile.

thermoception La thermoception est la perception des variations de température à la surface de la peau [54].

vibration Une vibration est un mouvement d'oscillation mécanique d'une position d'équilibre stable.

Chapitre 1

Introduction

L'Industrie 4.0 est un nouveau schéma organisationnel des moyens d'approvisionnement et de fabrication, humains comme matériel, décrit dans le livre blanc de la recherche publié en 2015 par l'Association Française de Mécanique [3]. L'Industrie 4.0 s'oriente vers un nouveau modèle économique, basé sur la production industrielle en faible volume de produits personnalisés, répondant à la demande de chaque client et avec agilité. Ce modèle se positionne en rupture avec le modèle actuel, qui privilégie la production en grande série de produits standardisés et optimisés afin de réduire les coûts de fabrication et de vente.

Les enjeux de l'Industrie 4.0 sont stratégiques, car il est nécessaire de construire de nouveaux processus industriels permettant de rentabiliser la fabrication de produits personnalisés. Ils sont ensuite durables, car il s'agit de créer des produits qui répondent mieux aux besoins des clients, conçus en intégrant un aspect environnemental. Pour répondre à ces enjeux, l'Industrie 4.0 se construit autour de 9 piliers : la capitalisation des données grâce à l'IOT et au Big Data, la collaboration robotisée permise par la cobotique et les véhicules autonomes, le recours à des interfaces augmentées et virtuelles, et l'hybridation des moyens de production par la fabrication additive. Ainsi, l'Industrie 4.0 est un système cyberphysique jouant le rôle d'interface entre le client et son produit.

Ce travail de thèse se concentre sur le développement de nouveaux environnements de mise en œuvre industrielle des procédés de fabrication, en cohérence avec les principes de l'Industrie 4.0. Plus particulièrement, il participe à la rationalisation économique de la **fabrication additive** nécessaire à la personnalisation des produits, en proposant des systèmes de suivi de production en **réalité augmentée tactile**.

1.1 La fabrication additive

La fabrication additive est une famille de nouveaux procédés de fabrication mise en œuvre par des machines à commande numérique ou des robots. Cette famille de procédés permet la construction d'une géométrie 3D en couches successives par un apport répété de matière et d'énergie, comme peut le définir l'ASTM (American Society of Testing Materials) [5]. La fabrication additive se différencie alors des procédés par enlèvement de matière par le fait que le procédé architecture en même temps le matériau et la géométrie. Les propriétés du matériau obtenu sont alors le résultat de la matière première déposée, des conditions de dépose ainsi que de l'organisation spatiale de la matière qui peut apporter de nouvelles propriétés physiques.

Les procédés de fabrication additive sont définis par la nature du matériau déposé et

par la technologie de dépose employée, c'est-à-dire la forme de l'outil et le type d'énergie apportée pour transformer la matière brute. Il existe ainsi un large panel de procédés possibles de fabrication additive permettant de répondre à un vaste champ d'applications. Les procédés sont tout de même répertoriés en 7 familles ASTM, norme ISO 17296-2 :2015 citée par [14] :

- F1 : les procédés par Extrusion de Matière (FDM, Fused Deposition Modeling) pour lesquels le matériau est déposé de manière sélective le long de la trajectoire par une buse, comme l'impression 3D plastique. À cette catégorie, s'ajoutent les procédés par friction qui rendent malléable le matériau par échauffement mécanique.
- F2 : les procédés par Frittage Laser pour lesquels un laser fait fondre de manière sélective la matière dans d'un lit de poudre.
- F3 : les procédés par stéréolithographie (SLA, Vat photopolymerization), pour lesquels un polymère liquide est durci à la surface d'un substrat par photopolymérisation, principalement par lumière ultraviolette.
- F4 : les procédés par projection de matière (Material Jetting), pour lesquels le matériau sous forme de poudre ou de gouttelettes est projeté de manière sélective.
- F5 : les procédés de fabrication par fusion pour lesquels un apport concentré d'énergie (laser, arc électrique, faisceau d'électrons) fait fondre un matériau provoquant une solidification de la matière le long de la trajectoire de l'outil.
- F6 : les procédés par projection de liant (Binder jetting) pour lesquels un agent de liaison liquide (colle, résine. . .) est projeté pour lier des poudres entre elles.
- F7 : les procédés par laminage sélectif pour lesquels on vient lier entre elles de fines plaques de matériau, principalement métalliques.

La fabrication additive métallique est l'un des axes de recherche et développement principal de la fabrication. À l'ESTIA, cette recherche est menée au sein de la plateforme Addimadour, qui concentre en lieu divers procédés de fabrication additive métallique. Les enjeux pour cette plateforme sont la robotisation et l'industrialisation de ces procédés afin d'accomplir un transfert technologie vers les entreprises. Cet environnement a servi de cadre pour les travaux d'observations et d'expérimentation de ces travaux de thèse. Plus particulièrement, au travers du projet FUI ADDIMAFIL sur la fabrication additive métallique et du projet H2020 HINDCON sur la fabrication additive béton qui a financé une partie de ces travaux de thèse.

Les procédés de fabrication additive métalliques - Pour ces procédés, le dépôt de matière est créé par la fusion d'une poudre ou d'un fil de matière brute par une source de haute énergie comme un laser, un arc électrique ou bien un faisceau d'électrons. Au sein de la plateforme Addimadour, nous trouvons des procédés utilisant des poudres micrométriques comme les procédés SLM (Selective Laser Melting, F2) qui produisent un empilement de couches de matière d'une épaisseur comprise entre 20 et 100 μm ou bien des procédés par projection de matière (F5) telle que le procédé de la machine BeAM (Fig. 1.1 et 1.2). Nous y trouvons aussi des procédés de plus grande taille comme les procédés de dépôt par arc électrique (WAAM, Wire Arc Additive Manufacturing, Fig. 1.3 et Fig. 1.4, F5) ainsi que par fusion laser (LMD, Laser Metal Deposition, F5). Ce dernier procédé est l'objet du projet ADDIMAFIL (Fabrication Additive par robot, dépôt de fil et fusion laser de pièces métalliques de grande taille). Ce projet finance le développement et l'intégration de fonctionnalités innovantes pour la fabrication de pièces métalliques de grande taille par des robots avec utilisation de laser de type industriel (LMD-W). Une particularité de ce projet est qu'il peut apporter rapidement, avec peu de moyens, une

réponse à un besoin des industriels de l'aéronautique pour la réalisation de pièces de grande taille avec un moyen automatisé « low cost » et industriel, en témoignent quelques projets collaboratifs sur ces thèmes. De plus, il vient en continuation d'autres projets collaboratifs dans lesquels certains partenaires d'ADDIMAFIL sont investis.



FIGURE 1.1 – Cellule de fabrication de la machine BeAM permettant la fabrication de pièces métalliques par projection de poudre.



FIGURE 1.2 – Exemple d'une pièce mécanique de démonstration fabriquée sur la plateforme Addimadour.

Ces procédés sont employés pour diverses applications industrielles comme la production de pièces mécaniques pour l'aérospatiale, l'automobile ainsi que la médecine avec la production de prothèses en titane. La gestion de l'énergie apportée au cours de la fabrication est primordiale pour assurer des conditions de fabrication constantes tout le long de la mise en œuvre. De fait, les efforts scientifiques se concentrent sur la modélisation et le contrôle des phénomènes thermiques et géométriques induits sous l'action du procédé. Ces secteurs ont de plus en plus recours à des technologies de mesures permettant l'optimisation locale du procédé en fonction de différents paramètres d'une stratégie de fabrication générée en amont de la fabrication à partir des connaissances tirées des précédents échecs.

Les procédés de fabrication additive béton - La plateforme se diversifie par son implication dans le développement de techniques d'impression pour d'autres matériaux comme le béton. Pour ce type de procédé (F1), l'apport d'énergie est chimique. En effet, la solidification du dépôt de matière pour les procédés additifs béton se fait par une réaction chimique exothermique résultant de l'hydratation d'un mélange de sable et de ciment auquel sont ajoutés des adjuvants pour une prise plus rapide du mélange. Même si l'une des spécificités de ce type de procédé est d'assurer un mélange homogène compatible avec les conditions hygrométriques et de températures extérieures, il partage avec les procédés métalliques des problématiques similaires, liées à la caractérisation des propriétés physiques de la matière principalement mécaniques, mais aussi d'autres propriétés comme l'esthétique.



FIGURE 1.3 – Vue de la cellule robotisée de fabrication WAAM présente sur la plateforme Addimadour.



FIGURE 1.4 – Exemple de pièce de taille intermédiaire qui a nécessité plusieurs dizaines d’heures de fabrication ainsi que plusieurs opérations d’usinage pour l’obtention des surfaces finales.

Le projet HINDCON¹ (Fig. 1.5) a permis de développer un démonstrateur de machine hybride (additif et soustractif) pour l’impression et la finition de pièce 3D en béton. L’objectif de ce démonstrateur était de démontrer l’intérêt des technologies de fabrication additive et soustractive robotisée pour le secteur de la construction en termes d’impact environnemental et de réduction des coûts économiques. Si ce projet a permis d’étudier l’impact de ce type de fabrication et ses avantages/inconvénients par rapport aux méthodes traditionnellement utilisées dans ce secteur, l’ESTIA s’est concentrée sur le développement de 2 éléments clés pour le développement de cette technologie ; le renforcement des structures 3D béton imprimées par l’utilisation de composites, et le développement

1. www.hindcon.com

des logiciels de contrôle optimisé pour l'impression, mais surtout pour des opérations soustractives (correction de surface, gravure, perçage, etc.). Ces opérations soustractives sur des impressions béton, qui avant ce projet HINDCON n'avaient pas fait l'objet de projet de recherche dans le domaine de la fabrication additive béton, sont à corrélérer avec les travaux de fabrication interactive, où la possibilité de correction d'impressions est un prérequis à la mise en place d'une réelle interaction entre l'exécution du procédé et le concepteur.



FIGURE 1.5 – Aperçu de la cellule de fabrication HINDCON avec à droite l'outil d'extrusion de béton, au milieu un exemple de pièce fabriquée et à gauche l'outil d'usinage.

Les avantages et inconvénients de la fabrication additive - La fabrication additive permet d'envisager une économie d'énergie et de matière en comparaison des procédés par enlèvement de matière qui peuvent retirer jusqu'à 90% du volume d'un bloc de matière brute initial pour produire une pièce mécanique de service. La construction d'un volume ex nihilo permet de revoir la conception d'un assemblage mécanique, sous la forme d'une pièce unique, permettant d'envisager un gain de performances et une baisse du coût de maintenance. Le dépôt de matière permet aussi de faire l'ingénierie du matériau lui-même, pour envisager la production de formes géométriques intégrant des propriétés physiques, impossibles à produire, auparavant. La fabrication additive permet, par exemple, d'atteindre de meilleures performances masse/résistance mécaniques de structures métalliques, d'augmenter les performances thermiques d'un mur en béton.

Aujourd'hui, l'industrialisation de ces procédés est retardée par leur complexité de mise en œuvre, engendrant des défauts de fabrication. La mise en œuvre est assurée par un processus informatisé, appelé Chaîne Numérique, hérité de la mise en œuvre des procédés par enlèvement de matière. La Chaîne Numérique calcule en amont de la fabrication, une trajectoire outils permettant la production de manière répétable d'une géométrie à partir d'un bloc de matière existant. Cependant, pour une telle mise en œuvre, il est nécessaire de prédire les phénomènes résultant de l'interaction du procédé avec la matière. Or, pour la fabrication additive, les phénomènes physiques induits qu'il faut contrôler pour chaque pièce, sont particulièrement complexes. À la difficulté de produire un tel modèle, s'ajoute une multitude de paramètres liés aux procédés, à la matière et aux conditions de fabrication dont la combinaison influe fortement sur la qualité de fabrication. L'apparition de

variations imprévisibles de ces paramètres se traduit par l'apparition de défauts de fabrication, qui augmentent le risque de rebut et imposent différentes étapes de post-traitement. Ces étapes sont nécessaires pour obtenir un produit fini ayant les caractéristiques attendues. Cette mise en œuvre va à l'encontre de l'Industrie 4.0, qui souhaite proposer un produit personnalisé ayant une empreinte écologique faible tout en maintenant un profit. Il est donc nécessaire de proposer une alternative à une automatisation complète de ces procédés, pour contrôler et réagir en temps réel à des aléas de fabrication.

Ces observations nous emmènent à reconsidérer la place des acteurs de la mise en œuvre de ces procédés de fabrication, en apportant des technologies liées à deux domaines de l'Interaction Humain-Machine : la Fabrication Interactive et l'augmentation tactile d'information. Le but est de proposer des situations de fabrication industrielle interactive. Ainsi, dans cette problématique, nous proposons une recherche originale qui a pour but d'aider l'opérateur à réagir à des aléas de fabrication, en intégrant des outils de réalité augmentée dans la scène de fabrication d'un produit personnalisé. Alors que la littérature illustre plusieurs concepts de l'association de la réalité augmentée à des situations de fabrication interactive ou personnelle, nous estimons que dans une situation de fabrication industrielle, la problématique se situe plus au niveau de la perception du procédé en temps réel et non au niveau de la manipulation interactive de la cellule élémentaire de fabrication.

1.2 La réalité augmentée tactile

Le terme d'Interaction Humain-Machine est apparu pour la première fois dans le milieu des années 1970 [29]. L'interaction désigne, aujourd'hui, une discipline à l'intersection des sciences informatiques, de la cognition et du facteur humain dont la mission est la conception, la réalisation et l'évaluation des systèmes interactifs à l'usage de l'homme et l'étude des phénomènes qui les entourent [97]. L'interaction Humain-Machine s'intéresse donc à la frontière entre l'utilisateur et le système, matérialisée par l'ensemble des ressources matérielles et logicielles nécessaires à l'interaction. L'Interface Utilisateur [132] constitue l'intermédiaire de communication entre l'utilisateur et le système via des entrées permettant de manipuler le système et de sorties permettant de retourner le résultat de la manipulation. La communication du système vers l'utilisateur passe par les sens de celui-ci.

1.2.1 La perceptualisation d'informations

Chaque canal sensoriel possède ses propres récepteurs spécialisés qui répondent à des stimuli sensoriels précis, permettant la création d'interfaces multi-sensorielles où chaque modalité est plus ou moins adaptée en fonction de la nature des données et du contexte de présentation. Ainsi, la vue permet par exemple une bonne interprétation des relations spatiales alors que l'ouïe est bien adaptée pour la perception de données temporelles [73]. La combinaison de ces modalités de représentation est décrite par un domaine plus large appelé *perceptualisation d'informations* [28], pour laquelle Nesbitt *et al.* [161] proposent une taxonomie créant un parallèle entre chaque modalité. Au-delà, de permettre la comparaison de ces différentes modalités, la perceptualisation d'informations s'intéresse à la combinaison de ces modalités pour proposer des interfaces plus fidèles comparées à notre perception de l'environnement. La perceptualisation a alors pour objectif de faciliter la communication, la cognition et la prise de décision.

La vue est aujourd’hui le sens privilégié pour la représentation d’informations, en particulier de données abstraites scientifiques. Ces concepts ont donné lieu à la création d’un domaine scientifique appelé *Visualisation d’Informations* [27]. D’autres formes de représentations de l’information se sont cependant développées pour remplacer les techniques de visualisation lorsque la vue de l’utilisateur est limitée, donnant naissance à deux nouvelles interfaces. Ces représentations sont la *sonification* [241] qui regroupe des techniques de présentation de l’information par le son et l’*haptisation* ou *tactilisation* [184] en utilisant le toucher.

1.2.2 La tactilisation ou la représentation tactile de données

Dans le contexte de fabrication, la vue et l’ouïe sont des sens, déjà très mobilisés chez les opérateurs. Nous nous sommes donc intéressés à la *Tactilisation de l’Information* pour explorer le potentiel sensoriel du toucher en complément des deux autres. Le terme haptique fait référence à ce qui est relatif au sens du toucher. Il est distingué deux types de sensations haptiques : les sensations tactiles et celles kinesthésiques [167]. Les sensations tactiles sont aussi appelées perceptions cutanées et surviennent lorsque la peau est en contact avec un objet. Les perceptions cutanées comprennent des sensations mécaniques, thermiques et la douleur. Les sensations kinesthésiques sont associées à la perception des efforts et à la proprioception des différentes parties du corps.

Nous nous intéressons, dans cette thèse, à la perception passive. Les interfaces humain-machine communiquant via des stimuli tactiles sont appelées des interfaces de communication tactile². Chouvardas *et al.* [45] recensent un large panel d’interfaces qui peuvent être catégorisées en fonction de la nature des stimuli délivrés : mécanique (pression, vibration, frottement), thermique ou bien même électrique.

Visualisation	Tactilisation
Position dans l’image	Position sur la peau
Durée d’affichage	Durée de présentation
Teinte ou couleur	Fréquences (différentes sensations)
Brillance ou clarté	Intensité vibratoire
Fréquence d’affichage	Rythme

TABLE 1.1: Comparaison entre un stimulus visuel et un stimulus vibrotactile.

Pour les stimuli vibrotactiles qui sont au centre de cette thèse, il est possible de proposer un parallèle simple entre représentation graphique et représentation vibrotactile, car ces deux modalités permettent une représentation spatiale et temporelle de l’information. Gupta *et al.* [87] en étendant les concepts d’interaction avec les interfaces graphiques, aux interfaces vibrotactiles et en créant le concept de pixel vibrotactile. Ce concept de pixel permet de faire un parallèle entre les propriétés des stimuli vibrotactiles et des stimuli lumineux. Ces deux types de stimulus partagent des propriétés spatiales, et des propriétés temporelles. Ce parallèle nous permet d’envisager la conception des interfaces vibrotactiles comme celle d’interface graphique de plus faibles résolutions.

2. Tactile Display

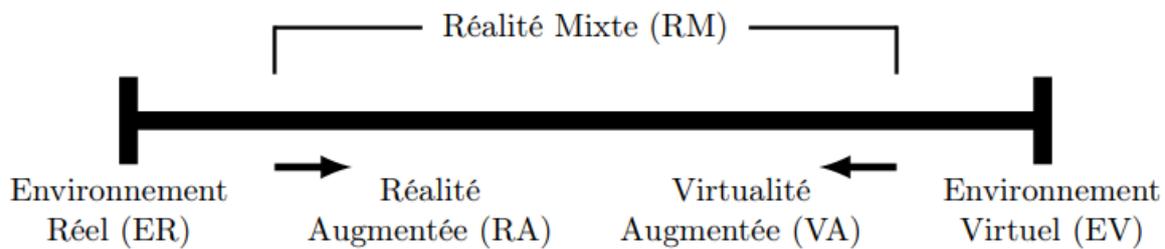


FIGURE 1.6 – Continuum de Milgram entre réalité et virtualité.

1.2.3 La réalité augmentée : le continuum entre réalité et virtuel

L'évolution des interfaces entre utilisateur et système s'oriente vers un effacement progressif de la frontière entre les données contenues dans l'environnement virtuel (celui du système) et l'environnement réel (celui de l'utilisateur). Cet effacement se matérialise par le concept de *Réalité Mixte (RM)* qui permet de créer un continuum de réalité-virtualité. En 1995, les applications de réalité mixte sont décrites par Milgram (Fig. 1.6, [149]), appartenant à des applications de *Réalité Augmentée (RA)* si le contenu de l'environnement réel est enrichi par des objets de l'environnement numérique ou bien, appartenant à des applications de *Virtualité Augmentée (VA)* si le contenu de l'environnement virtuel est enrichi par des objets de l'environnement réel.

Telle que définie par R.T. Azuma [7], la réalité augmentée est définie comme une interface visuelle permettant l'intégration 3D et en temps réel d'objets virtuels à l'environnement réel. De notre point de vue, cette augmentation ne doit pas se limiter seulement à des intégrations visuelles, mais aussi intégrer d'autres modalités. C'est pourquoi nous préférons retenir la définition proposée par S. Bottecchia [19] qui autorise d'autres modalités. En effet, elle est la « combinaison de l'espace physique avec l'espace numérique dans un contexte sémantiquement lié ». La tactilisation d'informations est donc un moyen d'augmenter l'environnement réel en intégrant d'informations virtuelles. En effet, le contexte de fabrication industrielle impose de comparer les propriétés d'un objet réel avec les propriétés du modèle numérique associé permettant d'en contrôler la bonne fabrication.

1.2.4 La Fabrication Interactive : le continuum entre industrialisation et artisanat

Depuis 2011, la Fabrication Interactive [268] s'est développée autour des procédés numériques de fabrication, comme un nouveau domaine d'application des concepts de manipulation directe. Ce concept de fabrication interactive a pour objectif de faciliter le processus de conception en permettant le prototypage de différents objets avant leur fabrication. Le métissage entre conception et fabrication qu'elle offre permet d'imaginer un continuum de fabrication entre le réel et le virtuel à l'image de celui de Milgram. La fabrication Interactive permet d'envisager une interaction aussi bien avec un objet réel pour en modifier son modèle numérique ou bien d'interagir avec le modèle numérique pour en modifier sa réalisation. Ce continuum est assuré d'une part par l'augmentation visuelle de la scène de fabrication, mais aussi par l'utilisation combinée de procédés de fabrication additive et soustractive. L'application des principes de la Fabrication Interactive pourrait

alors aboutir à une forme d'artisanat hybride industrielle permettant une action humaine lors de la mise en œuvre industrielle des procédés automatisés de fabrication.

1.3 Questions de recherches, organisation du mémoire et contributions

Cette thèse s'intéresse à l'augmentation tactile d'un environnement de Fabrication Interactive et plus particulièrement à l'utilisation de la tactilisation d'informations au travers de la communication vibrotactile d'informations.

Nous répondons à la question suivante :

« Comment permettre une interaction humaine avec les procédés de fabrication additive pour répondre à l'apparition d'un aléa ? »

La recherche bibliographique que nous présentons dans le premier chapitre dresse un état des travaux présentant différentes techniques d'interaction avec un large panel de procédé de fabrication. Ce sont des solutions innovatrices pour interagir avec la géométrie en cours de fabrication afin de faciliter le processus de conception, mais pas celui de la fabrication. Nous avons donc, à partir de la modélisation de la mise en œuvre industrielle de la fabrication additive, proposé une boucle d'interaction humaine permettant la mise en place d'un cadre de Fabrication Interactive au cours de la fabrication. Nous montrons qu'il s'agit en réalité de supporter le processus de fabrication et non celui de conception. Cette différence se traduit par la nécessité de pouvoir qualifier l'objet fabriqué. La problématique initiale devient alors :

« Comment faire percevoir à un utilisateur un ensemble d'informations liées aux phénomènes physiques produits par le procédé lors de sa mise en œuvre ? »

Nous répondons à cette question par la proposition d'une ambiance sensorielle vibrotactile permettant d'alerter en temps réel et en mobilité l'utilisateur sur la dérive du procédé de fabrication au cours de la mise en œuvre.

Dans un deuxième chapitre, nous introduisons TacTool, un outil d'aide à la conception d'interfaces de communication vibrotactile. Cet outil nous permet d'aborder différentes questions relatives à l'expression de l'information et de la construction de ce type de dispositif. C'est pourquoi nous détaillons au travers d'un état de l'art les différentes dimensions pouvant être utilisées pour produire des stimuli vibrotactiles distinguables. Nous discutons ensuite de la forme que peuvent prendre ces interfaces. Finalement, nous expliquons comment l'information peut être représentée et comment il est possible de quantifier le potentiel de communication de ces interfaces. Cet état de l'art conduit à la proposition de 21 critères, utilisés pour classer 181 recommandations permettant la conception d'interfaces de communication vibrotactile. Ce chapitre se conclut sur le processus de création et d'implémentation de l'outil TacTool et sur les éventuelles suites pouvant être données à cet outil.

Dans un troisième chapitre, nous proposons à partir de la définition d'une ambiance sonore d'en définir une interprétation vibrotactile capable de supporter la surveillance d'un système robotisé. Cette ambiance se caractérise alors par la mise en exergue du passage d'une situation établie sereine vers différentes situations de dysfonctionnement possibles, dont elle doit caractériser la nature. L'interprétation de cette ambiance tactile donne naissance à un dispositif vibrotactile appelé ViMA, pour Vibrotactile Monitoring Armband. Ce dispositif permet théoriquement la production de 20 items spatio-temporels qui ont fait l'objet d'une étude perceptuelle menée auprès de 21 utilisateurs. Cette étude a

par la suite mené à la proposition d'un langage pour la fabrication additive reposant sur un dispositif appelé ViMAAM, qui compte un total de 18 symboles vibrotactiles répartis sur les deux poignets de l'utilisateur. Ces symboles sont le résultat d'un compromis fait entre l'évaluation perceptuelle de ViMA et d'une enquête menée afin de trouver une métaphore spatiale de l'information qui fasse consensus au sein des utilisateurs de la fabrication additive.

En résumé, nos contributions sont les suivantes :

- La schématisation de la Chaîne Numérique à partir de la littérature pour le procédé de fabrication additive; son adaptation sous la forme d'une Chaîne Numérique Interactive en y intégrant une boucle d'interaction humain-robot intervenant sur trois étapes du procédé et permettant de réagir à l'apparition d'un aléa au cours de la fabrication.
- TacTool, un outil d'aide à la conception de dispositifs de communication vibrotactiles, sous la forme d'une application web permettant l'exploration de 181 recommandations et leur filtrage en fonction de 21 caractéristiques de conception.
- La création d'un ensemble de 20 items vibrotactiles, d'un bracelet permettant de les produire (appelé ViMA), et d'une étude sur la capacité de ces items à être reconnus par 21 utilisateurs, conduisant à leur classement selon 5 niveaux de performance lors d'une présentation séquentielle.
- Une interface spécifique pour la fabrication additive, appelée ViMAAM (Vibrotactile Monitoring Armband for Additive Manufacturing), constituée de deux bracelets ViMA et d'un ensemble de 18 symboles vibrotactiles (item + information véhiculée). ViMAAM est conçue pour fournir en temps réel et en mobilité à un opérateur le comportement physique de 5 critères de fabrication additive. Ainsi, l'opérateur est informé en continu sur le déroulement correct du processus de fabrication ou si l'un ou plusieurs des critères dysfonctionnent.

Chapitre 2

Vers une Fabrication Interactive industrielle

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la problématique de la mise en œuvre des procédés de fabrication additive durant la phase de réalisation de produits finis personnalisés, dans un contexte industriel. Pour ce faire, nous commençons par la présentation des travaux liés à la Fabrication Interactive, un domaine de l'IHM dans lequel sont traités, avec une vision informatique, les problèmes liés à la mise en œuvre des procédés à commande numérique. Nous poursuivons par la présentation de la « Chaîne Numérique », c'est-à-dire le processus numérique conduisant au pilotage de la machine à commande numérique, dont nous discuterons les limites vis-à-vis de la Fabrication Interactive. Par la suite, nous proposons des évolutions de la mise en œuvre de la fabrication additive permettant de répondre à l'apparition d'un aléa au cours de la fabrication. Nous concluons par le constat que l'interaction avec les procédés de fabrication additive nécessite de contrôler la transformation du matériau fabriqué, grâce à la production d'indices sensoriels liés aux phénomènes physiques induits par le procédé.

2.1 Un état de l'art sur la Fabrication Interactive

La Fabrication Interactive¹ (Fig. 2.1, en bas) est définie comme une extension du concept de manipulation directe, concept associé au domaine de la réalité virtuelle, appliqué aux procédés numériques de fabrication [268]. Ce concept apporte une interaction assistée par ordinateur avec les procédés de fabrication en permettant une action d'édition, physique ou numérique, sur la pièce en cours de fabrication. Cette assistance informatique se caractérise par la capacité à assurer la continuité entre le réel et le virtuel, c'est-à-dire entre ce qui est déjà fabriqué et ce qui doit encore l'être. La Fabrication Interactive apporte alors un contexte permettant une fabrication interactive, rapide et intuitive.

La Fabrication Interactive est un sous-domaine de la fabrication personnelle², un domaine qui rassemble les utilisateurs ayant pour projet la conception et la fabrication de différents systèmes mécaniques et électroniques pour un usage privé. Cette activité s'est particulièrement démocratisée cette dernière décennie avec la baisse du coût des différentes machines à commande numérique³, jusque-là réservées à un usage industriel. En effet, cette baisse a permis de faire bénéficier au plus grand nombre de divers moyens de

1. en anglais « Interactive Fabrication »

2. en anglais « Personal Fabrication »

3. en anglais « Digital Fabrication »

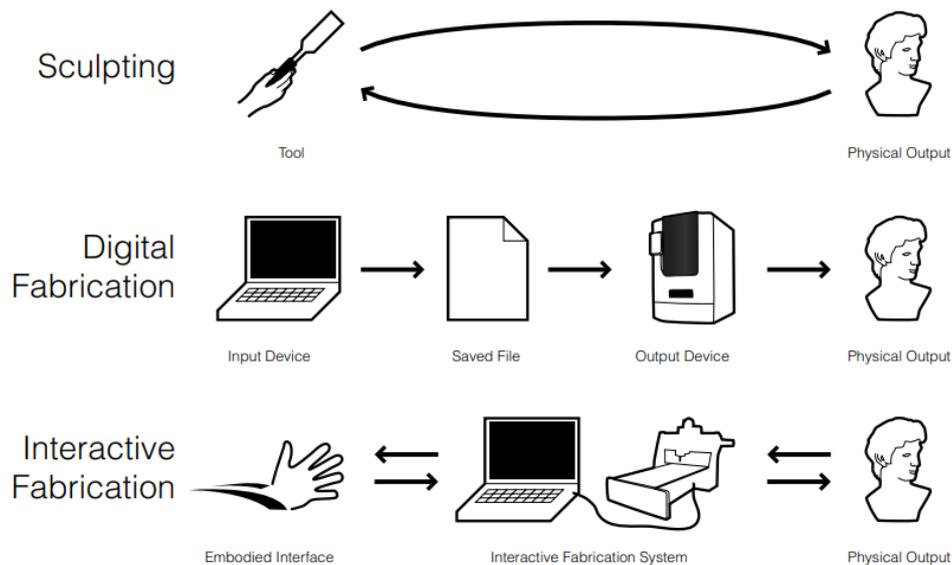


FIGURE 2.1 – Comparaison entre trois modalités de fabrication : la fabrication manuelle (cas de l’artisanat), la fabrication numérique (cas de la fabrication industrielle) et la Fabrication Interactive (la proposition de Willis *et al.* [268]).

prototypage, qui se traduit aussi par l’explosion des « Fablabs » (Fig. 2.2). Ces lieux sont des centres de compétences et de créativité, équipés aujourd’hui de différents moyens de production : imprimantes 3D, machines d’usinages ou de formages ou bien de machines pour la production de cartes électroniques.

Bien que ces équipements séduisent aujourd’hui le grand public, ils sont encore techniquement difficiles d’accès, car ils nécessitent la maîtrise de logiciels et de savoir-faire techniques industriels qui sont par ailleurs encore au centre des problématiques de l’industrie. Cependant, avec le concept de Fabrication Interactive, les chercheurs en Interaction Humain-Machine proposent de simplifier la mise en œuvre de ces procédés en brisant la monotonie impliquée par l’automatisation du processus via la Chaîne Numérique, et cela en autorisant l’utilisateur à interagir avec ceux-ci.

2.1.1 Des environnements de conception

L’interaction avec les procédés de fabrication a été permise par une évolution des outils de conception. Cette conception repose sur une tâche de modélisation 3D. Cette tâche qui est actuellement principalement numérique doit tenir compte du monde réel pour être intégrée au processus de fabrication. La transformation de cette tâche de modélisation est explorée dans le cadre de la Fabrication Personnelle où elle constitue l’obstacle principal pour l’utilisation des procédés à commande numérique [106, 264].

En effet, la tâche de modélisation est d’abord un processus mental qui nécessite, pour l’utilisateur, de se créer une représentation mentale de ce qu’il veut modéliser (l’intention de conception) et d’en identifier les étapes de construction (le pouvoir d’expression) [106]. Il s’agit ensuite de produire numériquement cette image mentale. Pour cela, l’utilisateur doit se former aux spécificités de l’une des deux catégories d’outils de modélisation 3D. La première catégorie d’outils, dits de Conception Assisté Par Ordinateur, est dédiée à la conception industrielle, comme Fusion 360, CATIA, SolidWork ou FreeCAD (Fig. 2.3). Ils sont basés sur deux concepts fondamentaux introduits dans les années 1960 : la

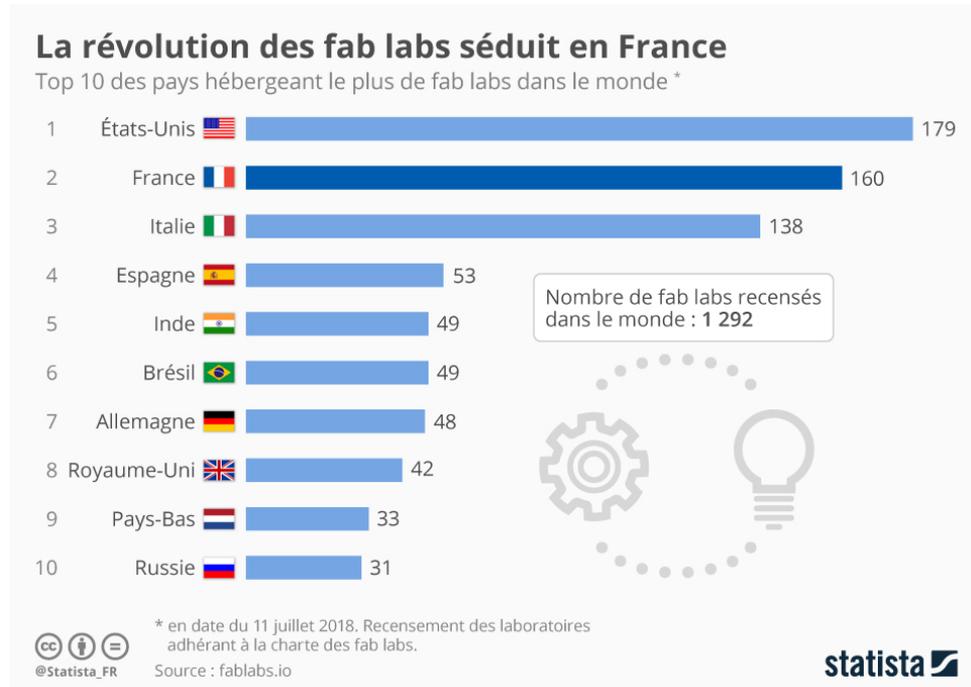


FIGURE 2.2 – Classement des pays par le nombre de Fablabs.

modélisation par arbre CSG, soit la construction d'une géométrie complexe par opérations booléennes d'entités canoniques et la modélisation B-Rep (Boundary Representation), soit la représentation d'une géométrie complexe par les surfaces de la peau de l'objet. Par ailleurs, des outils différents ont été développés pour la sculpture numérique, comme Sculptris ou Blender (Fig. 2.4). Ces outils proposent un processus de conception artistique où la tâche de modélisation consiste à créer un maillage 3D. Il est ainsi possible d'ajouter ou retirer des mailles, et d'interagir avec ses nœuds pour en façonner la surface.

Analysons par exemple deux logiciels. FUSION 360 et Sculptris sont des logiciels développés pour un usage professionnel sur des plateformes qui offrent un contexte d'interaction limité et peu ergonomique, exigeant un certain niveau d'expertise pour les utilisateurs [106, 264, 268]. D'une part, la modélisation se fait sur des écrans 2D au travers desquels les tâches de sélection et de positionnement d'objets 3D sont perçues comme plus difficiles [264]. D'autre part, le recours à des périphériques génériques (souris, claviers) et à l'utilisation d'interfaces de type WIMP⁴ rendent les métaphores d'interaction abstraites. De plus, ces périphériques renforcent l'écart entre l'environnement de conception 3D et le monde réel, alors que le processus de conception amène fréquemment à ajuster les dimensions d'un modèle 3D par rapport à des objets du monde réel. Cette rupture mise en évidence ici peut être une source d'erreurs, mais peut aussi ralentir le processus de conception [262].

Durant la dernière décennie, la réalité augmentée s'est imposée comme un environnement de travail pertinent pour accueillir la tâche de modélisation, comme illustré par de nombreuses applications : MixFAB [264], ReFORM [263], MiragePrinter [272], WireDraw 3D [275] ou encore RoMA [179]. Pour ces applications, la réalité augmentée permet une conception à taille réelle d'objets 3D tout en assurant une conception ancrée dans le monde réel. MixFAB (Fig. 2.5) propose, en particulier, d'intégrer une interaction naturelle basée sur la gestuelle, permettant de mêler au processus de conception des objets réels pour

4. Windows, Icons, Menu, Pointer.

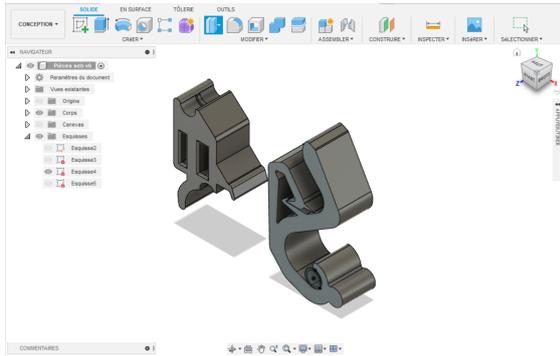


FIGURE 2.3 – Exemple de modélisation à base d’opérations booléennes sur des éléments géométriques (logiciel Fusion 360).

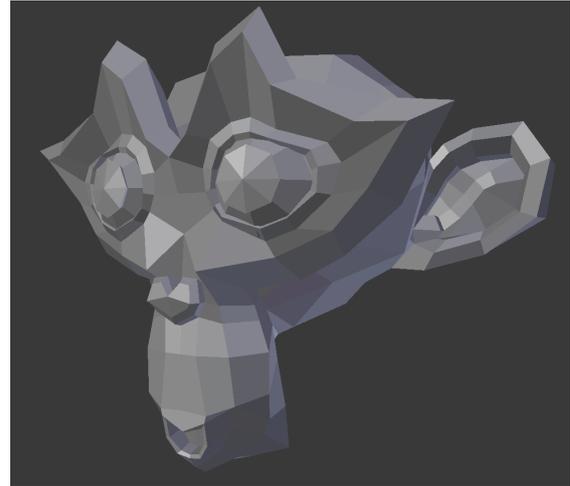


FIGURE 2.4 – Exemple de modélisation 3D créer manipulation d’un maillage 3D obtenue depuis Blender.

faciliter la comparaison entre réel et virtuel. Leur environnement de conception repose sur une vitre augmentée qui permet de créer un petit environnement de conception 3D. Les gestes proposés permettent la manipulation des modèles 3D ainsi que la réalisation d’opérations géométriques basiques comme l’extrusion ou la section par un plan. De plus, cette gestuelle favorise l’introduction d’objets réels dans l’environnement de conception, préalablement numérisés. Ce cadre permet alors de réaliser deux opérations de conception habituellement complexes. Il s’agit soit de concevoir un objet autour d’une forme réelle (exemple : fabrication d’un porte-gobelet) ; soit il s’agit d’intégrer une forme fonctionnelle existante sur un nouvel objet (exemple : ajouter une fixation de caméra-sport à un support de gobelet). L’étude a cependant révélé que seuls les utilisateurs novices ont trouvé l’utilisation de la gestuelle intuitive et familière. Les utilisateurs expérimentés, quant à eux, disent préférer les méthodes d’interactions habituelles, trouvant que la sensibilité des interactions et l’imprécision de la capture des gestes sont la source de frustration et compliquent le processus de conception. L’interaction gestuelle doit en priorité être utilisée pour faciliter la manipulation des objets dans l’environnement 3D, afin d’augmenter l’immersion des utilisateurs, mais elle reste contre-indiquée pour la création des géométries ou supports, sauf si la précision des gestes augmente.

Ces nouvelles méthodes de conception se caractérisent aussi par l’utilisation de nouveaux périphériques d’interaction dédiés. Certains périphériques permettent d’intégrer des tâches normalement réalisées dans le monde réel directement dans l’environnement de conception virtuel. C’est le cas par exemple de SPATA (Fig. 2.6) [262], un ensemble de deux outils de mesure intelligents, comme le pied à coulisse et le rapporteur, utilisés pour mesurer des distances et des angles. Ces deux outils permettent de réaliser rapidement, et sans autres périphériques d’entrée, la spécification des cotes d’un modèle numérique en les mesurant directement à partir d’objet réel. Ce type d’outil accélère le processus de conception et réduit le risque de commettre une erreur en reportant les mesures.

De surcroît, l’utilisation de périphériques d’interaction ne se limite pas qu’à la compa-

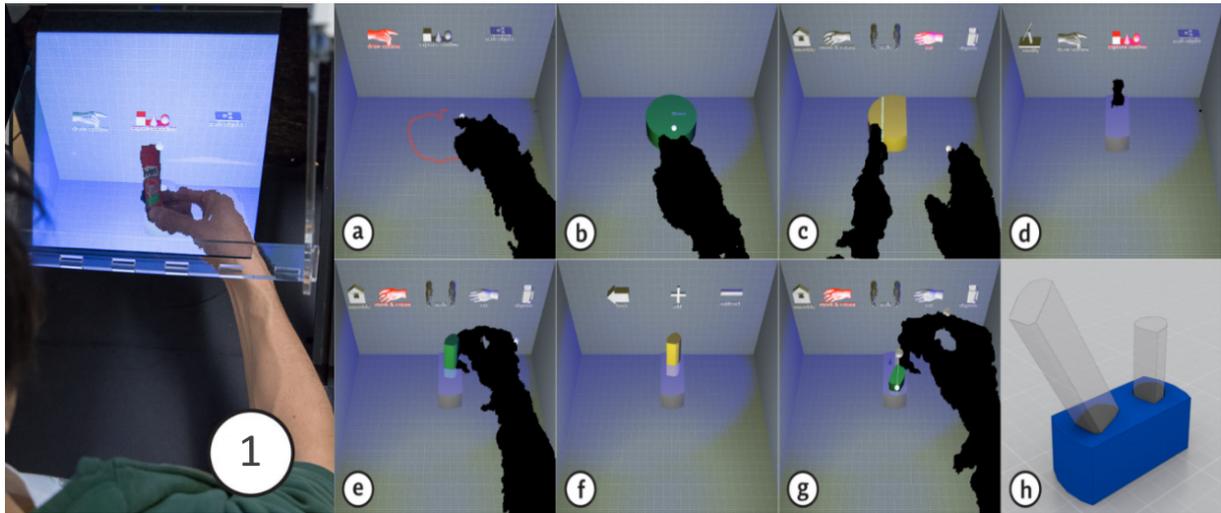


FIGURE 2.5 – (1) MixFab : Environnement de conception et de modélisation en réalité augmentée. (a-h) Enchaînement d'opérations géométriques basées sur la gestuelle permettant la conception d'une géométrie 3D en fonction du contexte réel. (a) Dessin d'un contour, (b) Extrusion, (c) Plan de coupe, (d,e) Numérisation d'un objet réel et positionnement de sa version numérique, (f) Création d'une poche par retrait du volume du corps principale (g) Orientation d'un second objet numérique avant son retrait du corps principal, (h) Vue de la géométrie finale (Extrait de [264])

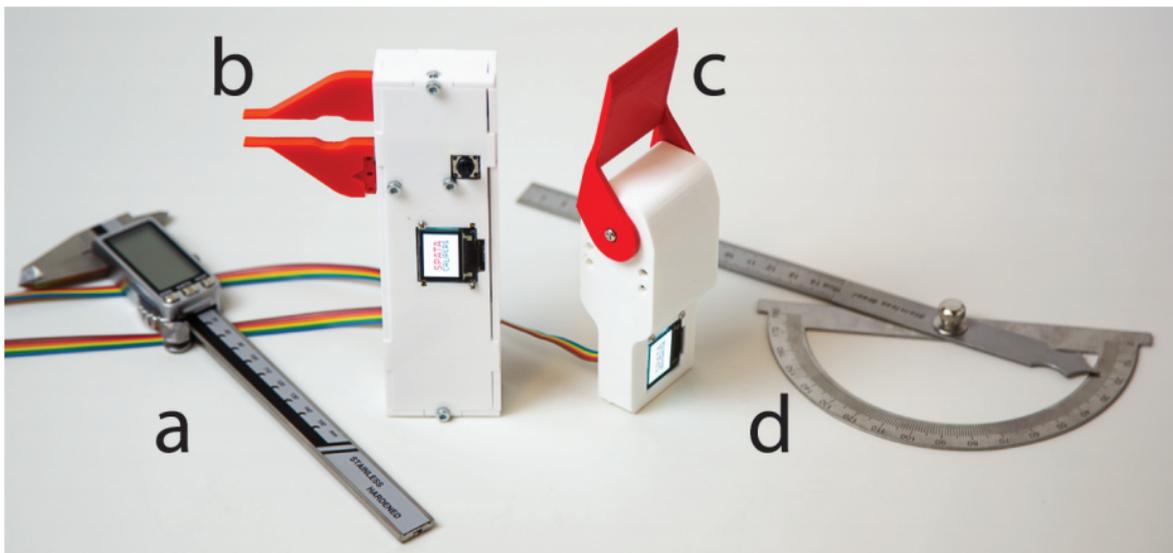


FIGURE 2.6 – Outils SPATA : un pied à coulisse et un rapporteur intelligent (b,c) et leurs homologues analogiques (Extrait de [262]).

raison du réel avec le virtuel, mais permet aussi d'associer des opérations de conception à des objets du monde réel. Ces associations ont pour but de rendre le processus de conception plus naturel pour l'utilisateur. L'utilisation de périphériques ayant la forme d'outils réels peut par exemple apporter de l'affordance, facilitant l'appropriation par l'utilisateur des outils de conception numérique. Autre exemple, ToolDevice [4] crée un lien entre l'activité de conception et celle de fabrication en recyclant des outils de bricolage pour incarner diverses fonctions. L'utilisateur peut ainsi, à partir d'un environnement en réalité virtuelle, utiliser des pinces pour positionner et orienter des objets 3D, les couper grâce à un couteau ou encore les assembler avec un marteau. Ce type d'associations permet aussi de ramener certaines tâches de conception normalement réalisées en virtuel dans le monde réel. Dans Interactive Construct (Fig. 2.7) [156], l'utilisation de plusieurs stylos pointe-laser permet de réaliser la conception directement des formes produites par une machine de découpe laser sur les plaques de matière première. L'interaction se fait directement sur la vitre et chaque stylo intègre une fonction géométrique permettant la création des esquisses (gravées à la surface des plaques par la machine de découpe laser), et de déclencher les différentes opérations de fabrication. Dans le cas de ReFORM, un système d'annotation au feutre permet le positionnement du modèle numérique 3D directement sur l'objet physique (Fig. 2.8). Pour le concept de Compositional 3D Printing [122], l'utilisateur peut directement extruder un contour en le dessinant sur le plateau d'une imprimante 3D.



FIGURE 2.7 – Composition 3D Printing : (a,b) 25 stylos pointe-laser spécialisés, (c) Fonctions d'esquisse, de fabrication et de pointage, (d) Aperçu de l'environnement de conception et de fabrication. (Extrait de [156]).

Finalement, il est aussi possible pour des objets physiques d'incarner des données numériques. Ils deviennent ainsi des périphériques tangibles servant de média lors de la création du modèle 3D. Ce type de périphériques peut être bénéfique pour l'utilisateur lorsqu'il lui est difficile de créer ou reproduire une géométrie par des outils conventionnels. Par exemple, LineFORM [157] permet la manipulation de courbes grâce à une multitude de petits interacteurs physiques connectés les uns aux autres pour former une chaîne rigide. Par déformation de cet ensemble d'interacteurs, il peut être imaginé diverses applications en conception, comme la déformation des courbes paramétriques constituant un

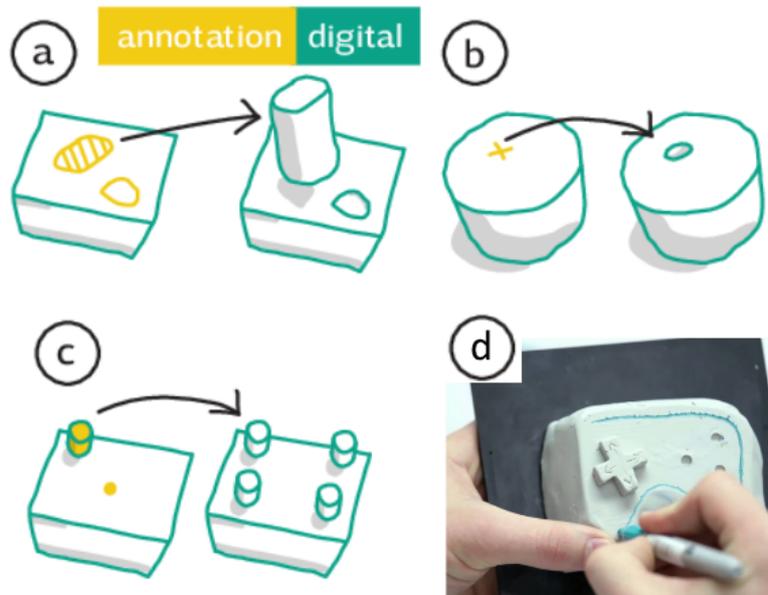


FIGURE 2.8 – Exemple d’annotations à réaliser directement sur la géométrie proposée par ReForm : (a) Extrusion d’un contour, (b) Perçage et (c) Positionnement et duplication d’un préfabriqué, (d) Annotation d’un contour qui sera usiné (Extrait de [263]).

modèle surfacique. Partageant aussi l’idée d’un média déformable, Shen *et al.* [215] proposent l’utilisation d’une éponge pour incarner un bloc d’argile virtuel. L’utilisateur peut alors associer une partie ou l’intégralité de ce bloc à cette éponge et la déformer comme pour la transformer en une sculpture. L’éponge permet ici d’augmenter le réalisme de l’environnement de conception en approchant l’expérience virtuelle de l’expérience réelle vécue avec la manipulation d’un bloc d’argile réel.

2.1.2 Un unique espace pour la conception et la fabrication

Par ce rapprochement du processus de conception et de fabrication, la Fabrication Interactive permet l’intégration du processus de conception directement dans la scène de fabrication [122, 156, 179, 263]. Cette intégration est bénéfique en comparaison avec la mise en œuvre industrielle pour laquelle la tâche de conception se fait en dehors de la scène de fabrication. Elle permet en effet la création de nouveaux processus de fabrication au sein desquels le concepteur a la possibilité de reboucler sur la géométrie fabriquée, en intégrant les spécificités de chaque procédé utilisé.

Pour permettre ce rebouclage, il est nécessaire d’assurer une continuité lors de la fabrication entre le modèle numérique et la pièce mécanique. Pour cela, la Fabrication Interactive peut s’appuyer sur la numérisation / digitalisation 3D, aussi appelé scan 3D. Cette technologie est employée par MixFAB [264] pour intégrer des éléments directement dans le processus de conception. Cependant, elle a également un rôle dans le processus de fabrication en permettant de comparer la scène de fabrication réelle avec la représentation numérique de l’objet 3D fabriqué. *Patching Physical Object* (Fig. 2.9) [238] y a recours afin de proposer une solution logicielle qui rend possible l’édition d’un objet déjà imprimé. Pour cela, l’imagerie 3D est combinée à un procédé de fabrication additive hybride consti-

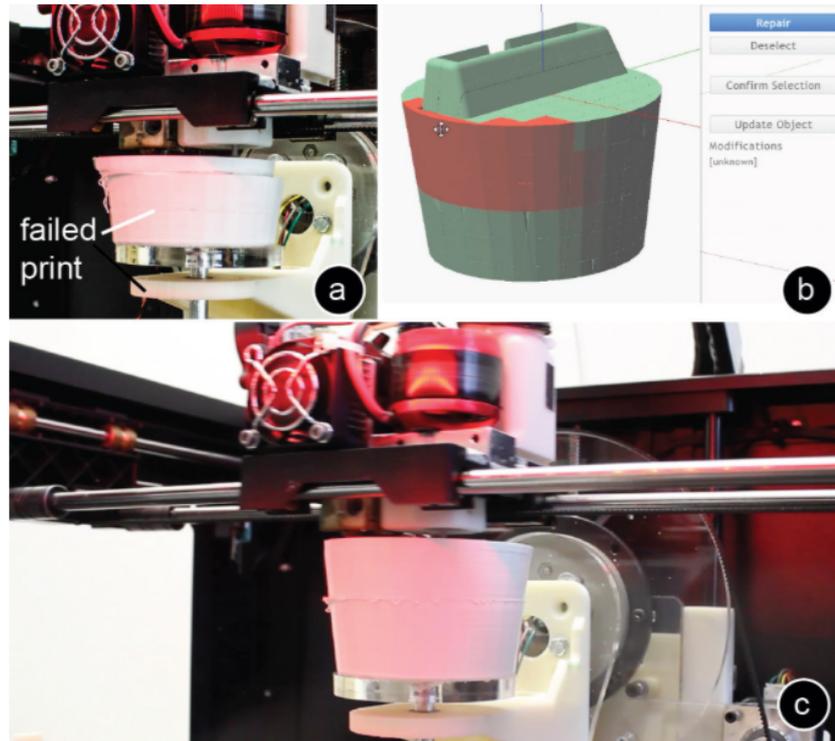


FIGURE 2.9 – Patching Physical Object : (a) Apparition d’un défaut de fabrication dû au décalage des couches dans le plan horizontal. (b) Détection du défaut et des couches à retirer en rouge. (c) Pièce corrigée. (d) Cellule de fabrication regroupant une buse d’impression 3D, un outil d’usinage et un scanner 3D. (Extrait de [238])

tué d’une buse d’extrusion pour l’impression 3D et d’une fraise pour l’usinage.⁵ Cette architecture permet de traiter les erreurs de fabrication par la suppression de toutes les couches affectées lors de la fabrication. Mais elle a surtout pour objectif de réparer des pièces imprimées qui ont été endommagées lors de leurs usages, ou de mettre à jour la géométrie afin de leur donner une seconde vie. Cette démarche constitue une amélioration du processus de conception itératif en permettant de recycler les précédentes itérations. La mise à jour de la géométrie permet ainsi d’envisager un gain de temps et de matière.

Le couplage d’un scanner 3D et de la réalité augmentée permet d’impliquer cette fois l’utilisateur au cœur du processus de fabrication. On parle alors de fabrication continue dans laquelle l’utilisation conjointe de scans 3D et de la réalité augmentée permet de gommer la frontière qui existe habituellement entre la conception et la fabrication. ReFORM [263] traite cette problématique en proposant un nouveau cadre de prototypage. Les auteurs de ReFORM font pour cela le constat que la fabrication avec les machines d’impression 3D est unidirectionnelle, c’est-à-dire que la fabrication d’un objet se fait toujours de la conception numérique vers la fabrication. Le concepteur est contraint par la Chaîne Numérique et il est donc bridé dans son processus de créativité. ReFORM alors introduit le concept d’« espace de fabrication bilatéral » (Fig. 2.10) qui utilise une machine de fabrication hybride exploitant la malléabilité de l’argile et un scanner 3D (Fig. 2.11). Le concepteur peut soit concevoir de manière numérique en utilisant des outils de CAO traditionnels, soit utiliser directement ses mains pour sculpter les formes qu’il souhaite. Dans ce dernier

5. C’est l’architecture de la machine du projet HINDCON.

cas de figure, le concepteur peut, au moment voulu, faire un scan de l'objet. Le scanner 3D est alors utilisé pour mettre à jour le modèle numérique associé à l'objet, mettant ainsi en œuvre complètement la fabrication bidirectionnelle. Cette mise à jour permet la création de différentes versions numériques de l'objet. Par ce système d'historique de la fabrication, les auteurs vont jusqu'à implémenter un mécanisme d'annulation, qui permet le retour à une version antérieure de l'objet. De plus, ReFORM facilite le passage d'un mode de conception à un autre en intégrant à l'imprimante 3D une « vitre augmentée », vitre fonctionnant sur le principe des systèmes « optical see-through ». Cette vitre devient alors le support pour permettre à l'utilisateur d'avoir un aperçu 3D avant impression, et de pouvoir mettre en œuvre des opérations d'édition simple comme la création de surfaces planes.

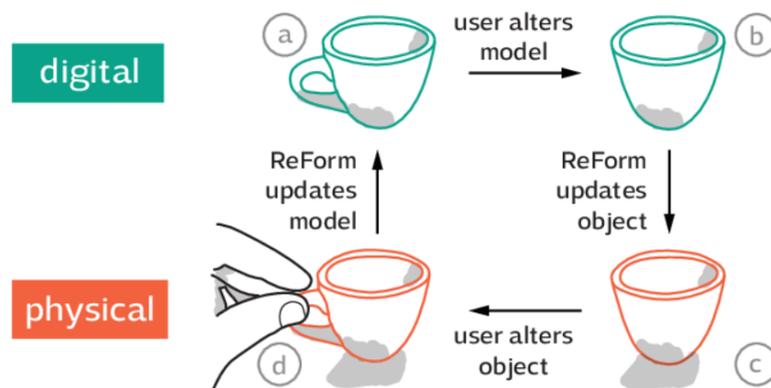


FIGURE 2.10 – Rebouclage entre le l'objet réel et le modèle numérique (Extrait de [263]).

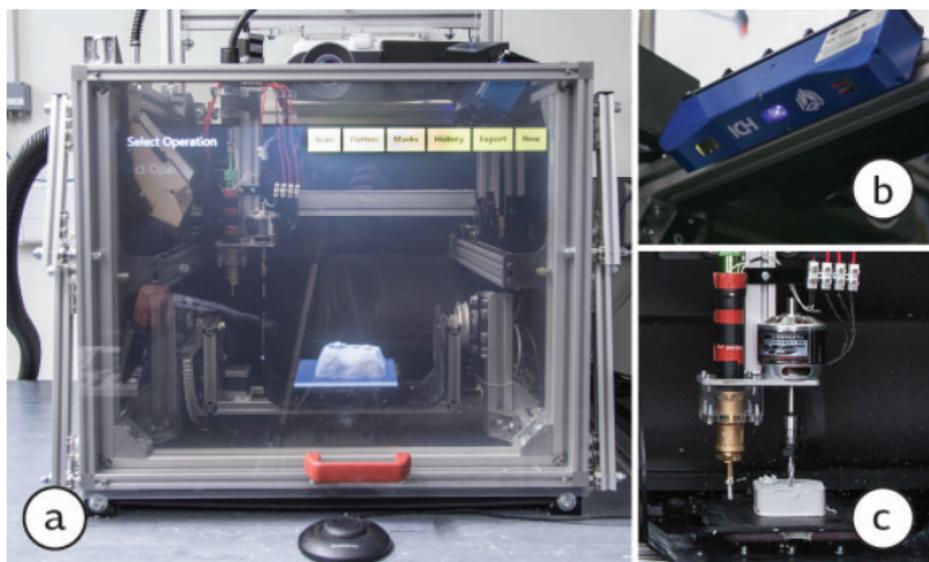


FIGURE 2.11 – Aperçu de la cellule de fabrication mise en œuvre par ReFORM : (a) Vitre en réalité augmentée, (b) Scanner 3D, (c) Outil d'extrusion et d'usinage (Extrait de [263]).

ReFORM illustre ainsi l'importance d'intégrer les outils de conception présentés en début de cet état de l'art pour le développement de nouvelles méthodes de fabrication.

Avec un objectif similaire, *Compositional 3D Printing* (Fig. 2.12, [122]) étend les possibilités d'interaction avec une solution logicielle qui permet de composer un large panel d'entrées pour modifier en temps réel la modélisation. Les auteurs ont mis en place un protocole permettant la modification des couches imprimées par la mise à jour du programme machine (Fig. 2.13). Parmi ces entrées, on retrouve une technique qui consiste à reconnaître les traces laissées par l'utilisateur avec un feutre directement dans la scène de fabrication. L'utilisateur peut y positionner des objets virtuels [263], ou bien réaliser des extrusions sur la base de ces contours. Ils proposent aussi d'intégrer les entrées de différents périphériques pour agir sur la géométrie ou bien certains paramètres durant la fabrication.

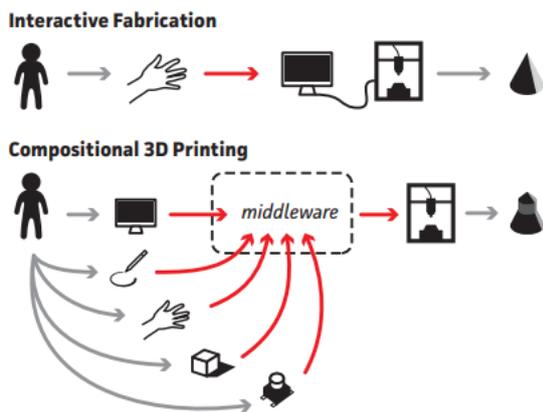


FIGURE 2.12 – Comparaison du processus de Fabrication Interactive et de celui de Fabrication par Composition (Extrait de [122]).

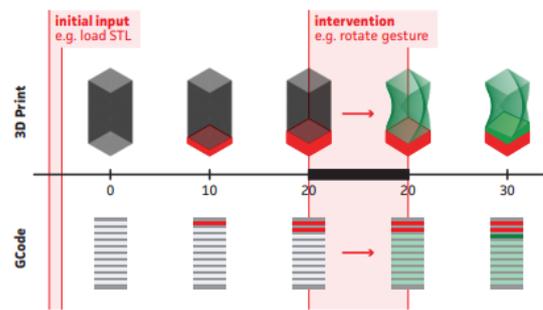


FIGURE 2.13 – Processus de mise à jour du programme machine (G-Code) suite à une interaction de l'utilisateur. En rouge : la géométrie déjà fabriquée, en vert clair : la géométrie qui sera fabriquée (Extrait de [122]).

D'autres travaux, comme RoMA (Fig. 2.14) [179], proposent une solution qui rapproche l'étape de conception de l'étape de fabrication. Pour cela, RoMA transforme une cellule de fabrication constituée d'un robot industriel à 6 axes, munis d'une tête d'impression plastique, en un environnement de conception numérique. Cet environnement est centré autour d'un plateau de fabrication tournant situé au centre de la cellule. Le concepteur modélise directement sur ce plateau depuis un environnement virtuel interactif rendu accessible grâce à un casque de réalité augmentée (Fig. 2.15). La conception s'effectue ainsi in-situ. Le concepteur interagit dans cet environnement par le biais d'un contrôleur de mouvement et de menus 2D en réalité augmentée qui mettent à sa disposition des outils de construction géométrique. À tout moment, le concepteur peut donner l'ordre au robot de commencer à fabriquer les éléments géométriques, précédemment modélisés. Pour permettre la synchronisation entre la fabrication et la conception, l'équipe de RoMA a recours à un procédé de fabrication basse résolution proposée par *On-the-Fly-Print* [180] qui permet de réduire le temps de fabrication en simplifiant la géométrie par un maillage de la surface. Par cette technique, le robot ne réalise que le maillage représentant la surface. Cette synchronisation permet au concepteur de continuer à concevoir la géométrie tout en suivant la fabrication de l'objet. Habituellement, une cellule robotisée de ce type est un lieu inaccessible durant le fonctionnement du robot. Mais dans RoMA, la cellule de fabrication est vue comme un espace de coopération entre le robot et le concepteur. Pour

des raisons de sécurité et pour limiter l'interaction physique avec le robot (qui n'est pas un robot collaboratif aussi appelé cobot), le volume de travail est partagé. L'espace confié au robot évolue dynamiquement en fonction de la proximité du concepteur avec la zone de fabrication. Mais le concepteur peut, à tout moment, interrompre le robot durant la fabrication en touchant la surface de la table pour accéder à une aire située dans l'espace réservé au robot. Cet environnement de conception, qui plonge l'utilisateur dans un espace numérique 3D, donne la possibilité de se déplacer autour de l'objet conçu. Cet environnement facilite ainsi la perception des volumes et permet à l'utilisateur de résoudre plus rapidement les problèmes de conception qu'il peut rencontrer. De plus, l'immersion est renforcée par une conception à taille réelle de l'objet fabriqué. Cet espace en réalité augmentée permet ainsi de connecter la scène de fabrication réelle et virtuelle.

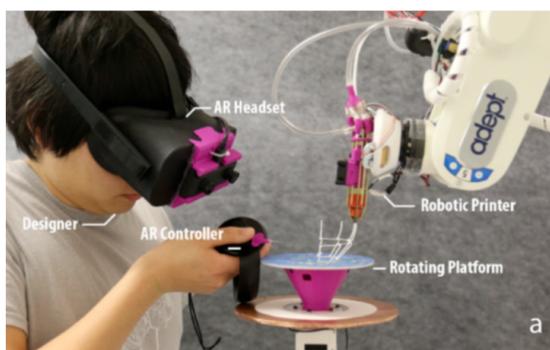


FIGURE 2.14 – RoMA : un environnement de conception interactive en collaboration avec un robot industriel. Sur le plateau est visible la moitié de l'objet en cours de modélisation par le concepteur (Extrait de [179]).

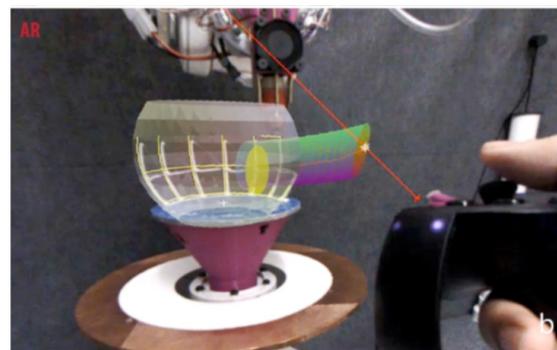


FIGURE 2.15 – RoMA : Vue depuis le casque de réalité augmentée des outils de conception numérique. Dans cet environnement de réalité augmentée, l'utilisateur utilise les doigts de sa main libre afin de placer un plan d'esquisse nécessaire à la création des contours du modèle 3D qu'il crée. (Extrait de [179]).

2.1.3 Une mise en œuvre manuelle assistée

Parmi les prototypes développés pour illustrer le concept de Fabrication Interactive, Willis *et al.* [268] présentent Shaper (Fig. 2.16), une imprimante 3D équipée d'une fenêtre tactile. L'utilisateur peut alors indiquer à la machine quoi fabriquer à partir de contours tracés avec le doigt sur la fenêtre. La machine détecte automatiquement les intersections pour créer un volume couche après couche. Grâce à cette fenêtre, il n'y a plus d'intermédiaire entre la matière brute et l'objet final. L'utilisateur se sert de l'imprimante 3D comme d'un outil traditionnel de fabrication pour donner la forme souhaitée. Il se rapproche ainsi de l'acte du sculpteur qui transforme l'argile en une sculpture. Dans cette situation, l'utilisateur n'a pas besoin de connaissance en conception numérique pour réaliser son objet s'il maîtrise le procédé. En effet, le procédé est entièrement sous la responsabilité de l'utilisateur, qui doit posséder un savoir-faire de fabrication. Il doit en effet tenir compte du débit de matière, de la hauteur de l'outil ou bien de la constitution de l'empilement des couches. Une maîtrise insuffisante du procédé se traduit par un décalage



FIGURE 2.16 – Imprimante 3D contrôlée depuis une fenêtre tactile qui permet une mise en œuvre du procédé couche après couche (Extrait de [268]).

entre l'objet 3D désiré et le résultat final. *Mais, comment peut-on assurer la maîtrise de ce qui est fabriqué pour réduire ce décalage ?*

Cette question a été en partie traitée par Li *et al.* [131] dans le cadre de la fabrication par usinage. Ils ont mis en évidence que la difficulté pour l'utilisateur est de maintenir des paramètres de fabrication idéaux tout en définissant la stratégie de fabrication. Pour cela, ils ont comparé trois modes d'exécution des commandes envoyées par l'utilisateur. Un mode « statique » qui décrit un fonctionnement où l'ensemble des commandes envoyées à la machine sont enregistrées jusqu'à ce que l'utilisateur donne l'ordre de les réaliser. Un mode « manuel » pour lequel l'utilisateur est libre de choisir l'ordre d'exécution qui peut être différent de l'ordre de création. Finalement un mode « dès que possible » où les commandes sont exécutées le plus vite possible après leur création. Le retour utilisateur a permis d'établir que, dans le cadre d'une production sur une surface plane, le mode « manuel » offre le meilleur compromis entre action et planification. Le mode « statique », lui, donne un meilleur contrôle du procédé, en facilitant par exemple l'édition du design avant production. Finalement, le mode « dès que possible » est le mode décrit comme le plus proche de la réalité artistique et qui offre le plus de liberté de création.

Pour faciliter cette mise en œuvre manuelle, l'utilisateur doit donc être assisté par ordinateur. Cette assistance se concrétise avec la notion « d'artisans hybrides » développée par A. Zoran *et al.* [279]. Pour cela, il est utile de rappeler la définition d'un produit de l'artisanat. L'UNESCO nous en donne la définition suivante : « On entend par produits artisanaux les produits fabriqués par des artisans, soit entièrement à la main, soit à l'aide d'outils à main ou même de moyens mécaniques, pourvu que la contribution manuelle directe de l'artisan demeure la composante la plus importante du produit fini⁶ ».

La maîtrise des outils et des techniques demande de longues heures de pratiques, l'artisan est alors un expert mettant en œuvre sa technique au service d'un art. L'**artisan**

6. www.unesco.org/new/fr/culture/themes/creativity/creative-industries/crafts-and-design/

hybride utilise des outils intelligents offrant une assistance pour la mise en œuvre, qui embarquent un ensemble de capteurs permettant l'évaluation en temps réel de la position de l'outil et des changements apportés à l'environnement de fabrication. Ils permettent alors la mise en place de bridages et de règles automatiques pour corriger la position de l'outil ainsi que différents retours pour guider l'utilisateur. L'**artisan hybride** est donc un futur possible de la fabrication additive.

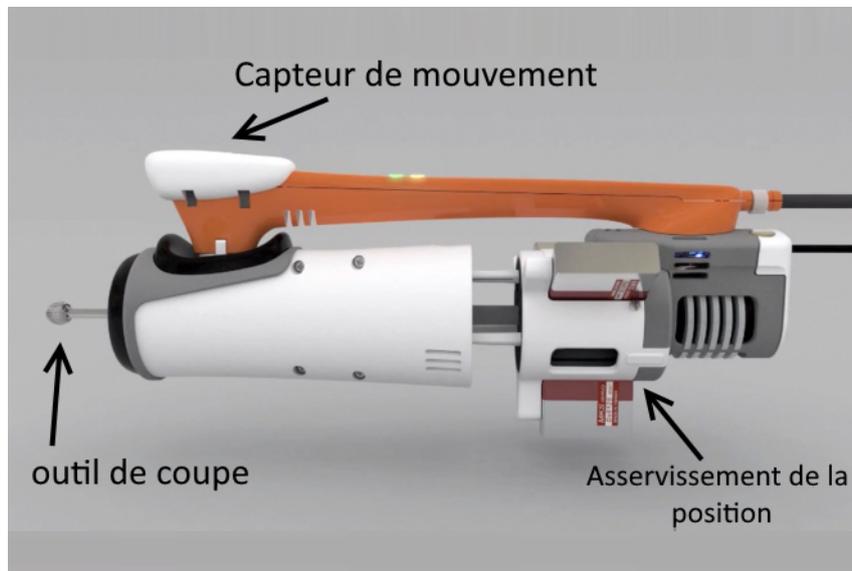


FIGURE 2.17 – FreeD : un outil de sculpture intégrant un système de correction en temps réel de la position de l'outil en fonction d'une surface virtuelle (Extrait de [279]).

Sur la base de ces outils intelligents, FreeD (Fig. 2.17) [279] propose à des utilisateurs novices de créer des sculptures 3D personnalisées en utilisant une fraise montée sur une liaison rotule lui permettant des mouvements sur 3 degrés de liberté. À partir d'un modèle 3D à fabriquer, FreeD crée une « enveloppe virtuelle protectrice » autour du bloc de matière brut. Cette enveloppe empêche l'utilisateur d'endommager sa sculpture en rétractant l'outil pour empêcher la pénétration dans le bloc de matière. La course de l'outil n'étant pas infinie, l'utilisateur est averti par un témoin lumineux et sonore que l'outil est au contact de la surface virtuelle. Ce retour indique à l'utilisateur qu'il s'approche ou s'éloigne de la surface idéale. Si la course de l'outil entre en butée, l'outil de coupe s'arrête immédiatement pour empêcher l'utilisateur d'endommager la sculpture finale. FreeD permet différentes personnalisations du modèle 3D de base en permettant à l'utilisateur de contourner l'assistance pour créer des éléments uniques ou en déformant le modèle numérique (Fig. 2.18).

Cette approche d'artisanat hybride a aussi été transposée à la fabrication additive avec la création de D-Coil (Fig. 2.19) [181], basé sur l'architecture de FreeD. D-Coil est un outil d'aide à la conception et non de fabrication. L'objectif est de permettre à l'utilisateur de découvrir les spécificités de la fabrication au travers de la mise en œuvre manuelle de l'outil. La particularité de D-Coil est de générer un artefact physique supportant le processus de conception. D-Coil permet à l'utilisateur de concevoir par itération des entités géométriques complexes en prototypant chaque étape (Fig. 2.20). Pour cela, l'utilisateur choisit des formes de bases préprogrammées, sur lesquelles il peut appliquer diverses transformations géométriques. L'utilisateur doit alors répéter plusieurs fois l'opération pour créer un volume par empilement successif de couches comme le ferait une imprimante 3D. Comme

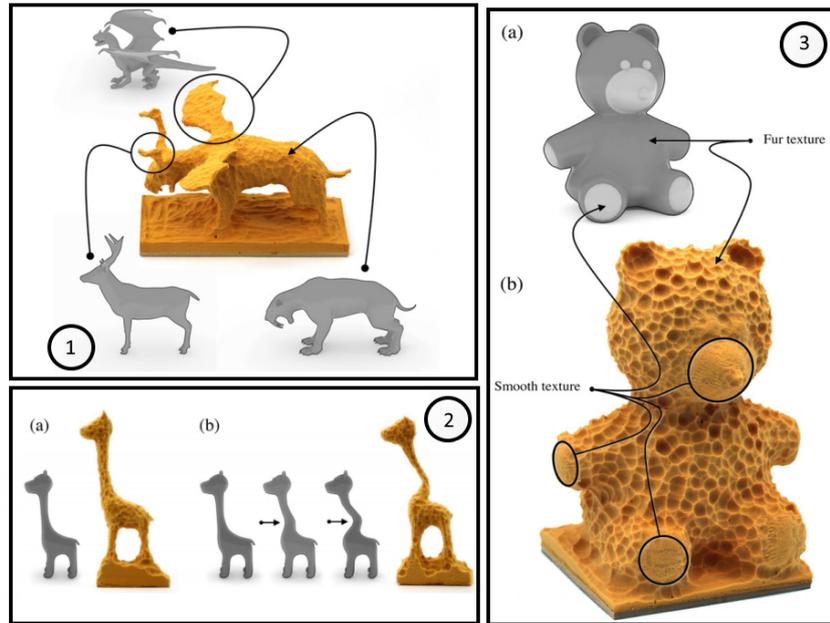


FIGURE 2.18 – Exemples de réalisation faite à FreeD : (1) Personnalisation de la sculpture par hybridation de plusieurs modèles 3D. (2) Déformation automatique du modèle 3D provoqué par un enlèvement volontairement excessif de matière. (3) Texturation assistée par l’ordinateur de la surface ((a) modèle d’origine, (b) surface finale) (Extrait de [279]).

pour FreeD, l’outil est capable de corriger la position localement, afin de suivre la trajectoire décrivant la géométrie de la pièce à fabriquer. Cela guide également l’utilisateur dans la direction à suivre.

Cependant, D-Coil permet seulement la fabrication de contours et ne permet pas de créer de formes internes⁷, permises par la fabrication additive. La possibilité « d’édition » de la pièce est toutefois présente, ceci étant rendu possible par la suppression, si nécessaire, d’éléments déjà fabriqués. Mais ce mode de conception ne permet pas autant de liberté que d’autres techniques déjà présentées dans cet état de l’art. En cause, la réalisation des différentes itérations qui créent de nombreuses surfaces cachées qui sont alors inaccessibles pour l’utilisateur.

Un outil similaire à D-Coil serait nécessaire pour la correction d’aléas pour permettre la poursuite de la fabrication. Il faut pour cela réussir à éliminer les mouvements parasites de l’utilisateur qui compromettent la qualité du dépôt de matière (Fig. 2.20). Malheureusement, cette technique semble être aussi conditionnée par le matériau déposé, ici la cire, qui doit être compatible avec la capacité de mouvement de l’utilisateur. Un matériau trop lent à déposer ou nécessitant des conditions particulières pour assurer une cohésion avec le reste de la matière sont des facteurs qui réduisent la pertinence de cette technique.

Pour ces deux techniques, on remarque que le retour d’informations est limité principalement au retour visuel de l’utilisateur. L’utilisateur n’a pas d’indications précises sur la stratégie de fabrication à suivre alors que dans le cadre de la fabrication additive, le procédé impose des règles strictes pour assurer une mise en œuvre minimale du procédé.

WireDraw 3D [275] illustre le bénéfice d’un tel retour. C’est un outil d’aide à la fabrication reposant sur un guide en réalité augmentée pour assister l’utilisation d’un stylo 3D

7. Il s’agit des surfaces et contours se situant à l’intérieur du volume.

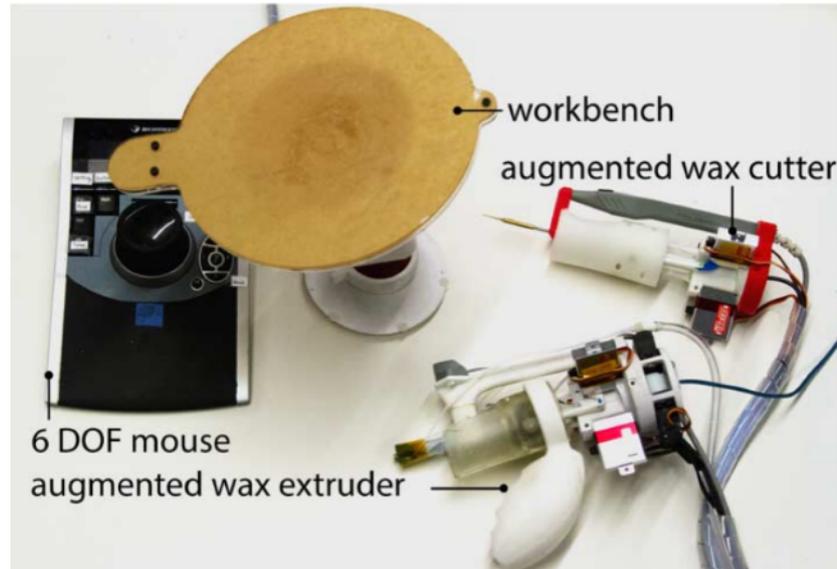


FIGURE 2.19 – D-COIL : un outil de conception reposant sur la création d’un artefact de conception (objet imprimé) par la mise en œuvre manuelle d’un outil de fabrication additive. Sur la photo, on trouve un plateau de fabrication, une souris 3D pour sélectionner les opérations géométriques à réaliser, un extrudeur manuel de cire pour matérialiser chaque étape du processus de conception et un outil de coupe permettant de supprimer des éléments de l’objet produit (Extrait de [181]).

à extrusion filamentaire. Ce type de stylo repose sur une technique proche de l’impression 3D plastique et permet de construire à main levée les arêtes et surfaces d’un objet 3D. WireDraw implémente un algorithme permettant de décomposer le modèle 3D en une succession d’étapes de construction pour l’obtention d’un objet 3D basse résolution. La réalité augmentée permet alors d’afficher un guide pour connaître l’ordre et la position spatiale des arêtes à construire. Ainsi, le dispositif permet d’accélérer le processus de fabrication et facilite le geste de l’utilisateur. Cependant, WireDraw met aussi l’accent sur l’importance de l’ordre dans lequel doivent être réalisées les opérations de fabrication, pour obtenir un résultat final de qualité.

D’autres applications [31, 95, 196, 263] se concentrent sur un retour qualitatif de la fabrication. Ces retours sont cependant principalement limités à des informations géométriques. Pour ces applications, la réalité augmentée superpose ces informations à la réalité de la scène de fabrication. *Sculpting by Numbers* [196] propose ainsi un dispositif de guidage en réalité augmentée projetée utilisant un couple vidéo projecteur/caméra pour mettre en évidence les différences entre un bloc d’argile et le modèle numérique 3D que l’utilisateur cherche à produire, grâce à la projection d’une carte de chaleur dichromatique sur la surface du bloc d’argile, pour mettre en évidence les erreurs de position entre la surface du bloc d’argile et celle du modèle 3D. Ce retour visuel incite l’utilisateur à interagir avec une partie, plutôt qu’une autre, pour y ajouter ou y enlever de la matière. Ce système permet aussi d’améliorer les capacités de perception des formes et des volumes de l’apprenant. Cette architecture est reprise plus tard par Hattab *et al.* [95], pour indiquer où dégrossir un bloc de matière. L’application permet d’envisager un affichage s’adaptant au type d’outil utilisé et offre la possibilité de recourir au marquage. Ces deux possibilités offrent un environnement proche de la réalité des métiers de tailleur de pierre pour lequel l’utilisation combinée du marquage et de différents outils participe à la création de surface

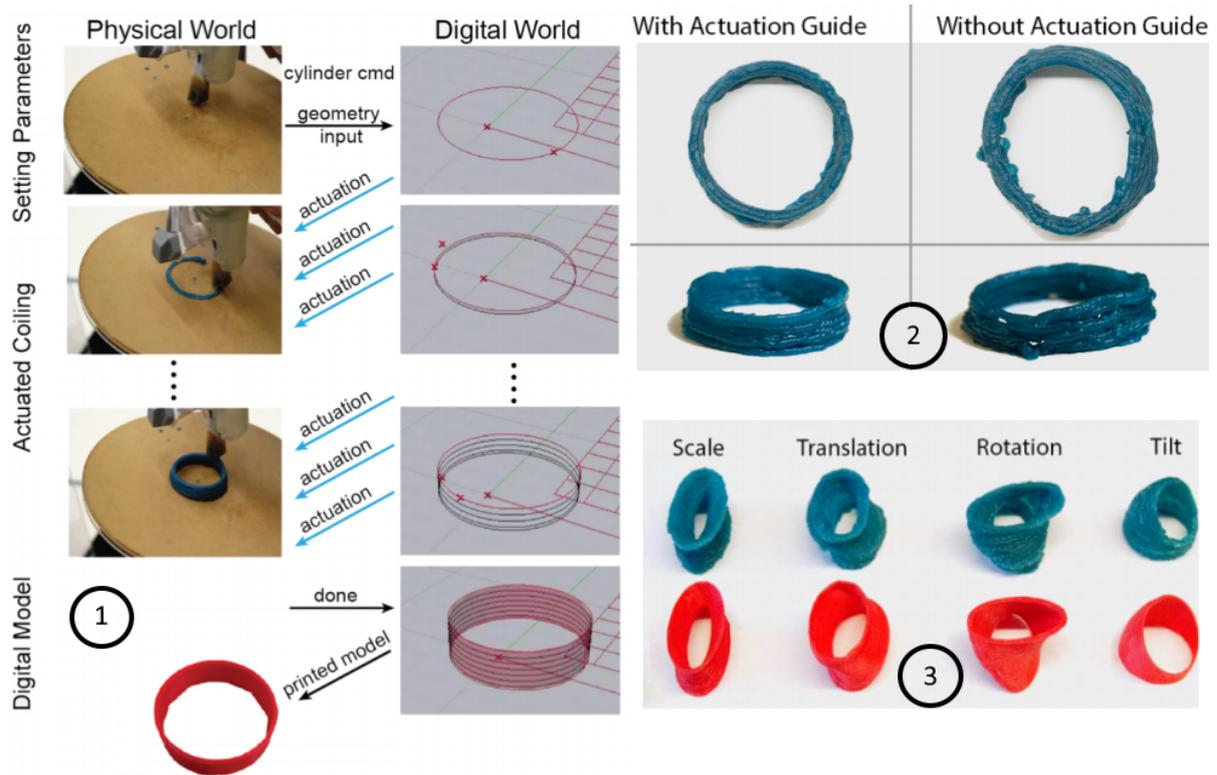


FIGURE 2.20 – (1) Illustration du processus de conception permis par D-Coil. (2) Comparaison du dépôt de matière avec et sans assistance. (3) Exemples d’opérations géométriques pouvant être appliquées à un contour (Extrait de [180]).

complexe.

Ce retour qualitatif manque à D-COIL [181] (vu précédemment), qui illustre une mise en œuvre artisanale de la fabrication additive. En effet, l’utilisateur peut s’apercevoir de la présence d’aléa géométrique visuellement, mais il n’est à aucun moment informé sur la qualité du dépôt de matière. Cette qualification nécessite en effet de traduire des informations provenant de mesures de capteur et de les convertir sous la forme d’une information quantitative qui peut alors servir à alerter l’utilisateur.

En conclusion, nous retenons que la Fabrication Interactive est un domaine de recherche propice au développement de techniques d’interaction nouvelles pour la fabrication additive. Elle permet tout particulièrement d’imaginer la création d’un environnement de fabrication dont les outils de conception ont la particularité d’être ancrés directement dans la scène de fabrication. Ce lien avec le réel est créé par l’usage de la réalité augmentée pour mettre en place une fabrication continue et itérative, via un couplage avec des techniques d’imagerie 3D. Ce cadre de fabrication continue permet ainsi l’édition en temps réel de la pièce mécanique fabriquée : soit en manipulant la modélisation numérique de l’entité fabriquée grâce à une interaction en réalité augmentée, soit en façonnant la matière déjà déposée ou bien en interagissant directement avec l’outil de fabrication comme le laisse imaginer le concept d’artisan hybride.

Néanmoins, ces environnements de Fabrication Interactive restent quelque peu éloignés de la réalité imposée par la fabrication additive industrielle. Bien qu’envisageant une collaboration entre l’utilisateur et l’outil robotisé, les concepts développés jusque-là sont

pensés pour de petits volumes de travail, suffisant pour une production artistique, mais insuffisante pour une mise en œuvre industrielle. Dans ces espaces de travail que l’œil ne peut pas apprécier dans leur globalité, de nouvelles problématiques apparaissent comme l’interaction avec des objets éloignés ou masqués. De surcroît, bien que les interactions proposées permettent de repenser la géométrie au cours de la fabrication, le résultat obtenu n’est qu’une n-ième itération d’un prototype et non une pièce mécanique de service commercialisable. Dans le contexte industriel, la Fabrication Interactive reste, sous cette forme, un processus de conception améliorée. L’obtention d’un produit fini nécessite la mise en œuvre du procédé, de manière automatisée.

Pour basculer complètement vers un déploiement de la Fabrication Interactive pour les procédés de fabrication additive industrielle, l’utilisateur doit pouvoir maîtriser le procédé en évaluant **la qualité de ce qui est fabriqué**. Cette maîtrise du procédé est importante, car la fabrication additive est un procédé qui façonne la géométrie et la matière, alors que les procédés par enlèvement de matière comme celui mis en œuvre par FreeD [279] n’impactent que la géométrie. Il est donc nécessaire d’intégrer à la représentation géométrique de la pièce les propriétés qui sont liées au matériau. Il s’agit d’apporter à l’artisanat hybride, des outils permettant de qualifier ce qui est fabriqué.

Cette maîtrise est d’autant plus nécessaire étant donné que le contexte de la Fabrication Personnelle s’intéresse à l’hybridation des procédés de fabrication pour donner à la matière des propriétés supportant directement l’interaction. Nous pouvons citer le cas de ProtoSpray [92] qui permet, par exemple, de créer des surfaces luminescentes à la surface d’objets produits par impression 3D. La création de ces surfaces nécessite une conception plus complexe que celle d’une géométrie traditionnelle. Il est en effet nécessaire de prévoir l’insertion d’éléments de connectique ou l’impression de pistes électriques permettant l’activation de ces surfaces, mais aussi d’assurer un état de surface suffisant à la projection des différentes couches de matière permettant leur illumination. Les créateurs de ProtoSpray mettent en effet en avant des difficultés à interfacer les deux procédés. Particulièrement, lorsque l’état de surface n’est pas suffisant (manque de matière ou la délamination de la surface) ou lorsque des discontinuités sont créées dans les couches de matériaux conducteurs. Un retour au cours de la fabrication sur la conductivité d’une surface pourrait par exemple permettre d’effectuer des corrections avant que les défauts ne soient recouverts par les couches suivantes.

2.2 Une Chaîne Numérique Interactive

Dans ces travaux, nous nous intéressons, en particulier, à la famille des procédés de fabrication additive. Dans un contexte industriel, la mise en œuvre de ces procédés répond à des règles strictes afin que les produits obtenus soient des produits finis respectant des critères de qualité et d’économie. C’est pourquoi il est important de formaliser les limites de ce procédé.

2.2.1 La mise en œuvre industrielle actuelle

La fabrication additive est donc mise en œuvre en s’appuyant sur un processus numérique appelé Chaîne Numérique que nous avons schématisé dans la figure 2.21 pour la fabrication additive à partir des travaux de la littérature [17, 159, 186]. Cette Chaîne Numérique est utilisée pour décrire la transformation de la géométrie nécessaire à la mise en œuvre industrielle des machines à commande numérique ou des robots. Il s’agit d’un

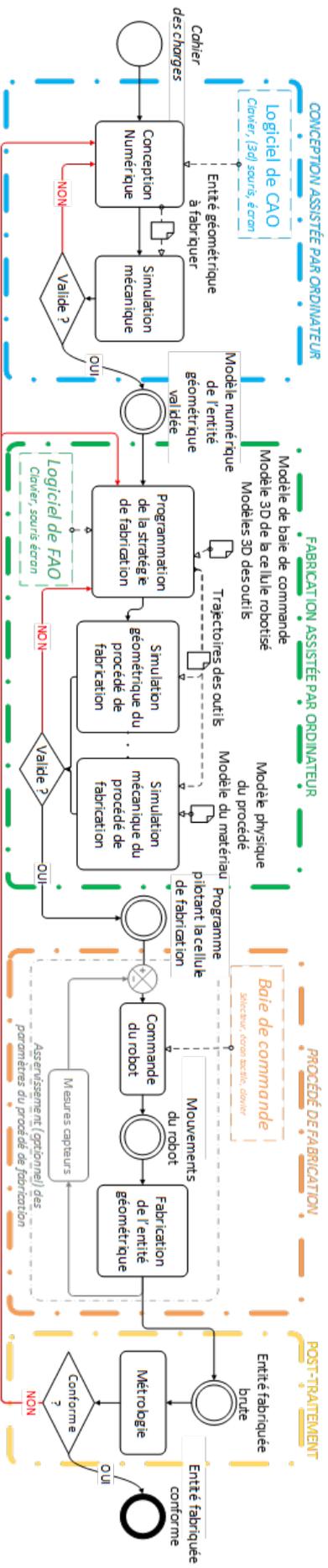


FIGURE 2.21 – Schéma de la Chaîne Numérique pour une mise en œuvre classique de la fabrication, élaboré à partir de [17, 159, 186].

processus descendant qui a maintenant un peu plus d'une cinquantaine d'années et dont la définition s'est construite en parallèle du développement de l'automatisation des procédés de fabrication. Il est aujourd'hui complètement informatisé et peut être découpé en 4 étapes consécutives qui traduisent un enchaînement de transformations géométriques permettant de passer de la définition d'un modèle géométrique 3D intégrant les besoins fonctionnels à la définition géométrique de la commande du système de fabrication à commande numérique.

En fabrication additive, la Chaîne Numérique débute par l'étape de Conception Assistée par Ordinateur (CAO, Fig. 2.21, étape bleue) durant laquelle est réalisée la conception 3D (Fig. 2.22, (1)) de l'entité géométrique à fabriquer. Cette conception est réalisée à partir des spécifications contenues dans le cahier des charges préalablement défini. Cette étape produit une modélisation 3D, aussi appelée géométrie. Le dimensionnement de cette géométrie est ajusté au besoin par différentes simulations numériques pour évaluer les propriétés physiques et valider ainsi le cahier des charges. Cette étape de conception est une étape critique, car elle demande aussi d'intégrer dès la conception des règles relatives au procédé.

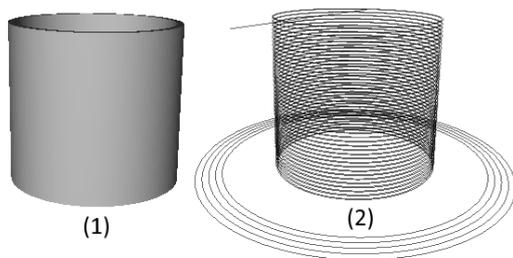


FIGURE 2.22 – (1) Modèle STL et (2) visualisation du programme outil obtenu avec le « slicer » Simplify3D pour impression 3D plastique.

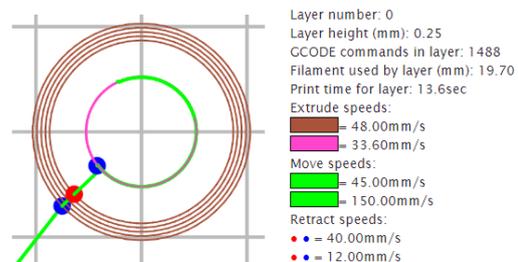


FIGURE 2.23 – Modélisation en tranche (ici la couche 0) avec le détail des principaux paramètres pour impression 3D plastique, générée à partir de Simplify3D.

Le modèle géométrique est transformé en un modèle surfacique approché au format STL (Standard Triangle Language) qui est le support de l'étape de Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO, Fig. 2.21, étape verte). Cette étape permet de définir la stratégie de déplacement de l'outil (Fig. 2.22, (2)) à mettre en œuvre pour fabriquer l'entité géométrique. Cette stratégie outil prend la forme d'un programme machine, écrit dans un langage formalisé tel que les langages CNC ISO ou G-Code. Il contient essentiellement les points de passage de l'outil, le mode d'interpolation, la loi de vitesse de l'outil et différents appels à des fonctions technologiques. L'obtention d'un tel programme fait appel à un programme spécialisé, appelé « slicer », pour créer un modèle en tranche de l'objet 3D (Fig. 2.23) et des supports de fabrication nécessaire au maintien de la matière déposée au cours de la fabrication. Pour chaque tranche, la trajectoire de l'outil est calculée à partir des paramètres de fabrication (épaisseur de peau, hauteur de couche, méthode de remplissage, etc.) choisis en fonction du procédé.

Avant la fabrication effective de la géométrie par le procédé, le programme de fabrication est vérifié dans un environnement de simulation spécifique. Cet environnement est une simulation de la scène de fabrication robotisée dans laquelle est évalué le risque de collisions entre l'outil et la pièce générée, mais aussi le comportement modélisé du maté-

riau sous l'action du procédé. Le processus se poursuit alors par la fabrication de l'entité géométrique (Fig. 2.21, étape orange) via le directeur de commande numérique du système de production qui transforme le programme calculé en un enchaînement de mouvements générant la mise en couche par l'outil de fabrication additive. La fabrication se termine par l'obtention d'un brut de fabrication. Il fait ensuite l'objet d'une phase de métrologie (Fig. 2.21, étape jaune) qui permet de qualifier la pièce mécanique produite et donc d'évaluer le respect du besoin fonctionnel. Cette étape est réalisée grâce à des techniques non destructives permettant de contrôler la géométrie et les propriétés physiques de la pièce fabriquée. L'obtention du produit final est achevée par l'addition de plusieurs post-traitements géométriques et mécaniques.

L'emploi de la fabrication additive par l'Industrie 4.0 est stratégique pour assurer la création de produits hautement personnalisés [3, 57]. La création de ces produits à bas coût nécessite une mise en œuvre maîtrisée, fiable et répétable. Or, la mise en œuvre actuelle du procédé est source de nombreuses erreurs de fabrication [145, 172].

Quelles sont alors les limites de la mise en œuvre par la Chaîne Numérique pour la fabrication ? Comment alors atteindre les objectifs économiques et écologiques fixés par le modèle de l'Industrie 4.0 ?

Pour rappel, la fabrication additive a pour particularité de produire simultanément une géométrie et un matériau. Les erreurs générées sont alors de deux natures⁸ : géométriques et physiques [143].

Les défauts géométriques sont d'abord des écarts de dimension et de forme qui affectent tout ou une partie de la géométrie, de la pièce mécanique fabriquée. Elles sont le résultat de déformations ou de gauchissement des surfaces extérieures. Un exemple typique est le gauchissement des surfaces sous l'action des contraintes thermiques résiduelles ou bien l'affaissement des couches inférieures non solidifiées sous leur propre poids dû à un empilement trop rapide des couches supérieures (cas de la fabrication béton Fig. 2.24).

Parmi les défauts géométriques, il est possible aussi de constater des défauts de surfaces, caractérisés par un surplus ou un manque de matière localisée qui peuvent apparaître lors de la création d'une couche (contour et remplissage) ou être provoqués suite à l'empilement des couches. Ces défauts sont occasionnés par les approximations liées aux transformations géométriques lors de la définition de la trajectoire outil. En effet, la création de la stratégie de fabrication par la discrétisation du modèle STL (Opération de tranchage « slicing », étape de FAO) crée de nouvelles approximations, apparaissant sous la forme d'escaliers sur la surface de la pièce. Ces défauts peuvent aussi être le résultat de l'irrégularité du dépôt de matière. En effet, différents incidents de fabrication peuvent perturber la génération du cordon de matière, car la géométrie du dépôt de matière est généralement fonction d'un triplé de paramètre : la vitesse de l'outil, l'apport d'énergie et le débit de matière.

Plusieurs causes peuvent influencer sur la géométrie du cordon déposé. Il peut s'agir d'éléments liés à la stratégie de fabrication, c'est-à-dire à la position et à la vitesse de déplacement de l'outil. Par exemple pour le procédé du projet HINDCON⁹, un changement de vitesse de l'outil provoqué par un changement de direction a pour effet d'augmenter la taille du dépôt de matière. Il peut aussi s'agir de variations liées à l'apport d'énergie

8. On distingue ici la géométrie des propriétés physiques du matériau créé

9. www.hindcon.fr



FIGURE 2.24 – Effondrement de l’empilement des couches sous leur propre masse (Projet H2020 HINDCON).

ou de matière. Ces variations peuvent être apportées par des facteurs environnementaux, être liées à la physique du procédé et à la géométrie de la pièce ou tout simplement être le résultat d’erreurs dans la commande. Par exemple, pour les procédés métalliques, une augmentation de la température due à une accumulation d’énergie provoque un écrasement du dépôt de matière. Il est donc nécessaire, pour ce type de procédé, de prendre en compte l’évolution de la géométrie et la vitesse de dépose afin de réguler l’apport d’énergie provenant de la source (laser, arc électrique, etc.).

Lorsque le manque de matière apparaît à l’intérieur d’une couche, il aboutit à la seconde catégorie de défauts : les défauts physiques, ou mécaniques qui sont les premières causes de rejet d’une pièce, mais aussi thermiques ou électriques.

En effet, un manque de matière influence la densité de matière constituant la pièce mécanique fabriquée. Si ces défauts sont trop nombreux, la densité de la pièce fabriquée est trop faible, ce qui se traduit par une moindre tenue mécanique ou en fatigue en service.

D’un point de vue thermique ou électrique, un matériau de faible densité présente aussi des propriétés beaucoup moins intéressantes (moins bonne dissipation thermique, résistance électrique plus élevée, etc.). Un exemple typique de perte de densité est l’apparition de porosités qui sont de petites cavités dans la matière. Elles apparaissent principalement lors de la solidification du matériau déposé. Par exemple pour la fabrication additive métallique, elles peuvent être dues à une fusion partielle de la matière, de l’emprisonnement de gaz ou d’une réaction chimique comme l’oxydation du matériau. Pour les procédés additifs béton, il peut s’agir d’un mélange non-homogène par exemple [25].

La seconde source de défauts physiques, dits de microstructure, est due à une mauvaise maîtrise des phénomènes de transformation du matériau. Ces défauts trouvent en général

leur origine à cause d'un mauvais contrôle des paramètres du procédé de fabrication durant la solidification du matériau. Pour le béton, ils peuvent être provoqués par un mauvais mélange des constituants du béton (ciment + additif + eau) qui varient en fonction de la température et de l'hygrométrie du mélange et de l'atmosphère. Pour les métaux, il faut maîtriser la température et la vitesse de refroidissement du métal pour assurer de bonnes conditions de cristallisation, il est aussi nécessaire de contrôler les échanges thermiques entre les couches (recuit, fusion).

Ces défauts peuvent aussi être d'ordre macroscopique avec l'apparition de fissures. On observe ce type de défaut par exemple pour le béton lorsqu'il se rétracte trop vite créant des fissures orthogonales à la direction de dépose [101]. L'apparition de défauts physiques concerne aussi la cohésion de l'empilement des couches. En effet, la construction des pièces en couches successives crée de nombreuses interfaces pouvant être le siège de discontinuités ou de faiblesses mécaniques (point de rupture ou décollement). Ces discontinuités se traduisent par l'apparition de fissures se propageant dans la direction du dépôt. En fabrication additive béton, un autre défaut typique est le manque de collage entre les couches qui se traduit par une faiblesse en traction ou en cisaillement [25]. Il en est de même, par exemple, pour la fabrication métallique si l'énergie apportée lors du dépôt de matière n'est pas suffisante pour assurer la fusion avec la couche précédente. Si l'énergie est insuffisante alors le dépôt est juste « collé » (il n'a pas pénétré dans la couche inférieure) et peut être alors facilement décollé du substrat.

Actuellement, l'utilisation seule du procédé de fabrication additive ne permet pas d'obtenir des produits finis de service. Le programme machine se termine par l'obtention d'une forme brute approchée (pièce mécanique avant métrologie et post-traitement) contenant une combinaison des différents types d'erreurs présentées. Il est alors nécessaire de mettre en place plusieurs étapes de post-traitement en fonction du procédé utilisé (Fig. 2.21, étape jaune). Ce post-traitement élimine donc aussi les supports de fabrication, et les défauts de fabrication, pour obtenir les propriétés mécaniques et esthétiques attendues [38].

Les post-traitements utilisés sont de nature différente en fonction des procédés utilisés. Ils peuvent être mécaniques. Un procédé complémentaire par enlèvement de matière peut être utilisé pour améliorer, par exemple, l'état de surface des surfaces fonctionnelles. Ils peuvent être thermiques, pour libérer les contraintes résiduelles déformant la géométrie ou pour réduire les porosités, par un recuit de stabilisation. Ils peuvent aussi être chimiques en plongeant la pièce dans une solution afin d'augmenter la dureté superficielle de la pièce.

Lorsque les erreurs cumulées sont trop importantes pour être corrigées ou qu'un incident majeur empêche la construction des couches suivantes, il devient nécessaire d'abandonner la fabrication et de rebuter la partie fabriquée. En fonction de l'origine de l'erreur, plusieurs alternatives sont proposées. Il peut s'agir simplement de relancer entièrement la fabrication, car l'incident implique un défaut de la machine ou de l'outil ou bien une reconception peut être nécessaire relançant le processus à l'étape de CAO ou bien de FAO. Dans ce cas de figure, il est nécessaire de mettre en place un processus de conception par essais et erreurs afin de trouver un jeu de paramètres de fabrication capable de minimiser les défauts et permettant d'atteindre les performances souhaitées. Fabriquer en utilisant ce type de procédé reste un défi technique complexe demande de maîtriser une centaine de paramètres de conception liés à la géométrie, au matériau et à l'outil pour trouver le bon compromis [144]. Cette approche est cependant coûteuse et produit de nombreux rebuts, ce qui est fâcheux lorsque l'on souhaite commercialiser un produit fini, dit de service, en

quelques unités et à bas coût (Fig. 2.25, [121]).

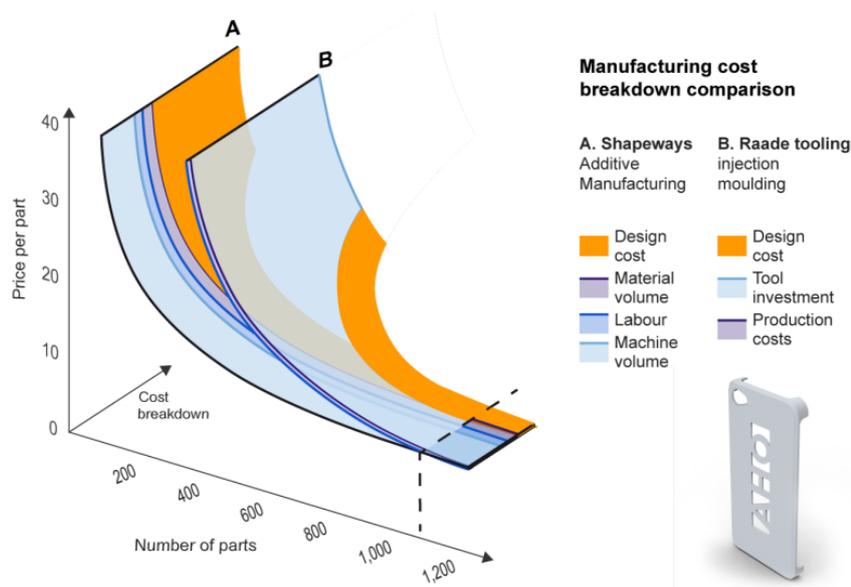


FIGURE 2.25 – Comparaison du coût de la fabrication additive et de la fabrication par injection plastique pour une coque de téléphone (Extrait de [121]).

Cependant, la mise au rebut de pièces de grandes tailles comme celles fabriquées par le procédé du projet HINDCON ou celui du projet ADDIMAFIL lors de l'apparition d'un défaut majeur est concevable d'un point de vue économique, écologique voir technique. En effet, on ne peut pas mettre au rebut une structure de plusieurs mètres cubes de béton après avoir dépensé plusieurs dizaines voir plusieurs centaines d'heures de fabrication. Il est donc nécessaire de pouvoir corriger ces défauts le plus tôt possible, sans attendre qu'ils soient recouverts par plusieurs couches successives.

Pour pouvoir réaliser cette correction, il est nécessaire de pouvoir modifier l'exécution de la fabrication. Cependant, la mise en œuvre actuelle de la fabrication additive rend difficile de réaliser une telle modification sans la réexécution complète de la Chaîne Numérique. En effet, l'exécution de la fabrication résulte d'un enchaînement de transformations géométriques qui sont réalisées pour passer de la CAO à la fabrication. Cet enchaînement crée une discontinuité entre chaque étape, à l'origine d'une perte d'informations [17]. Ce phénomène est particulièrement visible entre l'étape de CAO et celle de FAO qui constitue un premier transfert d'informations notamment par la perte des spécifications dimensionnelles par le passage d'un modèle volumique à un modèle surfacique approché au format STL, mais aussi lors de la génération du programme où la géométrie est discrétisée en fonction des paramètres du procédé. Cette perte d'information à chaque étape implique pour le processus d'être strictement descendant et donc sans retour en arrière possible [17, 63].

Par conséquent, le modèle de Chaîne Numérique utilisée actuellement pour la mise en œuvre de la fabrication n'est pas adapté à la réalisation de pièces de services. Un processus plus flexible est nécessaire pour une utilisation du procédé de fabrication additive dans le

contexte de l'Industrie 4.0 car il empêche tout simplement de pouvoir traiter d'éventuels aléas de fabrication comme de très probables incidents de fabrication, mais aussi une mise à jour de la géométrie suite à un changement du besoin. *Ainsi, comment pouvons-nous rendre cette mise en œuvre plus robuste et flexible ?*

2.2.2 La consolidation de la Chaîne Numérique

La consolidation de la Chaîne Numérique est une problématique touchant plusieurs disciplines comme la mécanique, la robotique et le génie des procédés. Ces différentes communautés se mobilisent pour améliorer la mise en œuvre de cette famille de procédés en favorisant leur automatisation. L'une des difficultés pour ce type de procédé est de combler le décalage existant entre le processus de conception et la mise en fabrication. Le défi pour les bureaux d'étude est de réaliser une conception qui intègre les contraintes du procédé. Cette problématique voit l'apparition de différentes méthodes de conception spécifiques à la fabrication additive (DfAM - Design for Additive Manufacturing) [187, 267]. Ces transformations des méthodes de conception et de fabrication se concluent par la proposition de nouvelles Chaînes Numériques dédiées à la mise en œuvre de la fabrication additive [17, 18, 148] basée sur une meilleure gestion de l'information au long du processus. Particulièrement, les travaux de Bonnard *et al.* [18] sur la création d'une plateforme générique basée sur l'intégration d'un nouveau format de STEP-NC (STandard for the Exchange of Product model data compliant Numerical Control) dédié à la fabrication additive. Ce format de fichier vient en remplacement des fichiers STL et G-Code. Il assure une communication bidirectionnelle de l'information au sein de la Chaîne Numérique en regroupant en un fichier unique les informations des modèles CAO, FAO et du programme machine. Ce formalisme permet d'envisager une fabrication en boucle fermée, ce qui permet une adaptation et une optimisation du procédé par rapport aux contraintes réelles de fabrication.

L'optimisation du processus de fabrication additive passe par l'intégration des fonctionnalités liées à la FAO et au procédé sélectionné. Elle prend ainsi en compte la notion de fabricabilité qui repose sur l'évaluation de la conception par rapport aux règles imposées par le procédé. Ces outils permettent d'intégrer la création des supports directement lors de la phase de modélisation 3D en calculant l'orientation optimale de la pièce mécanique qui minimise la quantité de supports à générer tout en facilitant leur retrait [276]. L'intégration de ces outils en milieu opérationnel se fait aussi par l'intervention des éditeurs de logiciel comme AutoDesk qui intègrent des solutions d'infographie pour faciliter ces opérations se déroulant en amont de fabrication (Fig. 2.26) [209]).

L'évaluation de la fabricabilité est aussi permise par une meilleure compréhension des phénomènes physiques du matériau induits par le procédé. En effet, une meilleure connaissance de ces phénomènes permet l'optimisation de la stratégie de fabrication à partir de différents jeux de paramètres de fabrication et en fonction de différents critères de fabrication, comme les dimensions du dépôt de matière ou bien son évolution thermique. Il résulte de cette recherche la création de modèles physiques des procédés toujours plus précis. La validation de ces modèles est faite de manière expérimentale par la fabrication d'éprouvettes caractérisées mécaniquement par des essais destructifs. Ainsi, des règles métiers sont exprimées pour la fabrication de futures pièces.

La création de ces modèles reste cependant un sujet difficile à traiter. Des limites techniques sont imposées par les méthodes de simulation comme la méthode par éléments finis qui nécessite une puissance de calcul et un temps de calcul important [274], car le

maillage associé croit au cours de la fabrication. Le maillage est alors utilisé pour évaluer les caractéristiques mécaniques de la pièce. Cependant, ces modèles ne permettent pas de traiter les perturbations dues à un phénomène non-prédictible comme une perturbation extérieure au procédé.

Du fait de la sensibilité du processus de solidification de la matière, il devient pertinent de mettre en place un suivi temps réel de la fabrication permettant de traquer l'apparition de défauts [69]. Plusieurs méthodes de mesures non-destructives sont proposées pour évaluer la progression de la fabrication en fonction de la dimension physique à observer. Ces méthodes sont utilisées pour mettre en place des stratégies de contrôle comme l'asservissement de la température du procédé au moyen de capteurs thermiques. Ces stratégies de contrôle font aussi appel à des techniques de vision pour évaluer la géométrie du dépôt de matière ou pour détecter l'apparition de discontinuités géométriques (interruption du dépôt de matière, fissures) [76].

De plus, le stockage et la classification par des algorithmes d'intelligence artificielle des données collectées au cours des fabrications deviennent critiques pour rendre fiables à long terme ces procédés. Un exemple d'exploitation de ces données est proposé par la communauté IHM pour aider les utilisateurs novices à choisir les bons paramètres d'impression [37].

2.2.3 Une boucle d'interaction au cours de la fabrication

Comme nous l'avons énoncé précédemment, il s'agit de rendre la mise en œuvre du procédé plus flexible pour faciliter l'industrialisation d'un produit de service personnalisable. C'est pourquoi nous faisons l'hypothèse qu'il est possible d'établir une interaction avec une machine de fabrication additive hybride permettant à la fois le dépôt de matière, mais aussi son retrait. Alors que des aléas peuvent apparaître de manière fortuite malgré l'automatisation, il devient nécessaire d'introduire une mise en œuvre interactive durant

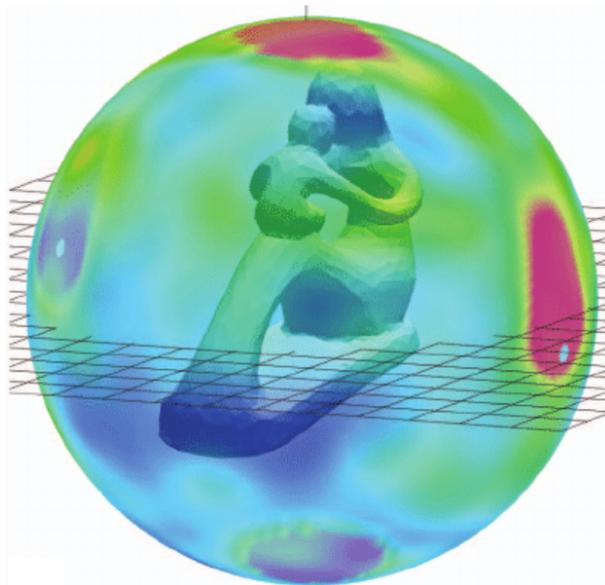


FIGURE 2.26 – Carte de chaleur représentant en rouge la surface totale de supports nécessaire en fonction de l'orientation de la pièce dans la cellule de fabrication (Extrait de [209]).

la conduite du procédé (Fig. 2.21, Étape 3 - Orange). Cette interaction se traduit alors par la proposition d'une boucle de rétroaction humaine qui vient en réponse de l'apparition d'un aléa de fabrication nécessitant l'interruption de la fabrication.

Nous proposons alors un processus d'interaction (Fig. 2.27) qui doit permettre une adaptation de la fabrication sans devoir reconstruire l'intégralité de ce qui a déjà été fabriqué. Ce processus se compose d'un enchaînement de 3 étapes déclenchées par l'apparition d'un aléa en conflit avec la stratégie initiale de fabrication. La première tâche (Fig. 2.27, tâche 1) est l'identification de l'aléa par l'évaluation des propriétés géométriques et physiques de la pièce en fabrication à partir des données collectées et de l'expertise de l'opérateur. L'opérateur peut ensuite adapter l'exécution de la fabrication depuis la cellule robotisée, pour traiter cet aléa, en modifiant soit le programme machine soit en prenant temporairement le contrôle de l'outil de fabrication (Fig. 2.27, tâche 2). Finalement, une tâche de contrôle du programme machine après la modification permet la reprise de la stratégie initiale de fabrication (Fig. 2.21, tâche 3). Au cours de cette dernière étape, l'opérateur doit s'assurer que l'outil et la surface actuelle sont compatibles avec la reprise du fonctionnement automatique.

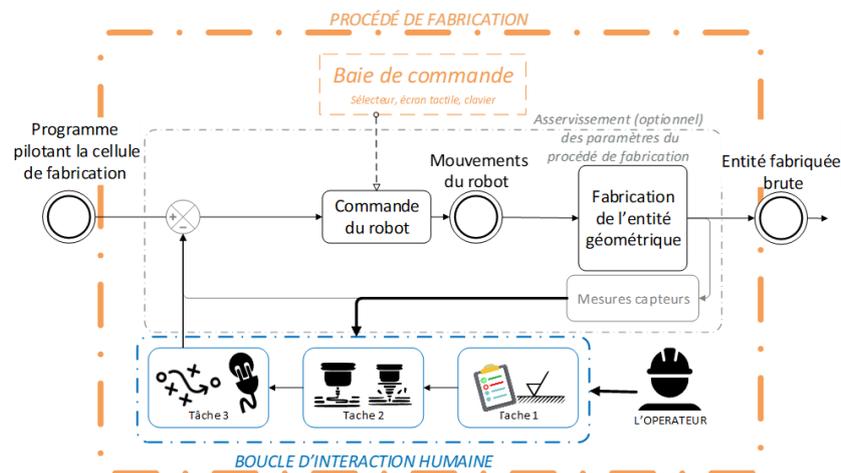


FIGURE 2.27 – Chaîne Numérique Interactive : l'adaptation de la stratégie de fabrication par l'interaction directe de l'opérateur avec le procédé au cours de la fabrication.

Rectifier ou ajouter de la matière nécessite le pilotage des différents outils de fabrication via la partie robotisée. Pour ce faire, une interface entre l'opérateur et la baie de commande doit être ajoutée pour transmettre les ordres de mouvement au robot. Pour commander le robot, l'opérateur doit être capable de prédire les déplacements de l'outil dans l'environnement et corriger son mouvement en fonction des informations perçues de l'interaction procédé-matière-pièce.

Par rapport à la littérature, nous avons identifié deux méthodes pour modifier la mise en œuvre automatisée du procédé de fabrication : par une action directe sur le procédé (méthode 1) ou par une action indirecte (méthode 2).

Méthode 1 par action directe : le pilotage en manuel du procédé La première méthode repose sur la prise de contrôle en manuel de l'outil robotisé pour réaliser l'adaptation de la pièce fabriquée s'appuyant sur le modèle numérique 3D. C'est-à-dire utiliser

le modèle numérique pour faciliter l'appréciation du contexte réel. Il s'agit de s'inspirer du cadre de fabrication proposé par D-Coil en proposant un outil assisté par ordinateur. Par contre, l'opérateur n'est pas complètement libre de ses mouvements. En effet, l'assistance pilote la partie robotisée pour maintenir les déplacements de l'outil, avec des conditions de fabrication minimale. Il s'agit par ailleurs d'augmenter la scène de fabrication en communiquant à l'opérateur en temps réel des informations relatives au matériau fabriqué, capturées par différents capteurs. L'opérateur a alors la responsabilité d'imaginer la trajectoire de l'outil permettant la réalisation de la géométrie désirée.

Cette première méthode pourrait permettre de répondre à l'apparition de défauts, par exemple, combler un manque de matière ou reprendre une discontinuité, mais aussi faciliter l'intégration d'inserts structurels ou fonctionnels. En revanche, cette mise en œuvre semble limitée pour le dépôt de quantités importantes ou pour la construction de géométries complexes, à cause de la difficulté à piloter le robot précisément. Il serait alors nécessaire de permettre à l'utilisateur de visualiser à chaque instant les possibilités de déplacement de l'outil pour en garantir la mise en œuvre.

Méthode 2 par action indirecte : l'édition du programme machine La seconde méthode repose sur la modification du programme machine initial pour corriger un aléa non anticipé. Cela nécessite l'utilisation de la géométrie réelle pour enrichir le contexte de fabrication numérique. Il s'agit ici de s'inspirer du cadre de fabrication proposé par RoMA [179] (voir p.40) en offrant des outils de conception intégrés à la cellule de fabrication. Cependant, ces outils ne doivent pas être de simples outils de modélisation géométrique 3D, mais doivent permettre la génération in-situ d'un modèle par couche directement ancré sur l'état de fabrication intermédiaire de la pièce en fabrication. En effet, on se place dans un contexte de FAO puisqu'à partir de ce modèle, l'objectif est de créer une trajectoire outil et l'optimiser pour qu'elle puisse incorporer la nouvelle géométrie au contexte réel.

Cette seconde situation vient en complément de la première situation en permettant à l'utilisateur d'adapter de manière désynchronisée la fabrication. Ce qui permet à l'opérateur un temps de réflexion plus long pour traiter le problème. En revanche, cette mise en œuvre peut avoir des conséquences sur les propriétés physiques du matériau en créant des interfaces avec des conditions de fabrication hétérogènes. Cette modification nécessite alors que l'opérateur ait un retour sur le comportement physique du matériau déposé. Ce retour peut être envisagé dans un contexte simulé à partir du modèle physique associé au procédé ou bien en temps réel à partir de données mesurées.

Avec ces méthodes, nous nous intégrons dans le paradigme de la *Fabrication Interactive* avec des enjeux qui ne sont pas ceux de la conception d'un produit, mais bien de la fabrication de celui-ci. De fait, l'interface proposée doit garantir la maîtrise des procédés mis en œuvre. Ceci est rendu possible, si l'opérateur est capable de détecter une dérive du procédé. C'est-à-dire de détecter le moment où les variations des grandeurs physiques décrivant les phénomènes physiques provoqués par l'interaction matière-procédé-pièce ne respectent plus les plages de fonctionnement imposées en amont de la fabrication. Ainsi, l'interface proposée doit être capable de faire apprécier à l'utilisateur des informations relatives à la géométrie et aux propriétés physiques du dépôt de matière. La question suivante se pose alors : *Comment est-il possible d'informer en temps réel du maintien des bonnes conditions de fabrication ?*

On constate ainsi, que notre problématique de recherche se particularise par rapport

à la revue de littérature. Alors que la littérature illustre plusieurs concepts d'association d'une réalité augmentée à des situations de fabrication interactive ou personnelle, nous constatons que dans une situation de fabrication industrielle, la problématique se situe plus au niveau de la perception du procédé en temps réel et non de la manipulation interactive de la cellule élémentaire de fabrication.

2.2.4 La maîtrise du procédé pour une Fabrication Interactive industrielle

Pour considérer la maîtrise du procédé, il convient d'identifier les acteurs du processus de fabrication. La mise en œuvre des procédés de fabrication additive dans la Chaîne Numérique incombe traditionnellement à l'opérateur de fabrication [63], qui participe au bon déroulement de la mise en œuvre des procédés de fabrication. Le recoupement de nos observations de la plateforme Addimadour et de la littérature, nous a permis d'identifier que l'opérateur de fabrication additive est acteur au début et à la fin de la mise en œuvre du procédé (Fig. 2.21, étape 3 - Orange). Il intervient aussi dans la dernière étape du processus de la Chaîne Numérique (Fig. 2.21, étape 4 - Jaune).

L'opérateur a la responsabilité de maintenir opérationnel le parc de machines en réalisant un ensemble de tâches de maintenance. Il réalise principalement le nettoyage et l'inspection des machines entre chaque fabrication, et le contrôle des consommables. Parmi les consommables se trouve la matière première dont il doit contrôler le stockage et la qualité. Une mauvaise conservation de la matière première (détérioration chimique, contaminations, etc.) peut être à l'origine d'incidents de fabrication, difficilement prévisibles lors de la fabrication [63].

L'opérateur est aussi en charge de préparer la scène de fabrication. Cette mission comprend une succession de tâches, telles que : l'approvisionnement en matière première, la préparation du substrat sur lequel est effectuée la fabrication, la vérification du fonctionnement ainsi que la calibration des outils de fabrication et de mesure. Il a aussi la responsabilité de contrôler les éléments de sécurité (capteur O₂, masque respiratoire, etc.). Après la fabrication, l'opérateur est responsable des différentes opérations de métrologie et de post-traitement décrites précédemment.

Ce qui nous intéresse plus particulièrement dans cette thèse, c'est son rôle une fois la fabrication démarrée. Durant la fabrication, l'opérateur doit surveiller le bon déroulement de la fabrication ; qui peut durer plusieurs dizaines d'heures. Or, au cours de cette tâche, l'opérateur est en réalité simple spectateur de la fabrication. En cas d'incident majeur, sa réponse se résume alors à l'arrêt complet de la fabrication et au retrait du volume fabriqué [63]. Cet incident fait alors simplement l'objet d'un rapport de fabrication relatant ces observations et en fonction de la nature de l'erreur, il peut prendre la responsabilité de relancer une nouvelle fois la fabrication.

Du fait de la complexité de ces procédés et de leur faible maturité, l'opérateur se repose complètement sur l'automatisation. Cette situation crée une véritable boîte noire autour de sa mise en œuvre [273]. Wurhofer *et al.* [271] décrivent très bien le paradoxe qu'implique une automatisation excessive. Bien que voulant fiabiliser le processus en éliminant la variabilité humaine, cette automatisation rend en retour inapte l'opérateur à répondre aux situations qui échappent à l'automatisation. En effet, l'automatisation crée une distanciation de l'opérateur qui développe une sorte de routine se traduisant par de la fatigue mentale et parfois par de l'ennui. Du fait, l'opérateur se sent moins impliqué dans le processus augmentant le risque de dysfonctionnement.

Wurhofer *et al* affirment donc au contraire que l’automatisation doit intégrer l’humain dans la boucle, en référence à l’expression anglaise « Human in the loop », pour développer les connaissances pratiques et l’aptitude à résoudre des problèmes des opérateurs. Pour cela, le système automatisé doit assumer une certaine transparence en transmettant des informations sur son activité.

2.3 Le besoin : une ambiance sensorielle pour le suivi d’un système commandé numériquement en temps réel

Historiquement, les opérateurs de fabrication par enlèvement de matière sont perçus comme la première ligne de défense pour la prévention et la réponse aux dysfonctionnements des procédés de fabrication (Fig. 2.28, gauche). Pour accomplir cette tâche, l’opérateur se repose sur un ensemble formel d’informations transmises par le biais d’écrans de contrôle ou d’alarmes sonores. Mais il se repose aussi traditionnellement sur des indices sensoriels informels pour détecter l’apparition de dysfonctionnements qui échappent à l’automatisation [259].

Par exemple, des indices sonores, des vibrations inhabituelles ou l’apparition d’étincelles produites par l’outil au contact de la matière sont des indices pouvant servir à caractériser l’usure prématurée d’un outil de coupe ou d’un mauvais paramétrage comme une profondeur de passe trop importante [152]. Nos observations du procédé de fabrication montrent aussi la présence de certains indices que l’opérateur est capable de percevoir, mais pas nécessairement d’interpréter (Fig. 2.28, droite). D’autres indices comme les changements thermiques ou les écarts géométriques lui restent inaccessibles. Ils sont soit imperceptibles, soit masqués par le procédé. Typiquement, il faut attendre l’arrêt de l’arc électrique pour le procédé WAAM afin d’avoir un retour visuel qualitatif de ce qui a été fabriqué.

Devant l’apparition de ces erreurs, nous pensons qu’il est intéressant de créer une expérience de perception sensorielle comparable à celle des opérateurs des procédés par enlèvement de matière, pour détecter certains dysfonctionnements du procédé. Pour créer cette expérience, nous proposons de rendre perceptibles des critères de fabrication au moyen d’une interface augmentant la fabrication créant ainsi un système de Réalité Augmentée. La modalité de cette augmentation reste alors à définir, en explorant les différentes techniques de perceptualisation telle que la visualisation, l’haptisation ou la sonification pour permettre à l’utilisateur de suivre l’évolution de ces critères.

2.3.1 Une définition d’ambiance pour la fabrication additive

La définition de la notion d’ambiance n’est pas simple. Associée à la notion d’ambiance, la notion d’impression revient fréquemment : l’ambiance peut être reposante, sereine ou stressante. Il est possible de faire le parallèle avec l’ambiance d’une salle de réanimation, pour laquelle les bruits émis par les équipements médicaux engendrent une ambiance rassurante ou stressante d’alarmes [48].

Le Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL¹⁰) donne une définition psychologique de l’ambiance : « *Qualité du milieu (matériel, intellectuel, moral)*

10. <https://www.cnrtl.fr/>

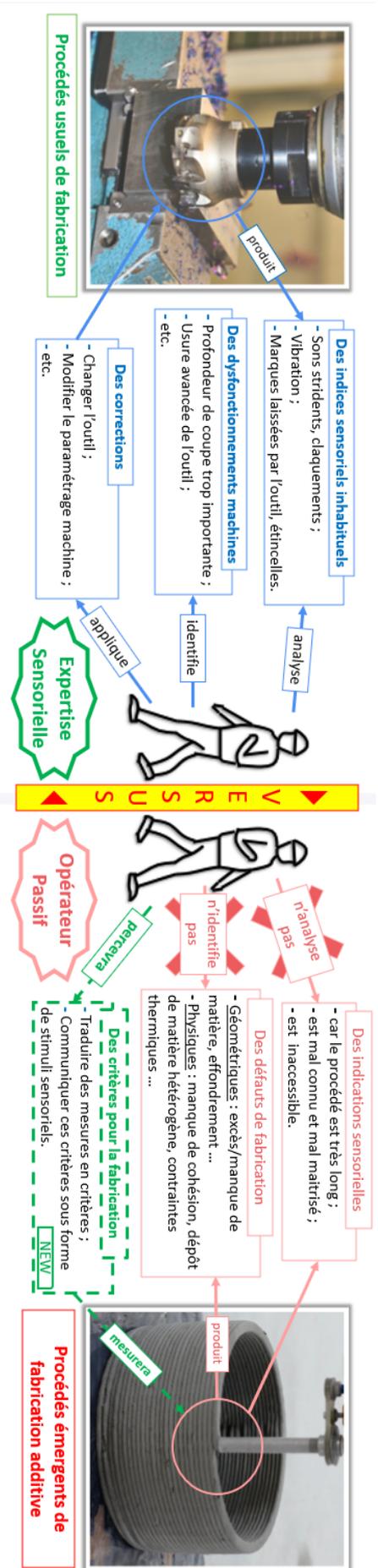


FIGURE 2.28 – Comparaison de l'opérateur de fabrication par enlèvement de matière (gauche) avec l'opérateur de fabrication additive (droite). L'opérateur de fabrication additive est un simple acteur en comparaison de du rôle traditionnel des opérateurs qui ont mis en place une expertise sensorielle permettant de détecter l'apparition d'un dysfonctionnement.

qui environne et conditionne la vie quotidienne d'une personne, d'une collectivité. ». Puis il renvoie vers la notion de milieu avec par exemple l'ambiance au travail : « *les éléments de ce milieu sont multiples, et parmi les plus importants citons : l'éclairage, le bruit, les vibrations et la température* ». Finalement, la définition s'oriente vers la notion « *d'atmosphère de la réalisation ou de la projection d'un film* » qui combine les effets visuels et sonores. Adjiman définit l'ambiance sonore comme « *l'ensemble des sons qui constituent un arrière-plan sonore, presque un second plan, et construisent un environnement sur lequel peuvent s'appuyer les autres sons, ceux, plus saillants comme les voix, les bruits et les musiques, destinés plus principalement à la progression du récit* » [2].

Par analogie, nous donnons notre propre définition : une *ambiance sensorielle* est définie comme l'ensemble des stimuli sensoriels participant à la création d'une atmosphère, dont les stimuli les plus saillants mettent en évidence un élément ou un événement. Pour la fabrication additive, ces stimuli sensoriels se dénotent d'un contexte habituel pour alerter et informer l'opérateur sur le déroulement de la fabrication.

Cette ambiance combine des indices sensoriels naturellement émis par le système à des indices sensoriels artificiels augmentant la fabrication pour mettre en évidence des phénomènes, cachés de l'utilisateur. La création de ces indices sensoriels repose sur la traduction des critères de fabrication par une fonction de transfert associant l'information à des stimuli sensoriels de manière intelligible. Il faut, alors, déterminer quel canal sensoriel est adapté à la communication de ces grandeurs physiques telles que la hauteur, la largeur ou bien la température, caractéristiques des procédés étudiés.

2.3.2 La représentation sensorielle des phénomènes physiques

Dans cette partie, nous proposons une revue de bibliographie qui traite de la représentation de grandeurs physiques géométriques et thermiques en fonction de différentes techniques de perceptualisation. Ainsi, nous construisons un environnement de conception pour les représentations sensorielles sous la forme d'une matrice $M[x, y]$ (Tab. 2.3.2) croisant les différents canaux sensoriels (haptique, visuel, auditif, olfactif et gustatif), avec les dimensions physiques observées durant la fabrication : la hauteur, le contour d'une forme, en particulier l'aspect ratio (largeur/hauteur) et la température. $M[x, :]$ et $M[:, y]$ désignent alors respectivement la ligne x et la colonne y .

2.3.2.1 Les représentations sensorielles abstraites

En science, les données numériques relatives à un phénomène physique sont généralement présentées graphiquement. Pour le contexte de la fabrication, il s'agit typiquement de signaux 2D montrant l'évolution d'un paramètre en fonction du temps. Sur ces courbes, il apparaît souvent un curseur auquel est associée la valeur numérique de la mesure instantanée. Bien que disponibles sur la majorité des outils de contrôle, ces mesures sont très peu mises en contexte avec la scène de fabrication, du fait de la complexité visuelle de la scène. Le système ASTOR [170] propose, par exemple, de les superposer à la scène de fabrication au moyen d'une vitre augmentée. Cependant, la représentation abstraite de données ne se limite pas aux données exprimées en fonction du temps, mais aussi à celles qui sont fonction d'une variable spatiale.

Pour ce type de données, l'utilisation de représentations colorées est particulièrement appréciée pour mettre en évidence différents phénomènes physiques invisibles. Dans notre

	Haptique y = 1	Visuelle y = 2	Auditive y = 3	Olfactive y = 4	Gustative y = 5
Hauteur x = 1	Rendu tactile de la rugosité d'une surface : -Reproduction vibratoire [224] -Reproduction par étirement de la peau [171] -Reproduction par indentation [11] Représentation abstraite : -Encodage vibratoire [33] Exploration active : -Reproduction fidèle d'une surface [150, 185] -Interfaces à changements de forme [110, 130, 218] Surfaces virtuelles : -Surfaces ultrasoniques [109] -dispositifs haptiques [10, 60, 93, 111, 256]	Représentations colorées : -Cartes de chaleur Graphique 2D : [93, 254] AR + palette Arc-en-ciel : [71, 150, 162, 245] AR projetée + palette dichromatique : [196] -Coloration du champs visuel : [200] Représentations géométriques : -Contours [150, 162] -Déformation d'un modèle 3D [104] -Comparaison visuelle 3D [31]	Son synthétique : -Échelle directe (fréquence, volume) [158, 188, 206, 232] -Échelle temporelle (rythme) [86] Son spatialisé : -Balance bi-auriculaire [208] -Son spatial 3D [96] Alternance musique/bruit [53]		
Contour (Hauteur, Largeur) x = 2	Saisie haptique : [39, 90] Perception de la courbure : [72, 189]	Déformation d'un modèle 2D/3D : Visualisation 2D [1, 49] Modèle 3D déformé en RA [104] Carte de chaleur : Température : AR, palette Arc-en-ciel : [143, 253] AR, palette « FER » [227, 253] AR projetée, palette dichromatique : [136] Échanges thermiques : VR : [52, 74, 223] Contour coloré [88] Intermodalité couleur / température [36, 100]	Son synthétique 2D [188] Intermodalité son/aspect ratio [202, 230]	Intermodalité odeur/aspect ratio : [56, 91]	Intermodalité goût/aspect ratio : [247, 248]
Température x = 3	Rendu réaliste -Contraste thermique VR [141, 178, 194, 203, 214] -Rendu absolu de la température [105] -Rendu du transfert thermique : [99] (réaliste), [234] (abstrait)		Son synthétique : -Échelle 1D [211, 254] Son naturelle [188] Intermodalité son/ température [243, 260]	Intermodalité odeur/ température [270]	

TABLE 2.1: Exemple de techniques de perceptualisation dans l'espace de conception des représentations sensorielles des grandeurs physiques pour la fabrication additive.

cas d'étude, il s'agit par exemple des échanges thermiques ou la déformation d'une géométrie. Pour ces phénomènes, les modélisations ou mesures in-situ sont souvent visualisées par l'intermédiaire de cartes de chaleur ou bien parfois par des contours colorés. La carte de chaleur est une technique de visualisation permettant de représenter la magnitude d'une variable spatialement distribuée en lui associant une échelle de couleur. L'interpolation des points 2D ou 3D permet d'avoir une représentation continue du jeu de données visualisé. Les contours colorés constituent une forme de représentation simplifiée des cartes de chaleurs qui connecte l'ensemble des points connexes de même magnitude, formant ainsi une succession d'isocourbes parallèles. Ces représentations colorées permettent de créer des visualisations dynamiques en intégrant une fonction temporelle faisant varier indépendamment chaque point coloré de la visualisation. Les cartes de chaleur sont facilement superposables sur un fond visuel. Les modèles météorologiques représentent par exemple sur des fonds de cartes, la distribution de la température par des cartes de chaleur et la distribution de la pression atmosphérique par des contours [88] (voir *M*[3, 2], Tab. 2.3.2).

La visualisation de ces représentations se fait de plus en plus souvent en environnement virtuel sur une reconstitution 3D de l'environnement [52, 74, 223] (voir *M*[3, 2], Tab. 2.3.2). Dans le bâtiment par exemple, les modélisations thermiques sont explorées et manipulées à l'échelle grâce à des dispositifs de réalité virtuelle. Un « serious game » [223] permet par exemple d'exploiter ces environnements pour sensibiliser à la consommation d'énergie. Les actions entreprises par les utilisateurs ont pour effet de faire varier la température de l'appartement. Grâce aux différentes représentations de la température, les utilisateurs peuvent se rendre compte de l'impact de simples gestes sur la consommation d'énergie d'un appartement. Ce type de représentation aide l'utilisateur à prendre conscience des mécanismes de déperdition de chaleur que crée par exemple une fenêtre ouverte.

D'autres travaux s'intéressent à la réalité augmentée en permettant l'exploration des données directement dans l'environnement réel [136, 227]. La réalité augmentée ne se limite pas qu'aux données issues de modèles de simulation, mais permet aussi d'explorer des données réelles capturées grâce à différents capteurs. La démocratisation des dispositifs d'imagerie thermique permet l'usage de ces techniques de visualisation à niveau académique pour l'étude des phénomènes thermiques tels que la conduction ou le rayonnement [227, 253]. En effet, cette technologie permet de mesurer rapidement la température en différents points de la surface d'un objet en évaluant son rayonnement infrarouge. Les caméras thermiques génèrent alors une image thermique de la scène en fausses couleurs. Une application en réalité augmentée sur HoloLens¹¹ permet par exemple la mise en évidence des phénomènes de conduction thermique à la surface d'un cylindre en métal [227]. Cette application est intéressante, car elle combine une carte de chaleur avec des courbes 2D permettant d'observer l'évolution dans le temps de la température à un point précis. L'évaluation du dispositif montre une amélioration de la compréhension du phénomène thermique chez les étudiants disposant du casque de réalité augmentée comparée à la méthode d'enseignement traditionnelle. L'idée de projeter des images produites par une caméra thermique n'est pas un cas isolé. Palmerius *et al.* [136] proposent quant à eux un dispositif de réalité augmentée projetée pour la détection de sources de chaleur et des échanges thermiques avec l'environnement. Les auteurs projettent sur l'environnement un masque de couleur passant du bleu au rouge afin de révéler les surfaces dont la température est supérieure ou inférieure à la température ambiante, malgré les difficultés de projection d'une image sur un environnement complexe, dans lequel la lumière n'est pas toujours maîtrisée.

11. <https://www.microsoft.com/fr-fr/hololens>

De telles méthodes de visualisation sont aussi envisagées pour la représentation de données géométriques (voir $M[1, 2]$, Tab. 2.3.2).. L'application *Sculpting with Numbers* utilisée pour assister l'utilisateur dans la reproduction d'objet 3D par sculpture d'un bloc d'argile peut être pris pour exemple. Cette fois, la réalité augmentée est utilisée pour projeter une carte de chaleur dont l'échelle de bicolore divergente (Vert/Rouge) code la distance de la surface réelle avec celle du modèle numérique que l'utilisateur reproduit [196]. Uva *et al.* [245] et Ferraguti *et al.* [71] utilisent cette représentation dans le cadre du processus de contrôle qualité d'une surface manufacturée. Les données issues de la mesure sont comparées avec le modèle numérique de conception directement sur la surface fabriquée grâce à la réalité augmentée. Ces deux applications représentent les différences de hauteur par une palette « arc-en-ciel » permettant de localiser et d'évaluer d'un coup d'œil les zones où les écarts géométriques sont importants.

Ce type de visualisation est pertinent pour la création d'une ambiance sensorielle, d'autant plus si elle est utilisée en réalité augmentée. Cependant, le panel des couleurs employées dans les différentes applications n'est pas forcément toujours adapté aux phénomènes représentés qui peuvent induire des erreurs d'interprétation. On constate, par exemple, l'utilisation fréquente d'une palette arc-en-ciel indifféremment pour la mécanique et pour la thermodynamique, dans le cadre de simulations mécaniques alors que les caméras thermiques offrent une palette basée sur les différentes couleurs prises par le fer à différentes températures. Ce choix de couleur paraît plus pertinent pour une communauté ayant une expérience en métallurgie. Il est aussi mentionné que la perception humaine des couleurs est limitée rendant difficile la représentation d'une plage de donnée étendue. Pour cela, Bergman *et al.* [12] suggèrent l'adoption d'échelles non-linaires permettant d'accroître la perception de certaines plages de valeur. En effet, une palette de couleur trop large risque de rendre la lecture de certaines variations difficiles. De plus, l'impossibilité de superposer les couleurs sans en altérer la nuance rendant difficile la représentation de plusieurs données de manière concurrentielle sans qu'elles ne se masquent ou bien même masquent des détails de l'environnement. C'est pourquoi certaines représentations mêlent aux cartes de chaleur un support graphique comme des flèches. Par exemple, l'utilisation de courbes 3D colorées permet de visualiser des modélisations de mécanique des fluides qui combinent un modèle de courant avec un modèle thermique.

La représentation de données peut se faire également par le son. Là où la vue est adéquate pour spatialiser l'information, l'ouïe est adéquate pour créer une représentation temporelle de l'information. Les techniques de représentation de l'information par le son sont désignées par le terme de sonification (voir $M[:, 3]$, Tab. 2.3.2). Les différents types de techniques de sonification sont résumées dans le « *Sonification Handbook* » [241]. On distingue par exemple les « icônes sonores » et « earcons », deux techniques, dont la temporalité est brève, utilisée pour associer un son à un événement ou à une action spécifique. Elles se différencient par la nature du son utilisé. Pour les icônes sonores, le son utilisé pour exprimer une information est un son naturel connu de l'utilisateur comme l'émission d'un clic lors de l'ouverture d'un fichier informatique ; alors que pour les « earcons » l'information est associée à un son synthétique nécessitant une phase d'apprentissage. D'autres techniques permettent de transmettre un flux de données continu grâce à l'utilisation de fonctions de transfert. Ces dernières codent directement les variations de l'information sur différentes propriétés du son tel que la hauteur. Ce type de fonction permet aussi l'attribution de propriétés sonores artificielles à un objet. Il s'agit d'une analogie instrumentale

dans laquelle on fait produire une musique synthétique à un objet. Cette musique est produite à partir de règles prédéfinies qui traduisent les changements de propriété d'un objet en son. La sonification par fonction de transfert est la méthode la plus répandue dans cet état de l'art.

Créer une sonification n'est pas un processus trivial. Tout d'abord, il est nécessaire de choisir la nature du son employé. Ces sons peuvent être naturels (par exemple le bruit du vent que l'on associe à sa vitesse) ou bien synthétiques. Lors de la sélection d'un son, un aspect psychologique est à prendre en compte, car les utilisateurs peuvent avoir des représentations mentales particulières des données liées à leurs expériences passées. Il existe alors des associations plus naturelles comme par exemple associer une augmentation de la hauteur d'un son avec l'augmentation de l'élévation [208]. B.Walker et G.Kramer [254] proposent un premier cadre pour établir et valider une fonction de sonification. Il est d'abord nécessaire de choisir la dimension du son à combiner avec l'information à communiquer. Il est possible d'utiliser différentes dimensions du son pour encoder l'information : la fréquence ou hauteur, le volume sonore, le timbre, la spatialisation, le tempo, la durée... Puis il faut choisir la polarité de cette fonction : est-ce que les variations du son doivent suivre les mêmes variations que l'information ou bien être opposées ? Finalement, il est nécessaire de mettre à l'échelle les variations du son. Il faut pour cela évaluer la correspondance entre l'amplitude des variations sonores et l'amplitude du phénomène perçu. Schuett *et al.* [211] proposent, par exemple, de représenter les variations de la température journalière en faisant varier la fréquence d'un son sinusoïdale devenant plus aiguë lorsque la température augmente. Walker *et al.* [255] font quant à eux le choix de les traduire par une variation du volume sonore. Ce qui illustre qu'il n'existe pas une solution unique pour choisir la bonne métaphore sonore, mais qu'il s'agit d'une évaluation empirique soumise à un contexte particulier (voir *M*[3, 3], Tab. 2.3.2).

D'autres proposent d'utiliser une approche métaphorique, avec par exemple l'expression de la couverture nuageuse qui a un caractère désagréable par un son terne [211]. J.Ferguson *et al.* [70] insiste sur le fait que ces paramètres sont importants pour la réalisation d'une bonne sonification. L'utilisation d'une métaphore sonore est à usage unique et le choix d'une mauvaise métaphore peut avoir des effets négatifs sur la performance de l'utilisateur. C'est le cas notamment du choix d'alarmes sonores systématiques pour les équipements médicaux qui a pour effet de saturer les infirmières dans les hôpitaux résultant par une baisse de la qualité des soins [48].

L'emploi de métaphores sonores est fréquent pour les exercices de rééducation où elles servent notamment pour encoder une distance [53, 158, 206] (voir *M*[1, 3], Tab. 2.3.2). A.Dailly *et al.* [53] mettent en place ce type de stratégie pour des exercices psychomoteur. Pour cela, il encode la différence de position du bras du patient évaluée en temps réel avec la trajectoire demandée par un balancement du volume sonore entre une musique et un bruit sonore désagréable. Loucks *et al.* [135] proposent l'implémentation d'un retour intra-auriculaire de l'effort fourni par un sujet. Ce retour audio est un peu particulier, car l'utilisateur doit comparer en permanence deux sons écoutés simultanément. Un premier son constant est transmis dans une oreille (son de référence) et dans la seconde est produit un son dont les variations encodent l'effort fourni. L'utilisateur doit alors égaliser les deux sons pour atteindre l'objectif demandé. Pour ce genre de dispositif, la caractéristique du son employé est souvent le hauteur pour lequel une différence aussi faible que 5 Hz peut être perçue.

La sonification est une technique intéressante pour sa capacité à superposer plusieurs sources d'information, particulièrement pour aider des personnes malvoyantes à se déplacer [86, 96, 232]. Ce cumul d'information peut être traité de manière séquentielle :

chaque source d'information se voit attribuer un son spécifique et un ordre de présentation. Ou bien si la pression temporelle est importante par exemple pour la surveillance d'un procédé alors l'information peut être présentée en simultanée. Dans ce dernier cas, l'hypothèse qui peut être faite est qu'il est possible de superposer au maximum 3 canaux sonores de communication [211]. En effet, les expérimentations menées dans le cadre de la communication de plusieurs données météorologiques concurrentielles tendent à prouver qu'au-delà l'utilisateur a des difficultés pour capter l'ensemble des informations sans perte. Les performances de l'utilisateur semblent aussi conditionnées par l'expérience musicale de ce dernier. En effet, les auteurs remarquent que les utilisateurs qui jouent de plusieurs instruments ont plus de facilités à distinguer à superposer les sons.

La tactilisation constitue un entre-deux avec la modalité sonore et visuelle. Elle permet de spatialiser l'information plus facilement que la modalité sonore. En effet, l'estimation de la position d'un stimulus tactile se fait de manière proprioceptive au contraire de celle d'un son qui est déduite d'une comparaison binaurale. Cependant, l'estimation de la position d'un stimulus par le canal tactile est seulement subjective. En effet, l'estimation se fait par rapport à la région de la peau en contact avec le stimulus. En comparaison, la vue permet d'estimer l'organisation spatiale d'éléments entre eux. Tout comme la modalité sonore, elle peut capter l'attention de l'utilisateur en manière périphérique, mais elle ne peut cependant communiquer facilement une information quantitative à l'inverse du sonore ou du visuel. Néanmoins, elle offre une grande variété de canaux de communication en proposant un large panel de sensations qui résultent des différents types de terminaisons nerveuses.

En particulier, les sensations cutanées font référence au jugement de la pression, de la courbure d'une forme, de la température ou bien même des vibrations. Il est maintenant aisé de produire ces différentes stimulations en utilisant de petits actionneurs incorporables dans des objets du quotidien comme les smartphones ou directement au contact de la peau de l'utilisateur. Aujourd'hui, les vibreurs constituent l'une des principales technologies utilisées pour produire un retour tactile passif. Ils sont employés dans diverses applications d'aide à la navigation où ils sont utilisés pour encoder une distance (voir $M[1, 1]$, Tab. 2.3.2). Kim *et al.* [123] comparent trois techniques permettant d'encoder la distance d'un obstacle du bout de la canne d'un aveugle. Ces différentes techniques sont la combinaison spatiale ou temporelle de stimuli d'intensité variable. Cette interface permet de coder un total de 4 distances.

Les techniques précédentes font usage des sens pour créer une représentation abstraite de l'information sous forme d'une métaphore directe ou bien codée. Bien que fonctionnelles et efficaces, elles nécessitent que l'utilisateur en apprenne les règles pour en saisir l'information. En comparaison, l'utilisateur est naturellement sensible à certaines des propriétés des phénomènes physiques produits par le procédé de fabrication. Une approche plus naturelle serait de permettre à l'utilisateur de faire l'expérience sensorielle de ce qui est fabriqué. En pratique, cela est impossible étant donné que le cadre de fabrication ou la plage de grandeurs des phénomènes observables est soit trop petit ou soit trop grand, empêchant une telle évaluation. Une approche serait alors de concevoir une interface capable de dupliquer ces phénomènes dans des proportions qui coïncident avec des plages de valeurs qui coïncident avec la perception humaine. C'est pourquoi dans la section suivante nous faisons état d'interfaces faisant une mise à l'échelle de phénomènes de même nature que ceux produits par la fabrication additive.

2.3.2.2 La reproduction des phénomènes physiques

Dans un contexte de fabrication industrielle qui met au cœur l'artisanat hybride, le recours à une représentation physique des données est pertinent. L'exploration d'une géométrie commence généralement par un balayage visuel permettant d'évaluer la position, l'orientation et l'allure. De telles considérations aboutissent à la production de représentations graphiques explicites reprenant tout ou partie des éléments caractéristiques de l'objet étudié. Ces représentations supportent la visualisation des données et peuvent être manipulées pour correspondre au contexte réel. Ce type de représentation est utilisé dans les simulations par éléments finis pour représenter les déformations en 3D d'un matériau sous l'action de contraintes mécaniques. Ces déformations, souvent très petites, sont exagérées pour faciliter la perception. Ce type de représentation permet aussi une visualisation dynamique des données. 3DReshaper [1] introduit dans sa suite de logiciels pour la maintenance des tunnels, une vue de la section d'un tunnel qui supporte le retour d'information des capteurs en mesurant la déformation (voir $M[2, 2]$, Tab. 2.3.2). Ce type de visualisation peut aussi être utilisé en réalité augmentée pour superposer à un objet réel une modélisation des déformations sous l'action de contraintes extérieures [104]. Eriksson *et al.* [62] proposent une tablette comme interface de contrôle nomade. Cette tablette permet des interactions simples comme le positionnement et l'orientation d'un objet à imprimer directement sur le plateau d'impression, mais elle permet surtout un suivi visuel de l'avancement de la fabrication en proposant une visualisation du modèle 3D laissant apparaître l'empilement des couches. Il est possible de détecter l'apparition de défauts macroscopiques par simple comparaison avec le modèle 3D. Ce contrôle de la géométrie est amélioré par Ceruti *et al.* [31], qui permettent la comparaison 3D et la localisation d'erreurs automatiquement identifiées in-situ (voir $M[1, 2]$, Tab. 2.3.2).

Bien que l'on soit capable de juger visuellement des proportions d'un objet, cette capacité n'est pas innée et peut être facilement induite en erreur [129]. Cependant, Gori *et al.* [83] mentionnent que le « toucher calibre la vision », c'est-à-dire qu'il est plus facile d'évaluer une forme visuellement en fonction d'objets dont on a fait l'expérience tactile. Autrement dit, c'est parce que nous avons eu la possibilité de faire l'expérience de différents objets par la manipulation que nous sommes capables de compenser la distorsion visuelle des objets qui nous entourent. De fait, notre jugement sur la géométrie d'un objet n'est fiable que dans l'espace pour lequel il nous est possible d'avoir recours à l'exploration tactile. Il serait alors pertinent de reproduire des conditions permettant de faire l'expérience de ce que l'utilisateur voit.

L'exploration d'un objet dont on est capable d'évaluer la géométrie peut se faire au travers de périphériques haptiques tels que le Phantom [10, 41, 60, 256] (voir $M[1, 1]$, Tab. 2.3.2). Ce dispositif est capable de reproduire avec plus ou moins de fiabilité la force d'interaction de la main avec une surface. Ce type de dispositif permet d'évaluer ponctuellement une surface, et trouve des utilisations particulières pour l'exploration de données topographiques [93, 111, 256] mais aussi pour un usage en conception et en fabrication [10, 41]. En particulier, Bayard *et al.* [10] utilisent une telle architecture pour le diagnostic de surfaces réelles afin d'identifier d'éventuelles différences avec un modèle 3D. Le recours à un bras haptique permet d'améliorer la compréhension des contours de la surface de manière locale. Il permet de discerner les plus petites variations qui seraient difficilement visibles à l'écran. Walker *et al.* [256] reportent, par exemple, que les surfaces régulières sont glissantes alors que les surfaces très irrégulières sont plutôt

collantes, à cause des multiples blocages de l'extrémité du dispositif. Mais il est en revanche inadapté pour explorer une surface dans sa totalité. Dans ce cas, un support visuel est préférable. Lorsque ce type de dispositif est attaché au doigt de l'utilisateur au lieu d'être saisi, il permet une expérience plus réaliste d'exploration tactile [189]. Frisolet *et al.* [72] proposent, par exemple, de faire l'expérience de la courbure d'une surface avec un dispositif haptique. Pour cela, ils ajoutent au bout du dispositif un plateau mobile qui simule la pente de la courbure quand le doigt de l'utilisateur parcourt la courbe (voir *M*[2, 1], Tab. 2.3.2).

Cependant Voggels *et al.* [252] expliquent que l'exploration active du bout du doigt n'est pas toujours la méthode la plus efficace pour découvrir la forme d'un objet. Ils l'opposent à une exploration statique où l'utilisateur peut utiliser la totalité de la surface de sa main en la posant sur la surface ou en saisissant l'objet. La préemption d'un objet est particulièrement intéressante dans notre cadre, car elle permet d'évaluer d'une forme tubulaire, comme le dépôt de matière en fabrication additive (voir *M*[2, 1], Tab. 2.3.2). La saisie d'objets en environnement virtuel est facilitée par l'utilisation d'exosquelettes ou de gants haptiques. Ces dispositifs équipent les mains de l'utilisateur et contraignent les mouvements des différentes articulations de la main pour rendre la saisie réaliste. D'autres dispositifs haptiques se focalisent sur la saisie par pincement. C'est le cas en particulier de Wolverine [39] un système de glissières reliant le pouce à trois autres doigts ou le dispositif proposé par Handa *et al.* [90] qui permettent de recréer les forces d'interaction mises en jeu entre les doigts de l'utilisateur lors de la saisie d'un objet. Par ces dispositifs, il est possible de percevoir la forme de l'objet saisi de manière macroscopique, mais en aucun cas d'en percevoir les plus petits détails.

En revanche, ces détails peuvent être produits par l'ajout de doigtiers au bout des doigts de l'utilisateur. Pacchierotti *et al.* [171] ont recours à une bande de tissu actionnée par deux servomoteurs pour reproduire la sensation d'un doigt qui glisse sur une surface. Benko *et al.* [11] proposent un compromis entre les surfaces déformables et un doigtier en proposant un contrôleur traqué appelé NormalTouch muni d'une petite matrice de picots au contact de l'index permettant l'exploration du bout des doigts. Le rendu de texture se fait aussi de manière passive à l'aide de vibrations. Le dispositif proposé par Strohmeier *et al.* [224] permet de recréer la rugosité de différentes surfaces (lisse, bosselée, accidentée) à partir d'un vibreur monté sur un rail. Pour cela, ils combinent trois dimensions : la densité de stimuli délivrés par le vibreur par centimètre parcouru, l'intensité de ces stimuli et la fréquence du signal vibratoire. Avec ce type d'interface, il devient possible de traduire les petites différences de hauteur présente à la surface d'une géométrie.

Plutôt que d'imposer une interaction au travers d'une surface virtuelle, l'exploration de cartes topographiques peut se faire sur une reproduction physique interactive (voir *M*[1, 1], Tab. 2.3.2). Ce type de support est désigné par le terme de « Paysages Tangibles » (Tangible Landscape en anglais) et constitue un média tangible déformable autour duquel se réunissent plusieurs utilisateurs [150, 185]. La surface est généralement créée dans un bloc d'argile polymère ou bien de sable et un système de projection est utilisé pour y adosser une information numérique. À la manière d'une maquette d'architecture, ces dispositifs ont une bonne résolution et supportent une interaction par façonnage. Ils supportent aussi l'exécution de simulations numériques qui s'adressent à un usage pédagogique comme professionnel. En revanche, la création de la forme initiale nécessite du temps et des moyens automatisés qui rend complexe la transformation dynamique de la géométrie.

À l'inverse, les surfaces tangibles à changement de forme comme FEELEX [110] intègrent des actionneurs qui permettent de reproduire un comportement dynamique [130, 218]. Ces surfaces sont généralement constituées d'une matrice d'actionneurs parallèles permettant la génération de surfaces 3D voxélisées. L'interface est alors un système mécatronique pilotée depuis un ordinateur permettant un comportement dynamique de la surface associée au contenu numérique projetée. Ces interfaces à changement de forme peuvent intégrer des capteurs d'efforts permettant de capter l'interaction de l'utilisateur avec la surface. Le point faible de ces interfaces reste l'encombrement assez élevé pour une surface de petite taille, la faible résolution des voxels et la capacité de rafraîchissement du dispositif que conditionnent les actionneurs.

Pour remédier à l'encombrement des actionneurs, des dispositifs de type "mid-air haptic" créant l'illusion de formes pourraient être utilisés. Le dispositif Airborne Ultrasound Tactile Display [109] est une interface de ce type. Ce dispositif est constitué d'une matrice d'émetteurs à ultrasons mono directionnels dont l'intensité est variable, pour créer une surface invisible à différentes hauteurs par un phénomène appelé pression acoustique qui apparaît à la surface d'un objet quand il vient couper un faisceau d'ultrasons. Grâce à ce principe, il est possible de représenter des surfaces 3D plus ou moins complexes en donnant l'impression à un utilisateur de toucher un objet 3D, en le regardant sur un écran.

Pour les êtres vivants, la perception de la température de l'environnement ambiant ou d'un objet est une capacité innée et consciente appelée *thermoception* (voir $M[3, 1]$, Tab. 2.3.2). Cette perception varie d'un groupe d'être vivant à un autre. Chez l'homme, la perception de la température se fait principalement au travers du toucher. Mais cette perception est subjective et dépend de nombreux facteurs environnementaux. Cependant, la thermoception ne permet pas une évaluation précise de la température, mais elle permet plutôt de percevoir un contraste de température. En effet, les sensations thermiques éprouvées sont en réalité la traduction du transfert thermique se déroulant entre notre peau et la surface touchée. C'est pourquoi, à température égale une surface métallique dont le coefficient de conduction thermique est plus élevé, paraît par exemple au toucher plus froide qu'une surface en bois. La qualification de la température se fait au travers d'adjectifs : brûlant, chaud, neutre, froid, glaciale. Darian-Smith *et al.* [54] précisent qu'il est très difficile de décrire les sensations perçues de manière plus précise. Pour des températures comprises entre 20 et 38 °C, un utilisateur peut percevoir 3 à 10 niveaux de température [100, 269] à condition que la vitesse de variation de la température à la surface de la peau soit suffisamment rapide pour réduire les phénomènes d'acclimatation de la peau.

La perception des sensations thermiques est un sens longtemps négligé pour la création d'interfaces, alors qu'elle est en permanence sollicitée dans le monde réel. La production de stimulations thermiques est aujourd'hui facilitée par la démocratisation des modules de Peltier [141, 178, 203, 234]. Cette technologie permet de générer assez facilement un ressenti thermique froid comme chaud, à partir d'un courant électrique. Ces modules sont particulièrement intéressants pour enrichir la visualisation de phénomènes thermiques. Huber *et al.* [105] propose par exemple une interface tangible à changement de température pour permettre aux visiteurs d'un musée d'expérimenter les températures à la surface du globe à différentes périodes. Tamura *et al.* [234] propose un usage scientifique permettant d'explorer les variations de température dans un modèle de simulation thermique. Les dispositifs de Peltier participent alors au processus de conception en supportant l'exploration des données.

Le recours à la thermoception a aussi un intérêt pour accroître le réalisme de certaines applications de réalité virtuelle qui se limitent habituellement à des effets visuels et sonores pour immerger l'utilisateur. Dans ThermoVR [178] et AmbioTherm [194], des stimulations thermiques sont produites sur le visage et la nuque afin de reproduire les sensations produites par différentes conditions météorologiques. L'utilisation de la thermoception permet aussi la création d'une ambiance qui permet d'augmenter l'engagement des utilisateurs dans la réalisation de certaines tâches. La thermoception joue aussi un rôle dans la téléopération en intégrant une composante thermique dans l'expérience du toucher virtuelle [99]. En effet, les premiers instants de l'expérience du toucher d'une surface (perception de la texture, identification du matériau) engagent la perception thermique. C'est pourquoi, la reproduction des échanges thermiques est un verrou technique pour le rendu tactile, réaliste des matériaux. Différents dispositifs maître-esclave ou modèles de simulation font appel à des modules de Peltier afin de recréer les échanges thermiques qui devraient être perçus au contact du doigt de l'utilisateur avec le matériau. Ce type de rendu thermique réaliste est étudié, par exemple, pour augmenter le réalisme des simulations virtuelles et de perception tactile pour la téléopération.

En revanche, les stimulations thermiques sont rarement utilisées pour communiquer une température réelle ou comme un moyen de communication en continu d'informations, en particulier quantitatives. Ces stimulations sont cependant utilisées pour produire un signal tout-ou-rien. L'utilisateur est alors amené à comparer des températures ou à percevoir un changement de température afin de traduire un changement d'état. Dans les travaux menés par *Tewell et al.* [240], l'utilisateur doit sortir d'un labyrinthe à l'aide d'une sensation thermique qui reste chaude tant que l'utilisateur reste sur le chemin le plus court, mais se refroidit progressivement, lorsque la distance augmente de nouveau. L'attention de l'utilisateur n'est pas capturée instantanément, mais progressivement en lui laissant potentiellement le temps de reprendre le bon chemin avant d'être de nouveau alerté. Ce mode de communication se caractérise cependant par un temps de réaction long et ne permet pas de représenter l'information avec beaucoup de précision étant donné que l'utilisateur a une perception relative d'une quantité plutôt qu'une perception absolue.

2.3.2.3 Les interfaces multisensorielles

L'expérience du toucher démontre que nous prenons connaissance de l'environnement qui nous entoure en fusionnant l'ensemble des perceptions produites par nos sens. Chaque modalité apporte un nouvel aspect des propriétés de l'environnement qui forme alors un tout. Qu'en est-il alors pour la représentation des données de phénomènes physiques qui nous sont habituellement invisibles ?

Les interfaces multi-sensorielles sont un moyen de transmettre l'information à l'utilisateur en intégrant un maximum de sens [9]. Le retour multisensoriel est décrit comme une solution pour proposer une interface plus naturelle et permettant de réduire la charge cognitive visuelle de l'utilisateur. L'objectif final de ces interfaces est de proposer une technique pour augmenter la quantité d'informations captées par l'utilisateur, en considérant que chaque modalité dispose de sa propre bande passante.

Bien que les interfaces multi-sensorielles permettent une présentation redondante de l'information, on s'intéresse plutôt à une présentation complémentaire de l'information, pour la création d'une ambiance sensorielle. Chaque modalité d'information apporte alors un nouvel élément d'information à un tout. Ce type d'interface est représentatif de notre

perception naturelle de l'environnement. Elle permet un retour complet de l'information à condition que l'utilisateur soit capable de synthétiser l'ensemble des stimuli. Dans le cas contraire, l'information perçue n'est alors que partielle. Cette interface correspond à une interface de rendu réaliste où plusieurs modalités permettent de recréer des sensations réelles [98]. C'est ce que propose la combinaison de plusieurs modalités tactiles et visuelles pour la discrimination de matériau en environnement téléopéré.

Dans notre contexte de fabrication additive, il s'agit plutôt de représenter plusieurs informations de manière concurrentielle. Cela fait référence au travail de Harding *et al.* [93] qui proposent une combinaison d'un retour haptique, visuel et audio pour faciliter l'exploration de cartes géologiques et permettre leur analyse. On peut aussi citer les interfaces à changement de forme qui profitent de l'élévation de la surface pour superposer en réalité augmentée la représentation visuelle d'une seconde variable dont l'interprétation est facilitée par l'appréciation de la surface [150, 185, 218].

L'une des limites lors de la conception d'interfaces multimodales est de considérer les sens comme des canaux de perception indépendants. Il faut au contraire se méfier des connexions qui peuvent exister entre les différents sens au moment de la capture de l'information nerveuse. Certaines associations sensorielles provoquent alors des perceptions synesthésiques, c'est-à-dire associées [220]. Ce phénomène est étudié au travers de l'intégration multi-sensorielle, une branche de la perception qui s'intéresse à l'interaction des différentes modalités sensorielles sur la perception générale de l'utilisateur. Il s'agit d'étudier comment les sens contribuent les uns aux autres dans l'expérience vécue. Ces connexions entre les différents sens sont appelées interactions ou correspondances inter-modales.

Selon Spence *et al.* [222], elles désignent la tendance d'une perception sensorielle à être associée ou influencée par les perceptions provenant de modalités distinctes.

Nous présentons dans la suite plusieurs exemples identifiés pouvant modifier la perception des phénomènes physiques. Tout d'abord, les premières interactions inter-modales identifiées concernent la perception de la température. En premier lieu, H. Ho et D. Iwai [100] ont établi, l'existence d'un processus mental connectant la thermoception et de la perception des couleurs (voir *M*[2, 3], Tab. 2.3.2). Ce constat suppose qu'il soit culturellement établi que le rouge est une couleur chaude et le bleu une couleur froide. Et cette particularité culturelle agit directement sur la perception des objets touchés. Ainsi un objet de couleur bleu est plus rapidement perçu comme chaud qu'un objet à la même température de couleur rouge. La raison de ce résultat contre-intuitif est que le cerveau est trompé dans l'interprétation de l'influx nerveux par la vue qui induit une diminution du seuil de détection du chaud. Par contre, la réaction opposée est constatée lorsque c'est la main de l'utilisateur qui est colorée en bleu ou en rouge. Le cerveau est cette fois induit en erreur par la coloration que prend notre peau, lorsque nous avons très froid ou très chaud. Au vu de ce constat, il est possible d'imaginer d'autres interactions sensorielles. C.Wang *et al.* [260] ont mesuré que les utilisateurs associent majoritairement des sons plus aigus à l'idée de boire une boisson fraîche que chaude. C.Traube [243] essaye d'établir les propriétés du son associées à l'idée d'un son froid. Ainsi, un son froid est majoritairement associé aux descripteurs des sons métalliques, c'est-à-dire des sons plutôt aigus, forts et non vibrés alors que les sons chauds sont plutôt graves, bas et vibrants. Ces descripteurs permettent ainsi de classer les instruments permettant alors d'être utilisés en sonification pour évoquer une température (voir *M*[3, 3], Tab. 2.3.2). De tels descripteurs sont aussi associés à certaines odeurs comme le met en évidence l'étude ethnique de Wnuk *et*

al. [270], qui montre que les sujets de l'expérimentation associent unanimement certains parfums à l'idée d'une sensation froide ou chaude, suivant leurs origines culturelles. Par exemple, la banane est associée au froid pour les Thaïlandais qui la considère comme un fruit rafraîchissant (voir $M[3, 4]$, Tab. 2.3.2).

Ensuite, d'autres interactions ont été constatées entre les sons et la perception des formes (voir $M[2, 3]$, Tab. 2.3.2). E. Sapir [202] observe l'interférence de certains phonèmes sur la perception visuelle des formes géométriques. Il a établi qu'il existe une correspondance entre la perception des sons 'i' et 'a' respectivement associée à des objets de petite ou de grande taille. Sweeny *et al.* [230] remarquent que la perception du ratio largeur/hauteur d'une ellipse est affectée par l'écoute simultanée d'un son *woo* qui rend cette ellipse perceptiblement plus large alors que l'écoute d'un son en *wee* la rend perceptiblement plus grande. De telles correspondances sont aussi reportées dans l'analyse de C. Traube [243] sur les sons froids, pour lesquelles certaines notes de musique sont associées à des formes minces, rondes, ouvertes ou bien fermées. Une explication est liée à la forme prise par la bouche quand nous prononçons des mots utilisant ces phonèmes. Des associations entre formes et odeurs [248], et entre formes et goûts [247] ont aussi été observées (voir $M[2, 4]$ et $M[2, 5]$, Tab. 2.3.2). Ainsi, il a été rapporté que l'odeur de la vanille et les goûts sucrés sont associés à des formes plutôt arrondies alors que l'odeur du poivre et l'acidité sont associées à des formes anguleuses. Ces associations sont probablement expliquées par une relation hédonique qui lie ces aspects géométriques au sens du goût et de l'odorat. En effet, les formes anguleuses sont jugées comme plus désagréables que les formes rondes et ce sentiment est partagé avec les réactions procurées par le sucré ou l'odeur de vanille comparés à celle de l'acidité ou de l'odeur de poivre.

Bien que ces interactions peuvent être perçues comme contraignantes, elles restent particulièrement intéressantes pour la création d'une ambiance sensorielle, car elle prédispose l'individu à percevoir certaines sensations plus intensément ou au contraire de les amoindrir. Plusieurs exemples peuvent illustrer l'intérêt d'intégrer ce type de relations. G. Chinazzo *et al.* [36] utilisent les interactions entre la couleur et la thermoception pour influencer le ressenti thermique d'un utilisateur. Pour cela, l'utilisateur est équipé d'un casque de réalité augmentée, qui place devant ses yeux un voile orangé, pour de rendre la température ambiante ressentie plus chaude, voire plus inconfortable qu'en réalité. L'utilisation des perceptions intermodales peut aussi remplacer des sensations absentes. Hirao *et al.* en font la démonstration en créant l'illusion de l'effort à fournir pour déplacer un objet lourd sans avoir recours à un dispositif haptique [98]. Pour cela, ils reproduisent un ensemble de sensations éprouvées par un utilisateur dans le monde réel à l'exception des sensations haptiques. Ils reproduisent par exemple le déplacement lent d'un objet qu'on essaye de soulever par une illusion d'optique et ainsi que les tremblements que produirait le maintien d'un tel objet en hauteur. Pour compléter la scène, certaines réactions du corps sont simulées pour renforcer l'illusion d'effort intense : la main de l'utilisateur est colorée en rouge comme s'il serre fort l'objet et un bruit de rythme cardiaque accéléré est émis.

Concernant, le goût et l'odorat sont deux sens très peu explorés dans le cadre de la perceptualisation de données abstraites (voir $M[:, 4]$ et $M[:, 5]$, Tab. 2.3.2). La première difficulté est de créer des stimuli gustatifs ou olfactifs : c'est une problématique majeure pour être applicable dans un contexte de fabrication. Pour créer ces stimuli, la méthode la plus simple consiste aujourd'hui à utiliser des procédés de synthèse pour créer des extraits concentrés. Ces extraits sont ensuite dispersés via des systèmes de diffusions placés dans la bouche ou à proximité du nez de l'utilisateur qui peuvent être encombrants voir désagréables. L'utilisation d'espèces chimiques préfabriquées est de plus une contrainte

qui limite la variété de stimuli pouvant être créés. De plus, la dispersion de ces espèces chimiques nécessite des précautions vis-à-vis de la santé de l'utilisateur. Des précautions doivent aussi être prises lorsque plusieurs essences sont utilisées simultanément. En effet, la diffusion des parfums à une inertie lente et il faut attendre qu'une odeur ou qu'un goût s'estompe avant de soumettre une nouvelle essence.. Il en résulte un dernier inconvénient : le mélange des goûts ou des odeurs peut rapidement indisposer l'utilisateur, provoquant des maux de tête et des nausées.

En revanche, les odeurs, voire le goût, peuvent participer efficacement à la création d'une ambiance sensorielle. Notamment pour la création d'un système d'alerte où l'odorat est retenu pour ces capacités à déclencher des réactions instinctives de l'utilisateur. Wang *et al.* [259] proposent un dispositif d'alerte pour la maintenance préventive. Pour les dimensions physiques qui nous intéressent, ces alertes sont produites principalement par des associations sémantiques comme l'odeur de brûlé [214] ou des arômes spécifiques [270] qui rappellent aux utilisateurs des sensations particulières. Cependant, ces associations sont généralement stéréotypées et dépendent donc de la culture de la population d'utilisateurs cibles.

2.3.3 Le choix de la modalité tactile

Le contexte industriel impose des contraintes supplémentaires sur le système notamment sur l'encombrement du dispositif, la mobilité de l'utilisateur et sur la pertinence des modalités de perceptions employées pour faire percevoir les critères de fabrication. Ces contraintes sont imposées par le procédé employé, la configuration de la machine et l'opérateur.

2.3.3.1 L'opérateur : mobilité et sécurité

Pour la production de pièces mécaniques de petites dimensions, on a recours à des machines dont le procédé de fabrication génère un dépôt de matière de faible épaisseur (inférieur au millimètre, exemple impression 3D plastique et SLM). Pour ce type de procédé, les machines sont plutôt compactes et intègrent les équipements de mise en œuvre (baie de commande, éléments robotisés) directement dans la machine. L'opérateur peut s'assurer du bon fonctionnement par une inspection macroscopique de la pièce mécanique au cours de la fabrication. Cette inspection se fait par le biais d'une fenêtre ou d'une caméra donnant sur le plateau d'impression. L'opérateur a la possibilité d'avoir un aperçu limité à un seul côté de la pièce et sur la couche qui est en cours de fabrication. Pour ce type de machine, la fabrication est relativement longue. L'opérateur n'est pas toujours devant la machine (mobilité importante) sauf pour en vérifier le bon fonctionnement (statique et à proximité des équipements de contrôle). Cette configuration concerne aussi les procédés de fabrication additive métallique mettant en œuvre des sources de haute énergie (laser ou arc électrique). Ces procédés utilisant des poudres (toxicité, risque explosif), confinées pour des raisons de sécurité. La proximité avec la pièce en fabrication est généralement très limitée et se fait par le biais d'un retour vidéo ou au travers d'une vitre.

La production de pièces mécaniques de taille intermédiaire fait appel à des équipements dont l'agencement est de la dimension d'une pièce entière. Dans ce type de cellule, l'outil de fabrication est mis en œuvre par un bras robotisé ou par des portiques. Pour ce type de cellule, l'accès au volume de travail du robot est restreint durant la mise en œuvre du robot, car le volume de travail du robot est une zone de danger pour l'opérateur : le robot se déplace à vitesse élevée et n'a pas conscience de la présence d'un opérateur.

Ce type de cellule est employé pour des procédés de fabrication tels que les procédés de fabrication par cordon de soudure à l'arc pour lesquels la taille du dépôt de matière est supérieure au millimètre. Pour ces procédés, l'opérateur est libre de se déplacer autour du plateau de fabrication et d'effectuer un contrôle visuel de la couche en cours de fabrication. L'opérateur est donc plutôt mobile et peut adopter plusieurs points de vue. La fabrication se déroule sous sa surveillance constante à l'aide d'un poste informatique dédié et/ou un boîtier de commande mobile lui permettant d'interagir avec le robot.

La production de pièces mécaniques de grande taille par exemple en fabrication additive béton utilise des machines dont la structure peut être mobile pour être mise en œuvre directement sur chantier. En effet, la pièce mécanique est construite directement sur site, car ses dimensions la rendent difficilement transportable. Le procédé est constamment surveillé par l'opérateur qui peut donc se trouver en permanence à proximité de l'outil de fabrication. Cependant, l'inspection visuelle peut être rapidement difficile. En effet, les dimensions et particulièrement la hauteur de la pièce peuvent rapidement empêcher l'opérateur d'avoir une vue directe sur l'ensemble de la pièce mécanique fabriquée. Dans ce type d'environnement, une interface de perception fixe semble contre-indiquée pour confronter les données mesurées lors de la fabrication à la réalité de la pièce en cours de fabrication.

Les conditions de travail en milieu industriel définissent un ensemble de règles de sécurité concernant l'opérateur et ses pratiques. L'opérateur a besoin sur le lieu d'exploitation des machines de revêtir différents équipements de sécurité. Ces équipements gênants sont les chaussures de sécurité et une tenue de travail couvrant les jambes et les bras de l'opérateur. Pour certains procédés de fabrication par exemple, les procédés de fabrication par projection de poudre (machine BeAM¹²), l'opérateur est équipé d'une tenue intégrale réduisant son exposition aux particules fines. Certains équipements additionnels peuvent être nécessaires comme le port d'un casque de sécurité dans le bâtiment, de gants pour la manutention des équipements qui peuvent être une contrainte supplémentaire. Certaines interdictions peuvent être émises pour limiter le port d'accessoires (comme les bagues, par exemple). Ces réglementations contraignent largement le recours à certains dispositifs portés par l'opérateur notamment portés sur les mains.

La mise en œuvre de ces machines est aussi source de différentes nuisances environnementales, notamment visuelles, sonores ou de pollution atmosphérique. C'est le cas des procédés de fabrication additive métalliques pour lesquels la fusion du métal nécessite l'utilisation d'un laser ou d'un arc électrique nécessitant des équipements de protection optiques (verres teintés) pour être observées directement par l'opérateur. Cette pollution limite la faisabilité d'une augmentation visuelle de la pièce durant le fonctionnement du procédé sans considérer de moyens particuliers de protection. Les éléments robotisés, les systèmes de ventilation de différents actionneurs sont aussi des sources de pollution, mais cette fois sonore. Ce niveau de pollution peut être suffisamment élevé pour diminuer l'efficacité des dispositifs de sonification ou d'alertes sonores. Ce qui nécessite de prendre certaines précautions pour recourir à cette modalité en utilisant par exemple des dispositifs auditifs personnels.

12. www.beam-machines.fr/

2.3.3.2 La modalité vibrotactile

Dans l'espace de conception (Tab. 2.3.2, nous remarquons que la seule modalité identifiée qui offre une technique unique pour l'ensemble des phénomènes physiques étudiés est la modalité visuelle. Ceci n'est pas surprenant étant donné que la surveillance formelle des procédés industriels de fabrication se fait principalement au travers de deux sens la vue et l'ouïe. D'une part, les données liées aux capteurs évaluant le fonctionnement des outils sont principalement remontées à l'utilisateur par la baie de commande du procédé sous une forme textuelle ou graphique. L'avantage de ces visualisations est de permettre à l'opérateur d'avoir rapidement un retour sur l'évolution temporelle du système. Il peut être aussi prévenu par différentes alertes sonores de l'état du système par exemple les bips de démarrage ou de fin d'exécution du programme machine, ou les bruits produits par le procédé. D'autre part, nos observations faites lors de fabrications réalisées sur la plateforme Addimadour montrent que le suivi du procédé est principalement basé sur une appréciation visuelle. Il se fait par la perception de variation d'intensité lumineuse de la source d'énergie, par l'apparition d'étincelles ou le constat d'un défaut géométrique lorsque le procédé est à l'arrêt. Il est aussi parfois sonore comme par la captation des variations du bruit que produit l'arc électrique.

L'importance du canal visuel et auditif est renforcée par les données synthétisées par Gallace *et al.* [75] où l'on remarque que la vue et l'audition sont les deux canaux permettant le plus grand débit d'informations. En revanche, la vue a une grande propension à capturer l'attention, en comparaison avec l'ouïe ou le toucher et nécessite que l'information soit placée dans le champ visuel pour être captée. Gallace *et al.* rappellent qu'un peu plus de 55% de la capacité sensorielle totale est allouée au traitement des informations visuelles.

Les contraintes d'accessibilité à la scène de fabrication et la durée extensive des procédés de fabrication font que l'opérateur ne peut pas rester attentif en permanence sur le procédé. Or, cette attention conditionne la perception consciente de l'information retournée par nos sens [233].

C'est pourquoi il est intéressant d'envisager une modalité qui puisse capturer momentanément l'attention de l'utilisateur sans être localisée dans son champ d'intérêt. La sonification et la tactilisation sont les techniques de perceptualisation pertinentes dans ce contexte de fabrication. Concernant la sonification, il s'agit d'une technique prometteuse qui est traitée dans la thèse de Maxime Poret qui travaille sur le même ensemble de critères de fabrication additive en composant à la fois des sons synthétiques et naturels pour produire une ambiance sonore. Les premiers résultats sont encourageants et sont reportés dans [188]. Concernant la tactilisation, Cauchard *et al.* [30] ont montré l'adéquation de la modalité vibrotactile en condition de mobilité. Nous proposons donc d'utiliser la modalité vibrotactile comme modalité pour l'augmentation passive de la fabrication additive.

Nous proposons donc de créer une ambiance vibrotactile pour la surveillance des procédés. D'une part, car l'analyse précédente montre qu'elle n'est pas contraire aux contraintes de la tâche visée. D'autre part, car c'est une modalité disponible pour l'opérateur dans la situation de surveillance de la fabrication additive et éventuellement en périphérie de l'attention. Cette ambiance doit alors minimiser l'attention tant que la fabrication se déroule normalement et devenir saillante lorsqu'il est nécessaire d'informer l'utilisateur de la survenue d'un dysfonctionnement.

En conclusion de ce chapitre, nous avons montré que la mise en œuvre industrielle est actuellement rigide en rendant difficile toute modification de ce qui est fabriqué. Or la production de pièces mécaniques personnalisées à la demande, par un procédé dont la mise en œuvre produit beaucoup d'erreurs est un problème. C'est pourquoi nous proposons une modification de cette Chaîne Numérique par une interaction suivant le paradigme de la Fabrication Interactive. Cependant, ce cadre est proposé au bénéfice d'un processus de conception et non de celui de la fabrication d'un produit fini. Pour cela, il est nécessaire d'apporter des outils qui font bénéficier l'opérateur de ce type de procédé d'un retour lui permettant de contrôler la qualité de ce qui est fabriqué.

Nous proposons alors de créer une ambiance sensorielle vibrotactile permettant de faire percevoir à l'opérateur l'évolution des phénomènes physiques et géométriques liés à la mise en œuvre de ces procédés. Pour définir une ambiance sensorielle pour la modalité vibrotactile, il faut concevoir une interface de communication vibrotactile qui soit capable de transformer l'information en stimuli vibrotactiles. Nous nous intéressons donc dans le chapitre suivant aux différentes techniques employées pour la conception d'une interface de communication vibrotactile.

Chapitre 3

Conception d'interfaces vibrotactiles

Ce chapitre est consacré à une catégorie d'interfaces tactiles appelées interfaces vibrotactiles. Nous proposons ici de passer en revue à partir de l'état de l'art sur ces interfaces les différentes dimensions dimensions vibrotactiles (fréquence, intensité, forme de l'onde, durée et position) des signaux vibratoires utilisés pour communiquer de l'information à un utilisateur. À partir de cette revue de la littérature, nous identifions 21 caractéristiques qualifiant une interface vibrotactile. Puis, nous présentons TacTool, un outil d'aide à la conception d'interfaces de communication vibrotactile. TacTool permet de trier dynamiquement un ensemble de 181 recommandations à partir des 21 caractéristiques. Ce chapitre se termine avec les limites actuelles de TacTool et les perspectives d'amélioration de cet outil.

3.1 État de l'art sur les interfaces de communication vibrotactile

Pour représenter efficacement de l'information par des stimuli vibrotactiles, il est nécessaire d'adresser simultanément la création de stimuli vibrotactiles, l'architecture matérielle du dispositif permettant de générer ces stimuli et la représentation de l'information.

3.1.1 Comment produire des stimuli distinguables les uns des autres ?

Une vibration est un phénomène mécanique qui résulte du mouvement oscillant d'une masse autour d'un point d'équilibre. Les vibrations produites dans les interfaces vibrotactiles sont des vibrations forcées produites par des actionneurs au contact de la peau. Ces vibrations peuvent alors être modélisées par des fonctions sinusoïdales aussi appelées harmoniques. Ces vibrations sont décrites principalement par deux propriétés physiques fondamentales pour la perception des stimuli vibrotactiles : l'amplitude et la fréquence. L'amplitude désigne le déplacement maximal d'un point à la surface de l'objet en vibration et la fréquence exprime la répétition dans le temps de ce phénomène. À

partir du modèle de la MS-Taxonomy [161], nous discutons de l'utilisation des stimuli vibrotactiles suivant trois types de métaphores : directe, temporelle et spatiale.

3.1.1.1 Les métaphores directes

Directe qualifie métaphore vibrotactile l'expression de l'information directement par les propriétés sensorielles du signal vibratoire. Autrement dit, l'utilisation des différentes sensations que procurent différents niveaux d'intensité ou de fréquence.

La perception des vibrations Elle repose sur un processus nerveux complexe qui commence au niveau de la peau. Deux types de peau recouvrent le corps humain : la peau glabre que l'on retrouve principalement sous les doigts, la paume de la main et sur la plante des pieds ; et la peau velue qui recouvre le reste du corps [127].

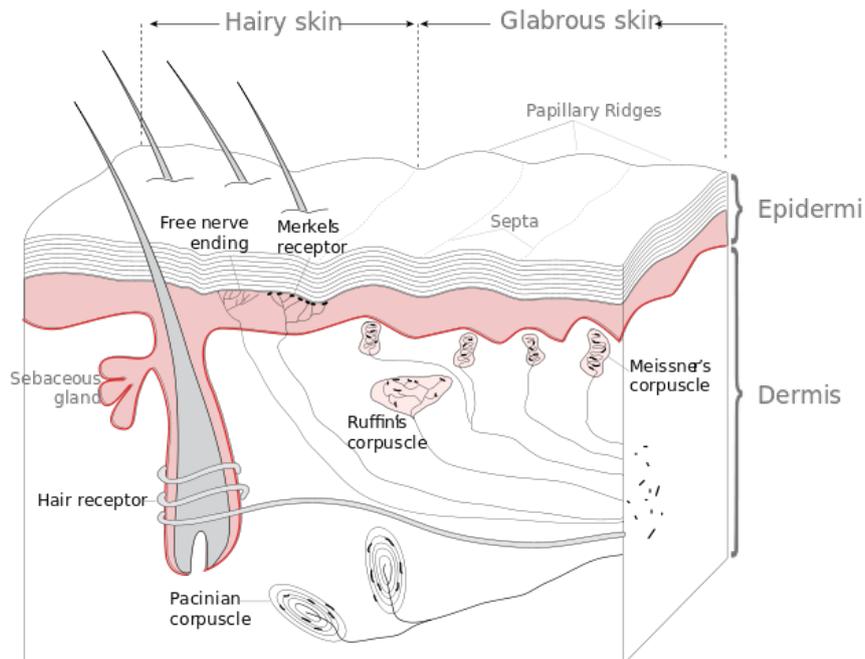


FIGURE 3.1 – Structure de la peau glabre et velue. (Par Thomas Haslwanter CCBY-SA3.0 [94]).

Une grande partie des connaissances sur la perception tactile humaine sont extraites des études sur la peau glabre de la main. De ces études, il découle la théorie des quatre canaux [15]. Ce modèle décrit 4 types de mécanorécepteurs : les corpuscules de Pacini, les corpuscules de Meissner, Ruffini et les disques de Merkel. Ces mécanorécepteurs sont stimulés par différentes déformations de la peau et répondent donc à différentes stimulations mécaniques (Fig. 3.1). Ces récepteurs nerveux sont regroupés dans deux catégories : les récepteurs à adaptation lente (SA) et les récepteurs à adaptation rapide (RA) (Tab. 3.1).

Les récepteurs à adaptation lente sont sensibles aux stimuli maintenus. Ils permettent de ressentir par exemple l'étirement de la peau ou les irrégularités à la surface d'un objet. Les récepteurs à adaptation rapide sont sensibles aux changements rapides et sont spécialisés dans la perception des vibrations comprises entre 10 et 1000 Hz. Les corpuscules de Meissner (RA I) sont sensibles à des stimuli vibratoires ayant une fréquence de 10 à 200 Hz environ. Pour les fréquences plus élevées (70 à 1000 Hz), ce sont les corpuscules de Pacini (RA II) qui sont stimulés. Pour la peau velue, la perception des vibrations résulte principalement des récepteurs de Pacini. Cette perception est complétée par des récepteurs situés à la base des poils facilitant la perception de vibrations des plus basses fréquences [127].

Mécanorécepteurs	Adaptation	Localisation	Fréquence	Pic de réponse	Sensations
Disques de Merkel	Lente (SA I)	Peau glabre et velue	< 100 Hz	5 - 15 Hz	Petits mouvements
Corpuscules de Ruffini	Lente (SA II)	Peau glabre et velue	< 100 Hz	< 10 Hz	Éirement
Corpuscules de Meissner	Rapide (RA I)	Peau glabre	10 - 200 Hz	Env. 40 Hz	Tapotements, papillonnements
Corpuscules de Pacini	Rapide (RA II)	Peau glabre et velue	70 - 1000 Hz	Env. 250 Hz	Vibrations
Follicule pileux	Rapide (RA)	Peau velue	< 100 Hz	(Env. 50 Hz)	Frottements

TABLE 3.1: Caractéristiques des différents mécanorécepteurs permettant la perception des déformations de la peau.

Un certain niveau d'amplitude a besoin d'être atteint pour qu'un stimulus vibratoire soit perçu. Ce niveau est appelé *seuil de détection* et représente la plus petite intensité pour qu'un stimulus soit perceptible. Ce seuil a été mesuré pour différentes parties du corps [15, 44, 142, 154, 212]. Le seuil de détection varie principalement en fonction de la fréquence du stimulus et il est déterminé pour le récepteur ayant la réponse la plus basse [15]. Pour des fréquences inférieures à 80 Hz, ce seuil varie très peu. Il peut être considéré comme constant avec tout de même un pic de réponse situé entre 30 et 50 Hz. Pour des fréquences supérieures, ce seuil suit une courbe en U avec un pic de réponse observé entre 200 et 300 Hz. Pour les corpuscules de Pacini, il est de plus observé un phénomène de sommation spatiale et sommation temporelle des stimuli qui a pour effet de diminuer le seuil de détection d'un stimulus. Pour comprendre ces deux phénomènes, il faut s'imaginer qu'un niveau suffisant d'énergie doit être atteint pour déclencher un ressenti. La sommation spatiale correspond à une baisse du seuil de détection par la contribution instantanée d'un plus grand nombre de mécanorécepteur pour atteindre ce niveau d'énergie. La sommation temporelle correspond à une baisse du seuil de détection par l'accumulation localisée d'énergie dans le temps. La sensibilité de la peau à un stimulus s'améliore pour une plus grande surface et une plus longue durée de stimulation [80]. Pour des raisons pratiques, les interfaces de communication se limitent généralement à des fréquences comprises entre 10 et 300 Hz [20].

Les sensations ressenties Elles sont produites par les différents mécanorécepteurs en fonction de la fréquence du signal vibratoire. Ces sensations sont principalement séparées en deux groupes [40, 51, 68]. Pour les fréquences inférieures à l'intervalle de 80-100 Hz, les stimuli vibratoires procurent plutôt à l'utilisateur des sensations de frottements ou de tapotements. Pour les fréquences supérieures à l'intervalle de 80-100 Hz, l'utilisateur perçoit des vibrations bien distinctes. Cependant, cette séparation reste floue. En effet, le passage d'un type de sensation à un autre n'est pas du tout ou rien. Un troisième groupe est mentionné par Tan *et al.* [237] pour les stimuli d'une fréquence inférieure à l'intervalle 6-10 Hz. Ces stimuli procurent quant à eux la sensation d'un objet produisant des mouvements lents à la surface de la peau (Fig. 3.2, axe horizontal).

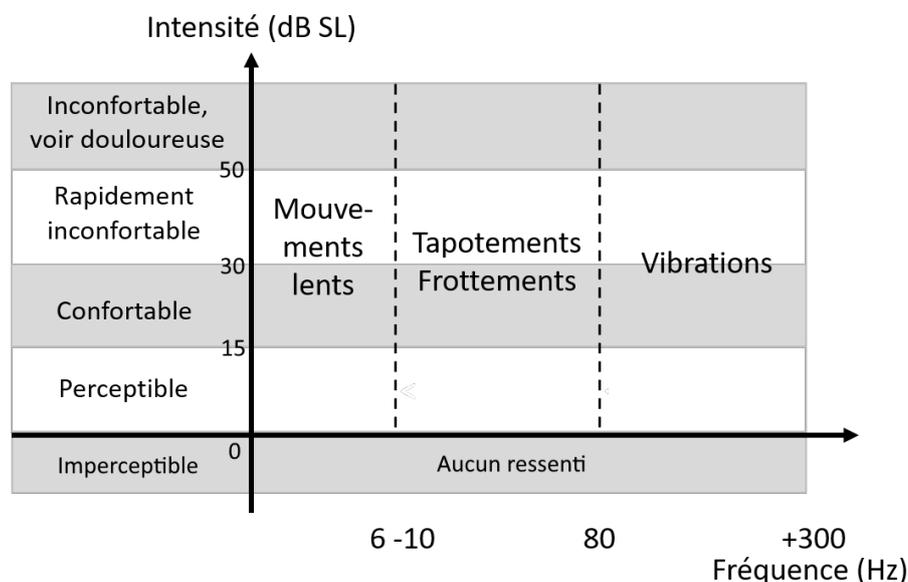


FIGURE 3.2 – Les différents axes perceptuels des stimuli vibrotactiles.

Finalement, ces sensations sont aussi distinguées par l'utilisateur en fonction de leur intensité (Fig. 3.2, axe vertical). Pour une fréquence donnée, l'intensité réelle d'un stimulus suit l'augmentation en amplitude du signal vibratoire¹. Pour faciliter la comparaison entre les différentes régions du corps, l'intensité d'un stimulus est souvent exprimée en décibel au-dessus du seuil de détection (dB SL). Il est souvent conseillé de limiter le niveau d'intensité afin de produire des stimuli qui restent confortables pour l'utilisateur. Le niveau d'intensité idéal se trouve en général entre 15 et 30 dB SL [68]. En dessous de 10 dB SL, les stimuli sont en général difficilement perceptibles et peuvent être utilisés pour créer des dispositifs de communication reposant sur l'attention périphérique [183]. En revanche au-dessus de 55 dB SL, les stimuli deviennent rapidement inconfortables pour l'utilisateur. Ils peuvent parfois même être douloureux provoquant une irritation cutanée accompagnée de démangeaisons [153].

Cependant, il faut noter qu'une augmentation de l'*intensité réelle* des vibrations ne se traduit pas nécessairement par une augmentation de l'*intensité ressentie* par l'utilisateur. La relation entre intensité réelle et intensité ressentie est décrite par la Loi de Steven [112]. Il est observé qu'une augmentation de l'intensité ressentie dépend grandement de la fréquence du stimulus. Pour les parties du corps avec une moins bonne perception, l'intensité ressentie tend à augmenter plus rapidement. Il est alors conseillé lors de la sélection des stimuli, particulièrement si l'on combine plusieurs niveaux d'intensité et de fréquence, d'évaluer l'intensité ressentie par l'utilisateur. Pour cela, il est conseillé de réaliser une petite expérimentation perceptuelle en demandant à l'utilisateur de réaliser une comparaison systématique deux à deux de l'ensemble des stimuli [66]. Il est aussi possible de recourir à des abaques décrivant l'évolution de l'intensité ressentie en fonction de la fréquence et de l'amplitude des stimuli (voir par exemple l'abaque réalisé par Verillo *et al.* [250] pour l'éminence thénar).

La discrimination des niveaux d'intensité et de fréquence L'utilisation de l'intensité et de la fréquence permet de créer des stimuli qui soient distinguables par l'utilisateur (Fig. 3.3). Il est cependant nécessaire de déterminer de combien l'intensité ou la fréquence du stimulus ont besoin d'être augmentées ou diminuées pour qu'un changement soit perceptible. Dans les études psychologiques, cette quantité est désignée par le terme de *seuil de discrimination*, aussi appelé JND (Just Noticeable Difference). Ce seuil de différence est souvent rapporté par la fraction de Weber.

Choi *et al.* conseillent d'augmenter ou diminuer l'intensité ou la fréquence de 20 à 30% entre deux niveaux pour créer une différence perceptuelle suffisante. Ainsi, un utilisateur est capable de distinguer de manière relative entre 10 et 20 niveaux d'intensité [43, 77, 225] et de 8 à 10 niveaux de fréquence [114, 216]. De plus, Stronks *et al.* [225] ont observé que le nombre de niveaux d'intensité distinguables par l'utilisateur est facilité par une plus grande surface de contact. En revanche, un utilisateur est seulement capable d'identifier de manière absolue (et pas seulement de distinguer) au maximum de 2 à 4 niveaux d'intensité [20, 261] et de fréquence [216].

La perception d'une différence d'intensité ou de fréquence est conditionnée par l'âge des utilisateurs [44, 249] ainsi que la condition de la peau. La densité de poils [115], la proportion de masses adipeuses [13], la température de la peau [16] sont autant de paramètres affectant la perception des stimuli. Des différences structurelles entre les différentes parties du corps sont aussi à l'origine de ces différences [154], notamment entre la peau glabre et la peau velue. Le seuil de détection peut alors être jusqu'à 10 fois plus élevé

1. C'est pourquoi amplitude et intensité réelles sont souvent confondues dans la littérature.

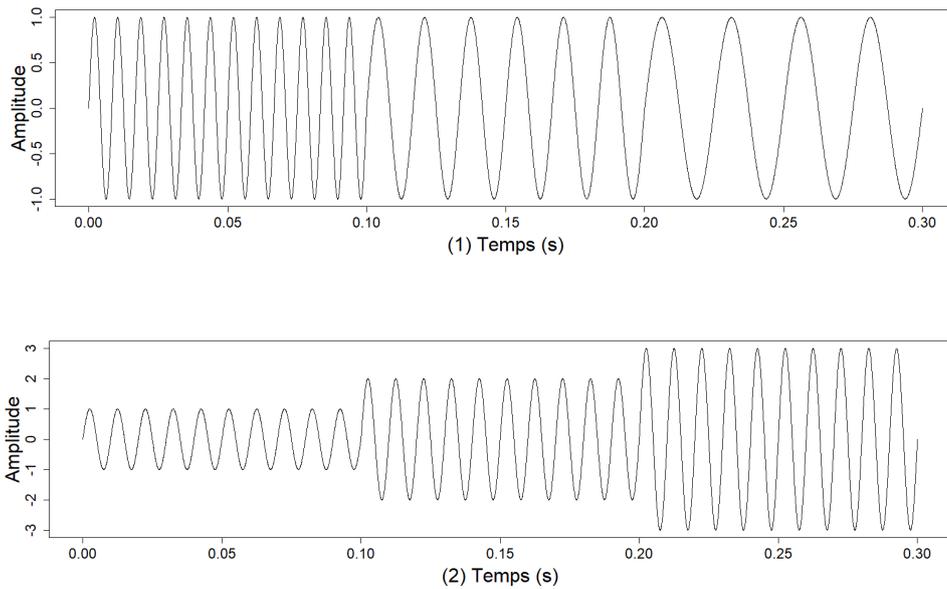


FIGURE 3.3 – Illustration d’un signal vibrotactile variant en intensité (1) ou en fréquence (2).

pour la peau glabre que pour la peau velue. La peau velue est ainsi moins sensible que la peau glabre. Cependant, le seuil de différence reste en comparaison similaire entre les deux types de peau [142, 154]. Cette différence s’explique aussi par une répartition inégale des récepteurs à la surface de la peau où une densité plus faible de récepteurs se traduit par une moins bonne sensibilité [160].

La forme de l’onde et la rugosité du signal Les modifications de la forme de l’onde vibratoire se traduisent par des changements de rugosité du signal vibratoire. Par analogie avec le toucher d’une surface, la rugosité qualifie la sensation que produit la forme de l’enveloppe d’un signal vibratoire. La rugosité de la vibration dépend alors des variations d’amplitude et de la distance entre ces pics d’amplitude. Il est alors possible de manipuler la forme de l’onde vibratoire pour produire des changements perceptuels. La rugosité est alors perçue comme un changement en intensité et en fréquence du signal vibratoire. Il est de fait impossible de combiner l’identification de cette dimension avec la reconnaissance individuelle des niveaux d’intensité et de fréquence.

Pour provoquer un changement de rugosité, il est possible de moduler l’amplitude d’un signal de plus haute fréquence par un signal de plus basse fréquence [266]. Cette modulation résulte en un signal vibratoire multi-harmonique perceptiblement plus rugueux que le signal de plus haute fréquence (Fig. 3.4). Cette technique est particulièrement utile pour augmenter l’expressivité des vibreurs de type LRA². Brown *et al.* [22] expliquent que la rugosité augmente avec l’écart de fréquence entre le signal de base et celui de modulation. Sans entraînement, un utilisateur peut identifier jusqu’à 3 ou 4 niveaux de rugosité. Park *et al.* [176] observent que des fréquences inférieures à 10 Hz (1, 2, 5 et 10 Hz) sont préférables pour moduler un signal de base de 150 Hz. En comparaison, Brown *et al.* [22] utilisent un signal de base de 250 Hz et des signaux de modulation de fréquence inférieurs à 50 Hz.

2. actionneur à résonance linéaire

Des formes d'ondes plus complexes comme des signaux créneaux, en dents de scie ou bien triangulaires peuvent aussi être produites en combinant plusieurs harmoniques sur le principe des Séries de Fourier. Jones *et al.* [118] observent par exemple qu'un signal en créneau est perçu comme plus rugueux qu'un signal sinusoïdal. Cependant, il reste difficile de savoir si les utilisateurs sont capables d'identifier les stimuli vibratoires par la forme du signal vibratoire seul ou s'ils sont juste capables d'en distinguer le niveau de rugosité.

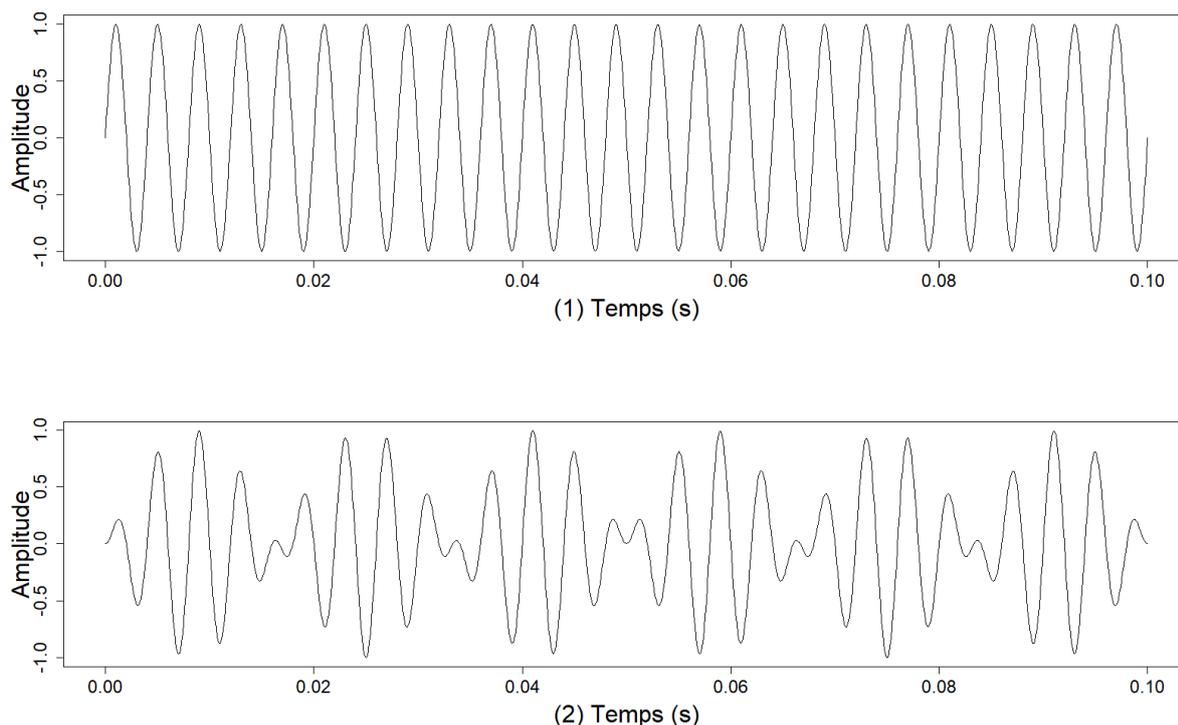


FIGURE 3.4 – Modulation d'un signal sinusoïdal de 250 Hz (1) par un signal de modulation de 10 Hz (2).

3.1.1.2 Les métaphores temporelles

La perception tactile, humaine se caractérise aussi par une bonne acuité temporelle. Les utilisateurs sont capables d'identifier le début, la fin et la durée d'un stimulus. Il est alors possible de créer des métaphores temporelles dont l'évolution ou la structure temporelle supporte l'information. Dans cette section, nous présentons les limites de l'acuité temporelle humaine et comment l'ordre, la durée et le rythme des stimuli sont combinés pour produire des motifs vibrotactiles temporels. Par exemple la Figure 3.5 représente deux motifs temporels qui correspondent à une courte séquence de stimuli de courte ou longue durée. Ces deux motifs permettent ainsi la représentation en Morse vibrotactile des lettres S et U.

L'acuité temporelle Elle définit la plus petite durée qu'un utilisateur est capable de distinguer. Il est accepté que la durée minimale qu'un utilisateur est capable de percevoir est inférieure à 10 ms [77]. En revanche, pour assurer une bonne identification des motifs

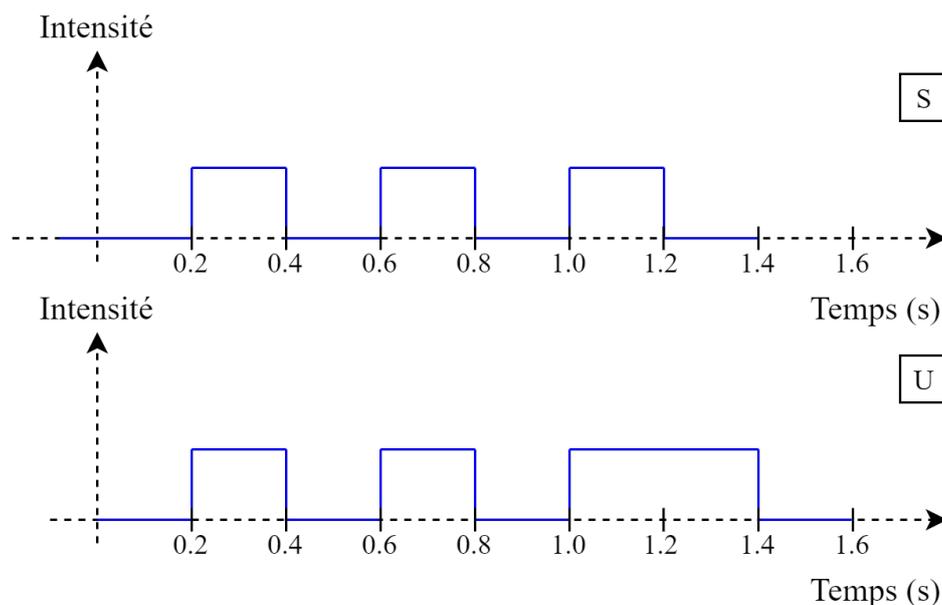


FIGURE 3.5 – Un exemple de deux motifs temporels : représentation en code Morse des lettres S et U, en alternant des stimuli courts ou longs.

vibrotactiles, il est préférable d'utiliser des stimuli plus longs. Cependant, les effets d'une augmentation de la durée de présentation des stimuli saturent autour de 100 à 200 ms pour un stimulus monotone et entre 150 et 500 ms pour des motifs plus complexes [228, 235]. De plus, une durée plus longue a pour effet de réduire la vitesse de communication et peut aussi devenir gênante pour l'utilisateur particulièrement si celui-ci est engagé dans une tâche en parallèle [119].

Lors de la création de motifs temporels, il faut aussi tenir compte de la durée entre deux stimuli. VanDoren *et al.* [58] rapportent qu'un utilisateur peut percevoir un temps mort d'une durée inférieure à 10 ms entre deux stimuli. Cependant, comme il est observé pour la durée de présentation d'un stimulus, il est préférable de choisir un temps mort d'une durée plus longue. Ils conseillent, par exemple, d'imposer une durée d'au moins 100 ms entre deux stimuli pour qu'ils soient identifiés à coup sûr lorsqu'ils sont présentés à la même position. De plus, ils observent que deux facteurs influencent cette durée : la complexité des stimuli et l'âge des utilisateurs. En effet, premièrement, ils mesurent que la durée du temps mort entre deux stimuli vibratoires produits à partir d'un signal bruité nécessite d'être plus longue que celle entre deux stimuli monotones pour être distingués. Deuxièmement, la durée de ce temps mort se rallonge avec l'âge.

Il est aussi nécessaire de remarquer, comme pour la modalité visuelle, la capacité de compter précisément le nombre de stimuli délivrés dans un court intervalle de temps est limitée. Un utilisateur est a priori capable de compter un maximum de 5 stimuli sur une période de 1 seconde [30]. Cette limite est importante à prendre en compte lorsqu'il s'agit de représenter l'information sous forme d'une séquence codée comme le Morse [195] ou bien le Braille [207].

Les motifs temporels Ils sont produits par la création d'une séquence temporelle de stimuli vibrotactiles suivant une structure temporelle. Les motifs les plus simples sont un arrangement de stimuli monotones d'une durée fixe et assez courte (50 à 200 ms [66]). La création de motifs plus complexes fait appel à des stimuli dont l'intensité, la

fréquence et la durée varient au cours du temps. L'utilisation de plusieurs dimensions permet de diversifier les changements perceptuels pouvant être distingués. Summers *et al.* [228] montrent par exemple qu'un utilisateur est capable de percevoir une variation suivant une fonction rampe de l'intensité et d'en identifier la direction à condition que la différence d'intensité soit suffisante. En combinant ce type de variations, il est possible de manipuler la forme de l'enveloppe du signal vibratoire (différent de la forme de l'onde vibratoire) et créer des motifs temporels que les utilisateurs peuvent mémoriser [47, 174]. À partir de ces motifs, Clark *et al.* [47] développe le concept de morphe. Un morphe est le résultat d'une opération perceptuelle entre deux motifs temporels. Il constitue alors un nouveau motif qui est distinguable des deux motifs dont il est le produit et avec lesquels il partage des caractéristiques perceptuelles (Fig. 3.6). Cette technique crée un lien de parenté entre les motifs qui peut faciliter la création de sens.

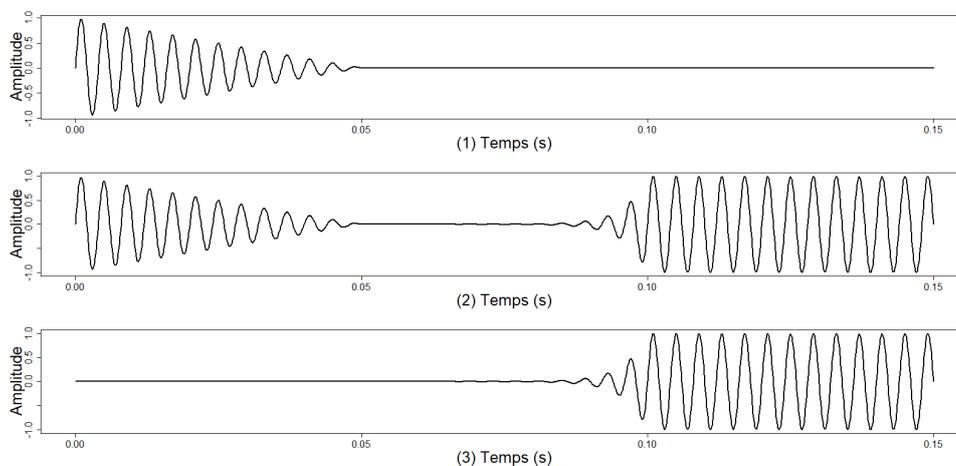


FIGURE 3.6 – Une simple illustration du concept de morphe. Le chronogramme au centre (2) est un signal morphe résultat de la concaténation d'un *signal rampe* (1) et d'un *signal signal échelon* (3).

Il est à noter que plusieurs études portant sur la création de motifs temporels se sont penchées sur la conversion en un signal vibratoire de mélodies ou de la prononciation des mots. Ces études suggèrent que la musicalité des signaux vibratoires peut être utilisée pour créer des motifs distinguables. Ces études ont révélé que pour ce type de motifs temporels, les utilisateurs sont sensibles aux changements de rugosité et de rythme que produit la mélodie [118, 231, 246]. Cependant, comparer à des motifs créés à partir d'un code vibrotactile (par exemple. [138, 195, 278]), il a été observé que les utilisateurs ont besoin de plus de temps pour mémoriser ce type de motifs. En effet, la généralisation des motifs à de nouveaux motifs est plus difficile. Par exemple, un utilisateur n'aura pas plus de faciliter à apprendre le motif vibrotactile produit par la conversion vibrotactile de la prononciation du mot *Râteau* en ayant déjà appris au préalable le motif associé au mot *Bateau*.

La durée et le rythme Ce sont deux dimensions temporelles qui permettent de produire facilement des stimuli distinguables. La durée est définie comme la longueur de temps qui s'écoule entre le temps de montée et le temps de descente du stimulus. Pour que deux stimuli monotones d'une durée différente soient distinguables, il est nécessaire d'observer une différence de durée comprise entre 50 ms et 150 ms pour des stimuli d'une durée allant de 100 ms à 2 s [77]. Il en résulte qu'un utilisateur est capable de percevoir

sur cet intervalle jusqu'à 25 changements de durée. Cependant, seulement 4 niveaux de durée peuvent être identifiés de manière absolue par un utilisateur non entraîné.

Ternes *et al.* [239] définissent le rythme comme une succession de stimuli monotones de durée variable, appelés notes par analogie avec la musique, qui sont arrangées sur un temps (structure) et jouées à un tempo donné (vitesse). De manière plus générale, le rythme est le tempo auquel s'enchaîne une série de stimuli et de temps morts (Fig. 3.7). Un changement de rythme peut-être produit simplement en faisant varier la durée du temps mort entre deux stimuli ou la durée même du stimulus. Pour qu'une telle différence de rythme soit perceptible, il est nécessaire de faire varier de 15 à 30% la durée du temps mort ou du stimulus.

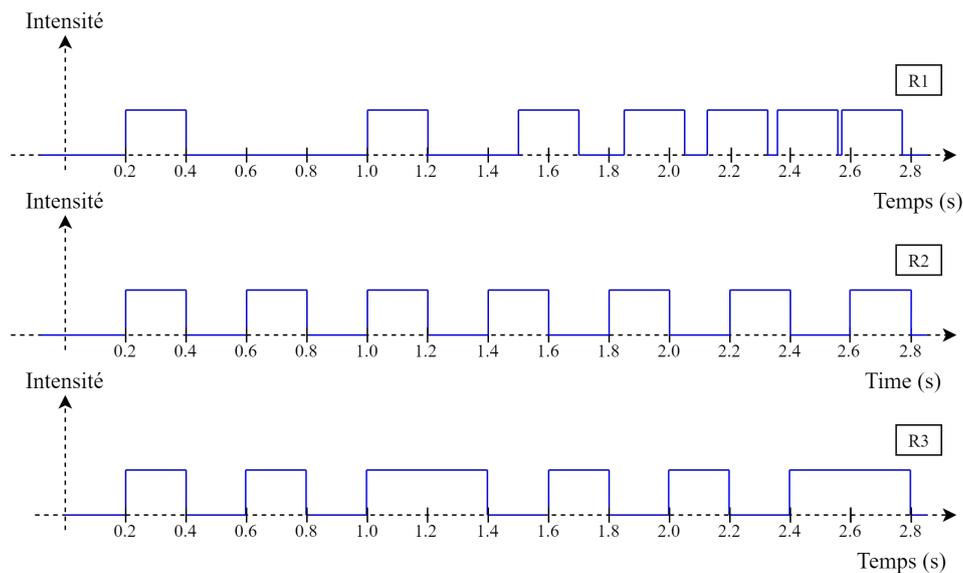


FIGURE 3.7 – Trois différents rythmes (R1, R2 et R3) produits en contrôlant la durée du stimulus ou du temps mort entre deux stimuli.

Pour le design de motifs basés sur le rythme, Ternes *et al.* [239] conseillent d'utiliser des stimuli d'une durée supérieure à 30 ms. Un temps mort d'une durée minimale aussi longue entre deux stimuli est alors conseillé afin de diminuer le risque de masquage temporel. Un phénomène de masquage temporel apparaît lorsque la perception d'un stimulus est atténuée ou masquée par un second stimulus proche dans le temps, présenté avant ou après le stimulus masqué [51]. De plus, pour réduire la monotonie du rythme et faciliter l'identification du motif, il est possible de faire varier les dimensions du stimulus comme la durée, l'intensité ou la fréquence. La combinaison de plusieurs dimensions permet alors de créer un ensemble de stimuli perceptuellement plus riche. Les résultats de leurs évaluations perceptuelles ont montré que les utilisateurs identifient principalement les motifs en comparant leur régularité ou la présence de singularité. Par exemple, les motifs dominés par des stimuli principalement courts ou longs ont tendance à être similaires alors que ceux qui les mélangent ont tendance à être plus facilement distingués.

Cependant, la multiplication des dimensions peut aboutir rapidement à des motifs se ressemblant. De plus, pour ces motifs, il devient plus difficile de reconnaître séparément les dimensions de chaque stimulus [70]. On observe, par exemple, une interaction entre l'intensité et la durée. Des stimuli de courte durée et de forte intensité peuvent être confondus avec d'autres stimuli plus longs et de plus faible intensité [33]. Dans ce cadre, il n'est donc pas facile de construire des ensembles de motifs combinant plus de deux

dimensions simultanément. Il est de fait préférable de limiter le nombre de dimensions simultanément utilisées par stimuli ainsi que de limiter le nombre total de niveaux utilisés par dimension lorsque l'utilisateur a besoin de les reconnaître de manière absolue. Oakley *et al.* [168] suggèrent, par exemple, pour la création de motifs combinant des niveaux d'intensité et de durée de limiter à deux le nombre de niveaux pour chaque dimension.

3.1.1.3 Les métaphores spatiales

La position du stimulus est une autre dimension qu'il faut considérer lors de la création de motifs vibrotactiles [22, 68, 78]. Ces motifs servent à la création de métaphores spatiales qui se distinguent par un arrangement spatial des stimuli. Au contraire des métaphores temporelles, elles requièrent l'utilisation de plusieurs vibreurs répartis à la surface de la peau. Ces métaphores reposent alors sur la capacité de l'utilisateur à identifier de manière relative ou absolue la position de chaque stimulus.

L'acuité spatiale Elle est définie par la distance minimale nécessaire entre deux stimuli vibrotactiles pour qu'ils soient distinguables. Ce paramètre conditionne alors la création des techniques de représentation spatiale de l'information pour lesquelles il est nécessaire de s'assurer que l'utilisateur est capable de distinguer la position de chaque stimulus. L'acuité spatiale est une grandeur subjective qui est mesurée expérimentalement. La méthode la plus courante requiert l'utilisation d'un esthésiomètre qui évalue cette distance par la présentation simultanée de deux stimuli générés par pression. Par cette technique, Weinstein *et al.* [265] rapportent que la meilleure acuité est mesurée pour les régions couvertes de peau glabre où elle varie entre 1 et 10 mm alors que pour la peau velue, l'acuité est nettement inférieure (entre 10 - 50 mm). Cependant, pour les stimuli vibratoires, l'acuité spatiale est inférieure aux valeurs rapportées par l'esthésiométrie. Cette différence est imputée à la propagation des stimuli vibratoire à la surface de la peau dont il résulte une plus grande surface de stimulation. La perception de la position des stimuli est alors moins précise. Ce phénomène est aussi visible pour les régions ayant une forte densité de cheveux ou de poils qui en plus d'amortir les vibrations réduisent significativement l'identification de la position des stimuli [115].

Une évaluation de la propagation des ondes à la surface du bras a montré que des vibrations d'une intensité de 1.8 g à 240 Hz peuvent se propager dans un rayon de 6 à 8 cm autour du point de stimulation. Pour ces vibrations, dans un rayon inférieur à 4 cm, les vibrations restent à un niveau d'intensité perceptible par l'utilisateur, malgré la décroissance exponentielle de l'intensité des stimuli [213]. On peut conclure de ces observations qu'une distance de 5 à 6 cm est nécessaire pour réduire les zones de recouvrement entre deux vibreurs et ainsi faciliter l'identification de la position d'un stimulus [46, 166]. Il est aussi conseillé pour améliorer la discrimination spatiale des stimuli de monter les vibreurs sur un matériau isolant et de limiter l'intensité des stimuli [116]. Ceci est particulièrement conseillé quand les vibreurs sont attachés à un support rigide saisi par l'utilisateur comme le dos d'une tablette [175].

L'identification absolue de la position d'un stimulus est fonction du nombre de vibreurs et de leur emplacement [34, 44]. On distingue un placement radial d'un placement longitudinal. Par radial, on désigne un placement des vibreurs orthogonal à l'axe de symétrie de la partie du corps accueillant le dispositif et par longitudinal un placement suivant cet axe. Pour les interfaces montées sur une direction radiale, le taux de reconnaissance de la position diminue avec l'augmentation du nombre de vibreurs. Le nombre optimal de vibreurs varie alors en fonction de la circonférence et de l'acuité spatiale pour la région

choisie du corps. Pour illustrer, il est possible d'atteindre un taux de reconnaissance de la position lors de l'activation d'un seuil vibreur compris entre 80 et 95% pour 6 à 8 vibreurs sur l'abdomen [42], 4 à 6 vibreurs autour de la tête [81], 6 à 8 vibreurs autour du cou [205] et de 3 à 4 vibreurs autour du poignet [26, 87]. Pour un plus grand nombre de vibreurs, les utilisateurs conservent une relativement bonne estimation de la position. En générale, les utilisateurs confondent le vibreur activé avec les vibreurs qui lui sont voisins [42, 44].

Des études similaires ont été menées avec d'autres dispositions de vibreurs. Par exemple, l'étude de matrices de vibreurs met en évidence qu'il est possible d'utiliser un espacement plus petit des vibreurs sur la peau glabre que sur la peau velue. Approximativement, 5 positions peuvent être identifiées sur une matrice de 9 vibreurs disposés 3 par 3 sur la paume de la main [219] alors qu'il est possible seulement d'identifier facilement 3 positions sur le dessus ou sur le dessous de l'avant-bras [34]. De plus, la localisation des stimuli sur une matrice de vibreurs suggère que l'acuité spatiale varie en fonction de la direction de placement des vibreurs. Sur le poignet et le bras, une meilleure identification de la position suivant l'axe radial est observée en comparaison de l'axe longitudinal [34, 85]. Cholewiak *et al.* [44] observent qu'il est possible d'identifier facilement seulement 3 positions sur l'avant-bras avec un placement longitudinal des vibreurs du coude vers le poignet. L'utilisation d'un dispositif radial plutôt que longitudinal est alors une bien meilleure solution s'il est nécessaire d'encoder l'information en fonction de la position [85, 146]. Cholewiak *et al.* fait aussi remarquer que certaines positions servent de points de référence spatiale comme les articulations ou le nombril qui facilitent l'identification de la position d'un stimulus. D'abord, ils remarquent que la localisation est meilleure autour de ces points. Ensuite, ils observent que l'identification de la position est moins bonne lorsqu'aucun vibreur du dispositif n'occupe un des points de référence. Finalement, Brills *et al.* [21] font remarquer que la localisation des stimuli peut être améliorée en créant artificiellement des points de référence. Pour cela, il est conseillé d'utiliser un stimulus unique pour les positions qui ne sont pas bien localisées. Une telle technique est par exemple utilisée pour améliorer la perception des stimuli au niveau des flancs pour une ceinture vibrotactile.

Finalement, il peut être envisagé de coder l'information par la distance entre deux vibreurs. Elsayed *et al.* [64] montrent que l'évaluation de cette distance est aussi biaisée par l'orientation du dispositif (radial, longitudinal), la simultanéité de l'activation des vibreurs et si les vibreurs sont localisés de part et d'autre d'un point de référence. Pour un espacement constant des vibreurs sur le dos, ils ont pu mesurer que la distance entre les vibreurs apparaît plus longue suivant l'axe longitudinal que suivant l'axe radial. La distance de part et d'autre d'un point de référence comme la colonne vertébrale fait en revanche percevoir l'espacement comme plus long que pour deux vibreurs positionnés du même côté. Lorsque les vibreurs sont activés simultanément la distance entre deux vibreurs est perçue en général comme plus courte que pour une activation séquentielle des vibreurs. L'activation simultanée des vibreurs biaise en revanche complètement la notion de distance et il devient impossible pour l'utilisateur d'en faire une bonne estimation.

Les motifs spatiaux Ils sont généralement créés par l'activation simultanée de plusieurs vibreurs placés à différents endroits du corps humain (Fig. 3.8 (gauche)). En théorie, cette technique permet de créer rapidement un grand ensemble de motifs avec seulement quelques vibreurs. Il est préférable de ne pas employer toutes ces combinaisons pour la représentation d'un même ensemble d'informations [77, 138].

En effet, cela s'explique par la manière dont les stimuli sont perçus par l'utilisateur et

des phénomènes de masquage spatial [251]. Le phénomène de *masquage spatial* apparaît lorsque la perception d'un stimulus est atténuée ou masquée par un second stimulus présenté à une position différente, mais superposé dans le temps [67]. La perception humaine des phénomènes tactiles est telle qu'un utilisateur s'adapte rapidement au ressenti de plusieurs stimuli tactiles, et de telle sorte qu'il va rapidement sentir plusieurs stimuli comme une seule et unique sensation. Une manière de réduire les phénomènes de masquages spatiaux est d'utiliser des stimuli dans des bandes de fréquences différentes [68]. Pour faciliter la perception de plusieurs stimuli spatialisés, il est aussi conseillé de décaler dans le temps le déclenchement de chaque stimulus [77]. Luzhnica *et al.* [138] appliquent cette technique pour créer la méthode OST (overlapped spatio-temporal, Fig. 3.8 (droite)) permettant la création de motifs spatiaux pour lesquels l'ensemble des stimuli sont présentés simultanément, mais avec un déclenchement différé de chaque stimulus.

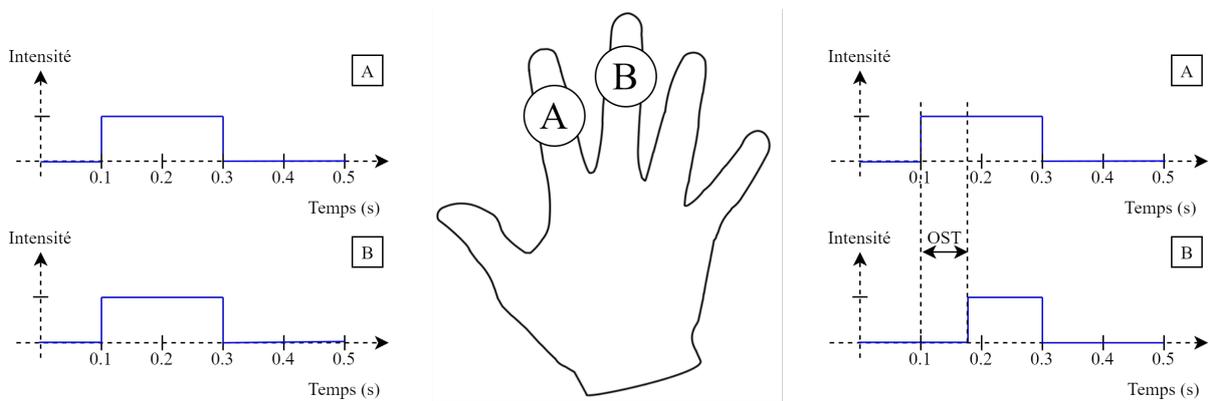


FIGURE 3.8 – Comparaison de deux motifs spatiaux sur les doigts d'une main, illustrant la méthode classique de création utilisant une activation simultanée des vibreurs (à gauche) et la méthode OST (à droite).

La capacité de reconnaître un motif spatial est aussi limitée par le nombre de stimuli pouvant être reconnu simultanément. Geldard *et al.* [78] mesurent que le taux de reconnaissance décroît exponentiellement avec le nombre de vibreurs activés simultanément. Il est conseillé de limiter à 2 ou 3 le nombre de vibreurs simultanément activés [77, 138]. La reconnaissance des motifs spatiaux est de plus discutée en termes de communalité par Geldard et al. La communalité exprime le degré de similarité entre deux motifs spatiaux. Leur étude montre alors que pour des motifs utilisant plus de 2 ou 3 vibreurs, il est préférable d'avoir une communalité inférieure à 20 ou 30 % pour faciliter l'identification des motifs spatiaux. Les travaux menés par Cholewiak *et al.* [43] montrent que d'autres propriétés comme la symétrie/dissymétrie, ou les singularités perceptuelles dans les motifs peuvent améliorer leur identification.

L'attribution spatiale Cette technique diffère de la précédente, car elle consiste à attribuer spécifiquement une information à l'emplacement d'un ou plusieurs vibreurs. En comparaison des motifs spatiaux combinant plusieurs vibreurs, cette technique est moins efficace en termes d'usage des vibreurs étant donné que les vibreurs sont dédiés à la présentation d'une information en particulier. Cependant, cette méthode peut avoir l'avantage d'améliorer la communication d'information. En effet, l'attribution spatiale d'information est présentée comme une technique pouvant être très intuitive et facile à mémoriser. Cette technique peut aussi être envisagée pour présenter plusieurs informations de manière concurrente. Novich *et al.* [166] observent qu'il est possible pour un utilisateur

d'identifier deux motifs spatio-temporels présentés simultanément si la distance entre les vibreurs est suffisante. Cependant, tout comme pour les motifs spatiaux, cette technique est limitée à 2 informations à la fois. Donsani *et al.* [59] observent que les utilisateurs ont des difficultés à identifier des alertes présentées à la ceinture quand plusieurs motifs temporels sont délivrés simultanément à des emplacements différents.

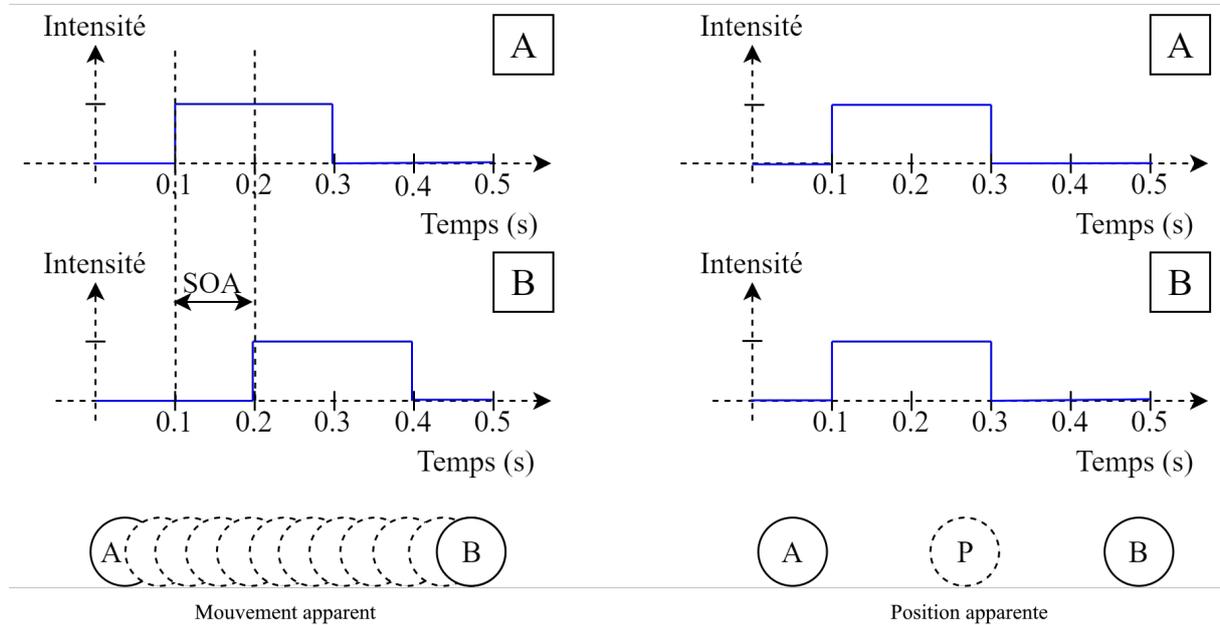


FIGURE 3.9 – Illustration des différentes illusions tactiles produites par l'activation synchrone ou asynchrone des vibreurs.

Les illusions spatiales sont des sensations fantômes produites par l'activation synchrone ou asynchrone de plusieurs vibreurs suffisamment espacés. Ces illusions sont alors générées en contrôlant le moment d'activation entre le début de chaque stimulus.

Une activation asynchrone se traduit par une illusion appelée *mouvement apparent* (Fig. 3.9 (gauche)) dont les propriétés sont contrôlées par la durée des stimuli et l'intervalle de temps s'écoulant entre leurs déclenchements respectifs (SOA - stimuli asynchronous onset) [124]. En effet, la probabilité de ressentir une sensation de déplacement augmente avec la durée SOA jusqu'à atteindre un maximum à partir duquel la probabilité de percevoir deux stimuli distincts est plus grande. Par exemple, pour des stimuli d'une durée de 200 ms, la durée SOA optimale est d'environ 100 ms. Si la durée SOA est supérieure à 400 ms alors les deux stimuli sont perçus distinctement [153].

La durée SOA peut être approximée par les méthodes proposées par Israr *et al.* [108] ou bien par SiyanZhao *et al.* [277]. Par exemple pour le dos, la durée SOA peut être calculée en millisecondes à partir de la durée D d'un stimulus par l'équation 3.1 :

$$SOA = 0,32 * D + 47,3 \quad (3.1)$$

Comme pour les motifs temporels, des changements perceptuels peuvent être créés en faisant varier l'intensité et la durée des stimuli utilisés [169]. La vitesse de déplacement de cette illusion tactile est contrôlée principalement par la durée des stimuli et leur direction par l'ordre d'activation des stimuli [102]. De plus, il apparaît que l'utilisation de stimuli d'intensité différente provoque une inversion de la direction du phénomène [103].

Pour compléter, les travaux de Elsayed *et al.* [64] sur les mouvements apparents apportent des précisions quant à la distance optimale devant séparer chaque vibreur. Cette étude compare l'influence de la configuration des vibreurs (radial ou longitudinal) et la région du corps sur laquelle est placé le dispositif (poignet, avant-bras, bras, dos, estomac, hanche et cuisse). Il en résulte alors que l'espacement maximal est généralement plus petit pour les régions du corps ayant une meilleure acuité spatiale. Finalement, les auteurs suggèrent qu'un espacement d'environ 3 cm est optimal autour et en travers du poignet. Pour le reste du corps, il est préférable d'opter pour une distance moyenne prise entre 3.5 et 6 cm pour un dispositif radial et entre 4 et 6.5 cm pour un dispositif longitudinal. Ces observations sont en accord avec d'autres valeurs précédemment observées dans la littérature [133, 193].

Les illusions fantômes ne se limitent pas à seulement deux vibreurs. Il est possible d'utiliser des alignements de plusieurs vibreurs pour créer des polylines [133, 134]. Pour améliorer la production de ces illusions, il est suggéré d'utiliser des fonctions non linéaires pour contrôler l'intensité des stimuli et ainsi contre-balancer les différences perceptuelles entre les positions traversées par l'illusion [134]. Il est de plus possible de créer des formes nettement plus complexes en interpolant plusieurs vibreurs. Pour cela, différents outils sont disponibles permettant de créer par exemple des courbes [120, 210].

Une activation synchrone se traduit par une illusion appelée *position apparente* (Fig. 3.9 (droite)). Cette illusion produit une sensation unique et fixe située entre les vibreurs [217]. La position apparente peut être utilisée pour créer un affichage d'informations continues sur la peau de l'utilisateur en utilisant un nombre fini de vibreurs [87, 137]. Il est aussi possible d'augmenter le nombre de positions qu'un utilisateur peut identifier de manière absolue. Il est par exemple possible de créer entre 4 et 8 positions autour du poignet en utilisant seulement 4 vibreurs [87]. Ces positions créées virtuellement peuvent être identifiées avec un taux de succès au moins supérieur à 80%. De plus pour chacune de ces positions, l'utilisateur est toujours capable de différencier plusieurs niveaux d'intensité et de fréquence [87] et même de rythme [26].

D'après les travaux d'Israr *et al.* [108], l'intensité V_P d'un stimulus fantôme P produit par deux stimuli A et B d'intensité respective V_A et V_B , répond à l'équation 3.2 suivante :

$$V_P^2 = V_A^2 + V_B^2 \quad (3.2)$$

La position de ce stimulus peut alors être contrôlée en ajustant l'intensité du stimulus A ou B. Cette position est alors estimée en considérant le rapport de la distance a entre le stimulus A et le stimulus fantôme P, par la distance b entre les stimuli A et B, à partir de l'équation 3.3 suivante :

$$\frac{a}{b} = \frac{V_B^2}{V_A^2 + V_B^2} \quad (3.3)$$

De plus, un constat similaire est fait quant à la fréquence du stimulus fantôme, et ce même pour deux stimuli stimulant des types différents de mécanorécepteurs [125]. La fréquence du stimulus fantôme est alors le résultat d'une approximation faite par pondération des fréquences de chaque stimulus par leur intensité respective.

Finalement, si les deux vibreurs sont trop proches pour être distingués, l'activation simultanée des vibreurs résulte tout de même à un stimulus de plus forte intensité. Ce phénomène peut être utilisé pour produire des sensations distinguables pouvant servir

à coder de l'information. Cette technique est mentionnée sous le nom d'augmentation spatial par Hoffmann *et al.* [102].

3.1.2 Comment construire un dispositif vibrotactile ?

Les interfaces de communication vibrotactile se différencient par le choix de l'architecture matérielle. Pour ce faire, la construction d'un dispositif vibrotactile repose sur 3 paramètres : l'arrangement des vibreurs appelé la forme du dispositif, le type de vibreur utilisé et le choix d'une ou plusieurs parties du corps pour le positionnement des vibreurs.

3.1.2.1 La forme du dispositif

Les interfaces de communication vibrotactile peuvent être classées en deux catégories : mono vibreur ou multi-vibreurs. Les interfaces *mono* vibreur sont soit de petits objets destinés à être saisis par l'utilisateur par exemple des smart-phones [183], soit des accessoires portés par l'utilisateur [30, 195]. Ces interfaces sont utilisées pour communiquer de l'information principalement sous la forme de métaphores directes ou temporelles au travers des doigts ou de la main de l'utilisateur. Les autres catégories d'interfaces utilisent plusieurs vibreurs. Ces dispositifs sont soit directement portés par l'utilisateur ou bien intégrés à de larges surfaces (plancher, dossier d'un siège, tablette, etc.) pour être en contact avec des régions comme le dos, les pieds [107] ou les mains [175]. Ces interfaces sont soit des interfaces 1D placées dans une configuration radiale [33, 85, 87] ou longitudinale [44, 85] ou soit des interfaces 2D formant une grille ou une matrice de vibreurs [33, 107, 133].

Pour les vibreurs embarqués dans un objet, il est recommandé de les attacher solidement à proximité des surfaces susceptibles d'être saisies par l'utilisateur pour faciliter la perception. Si plusieurs vibreurs sont utilisés à différentes fins, il est préférable de les isoler les uns des autres pour faciliter l'identification de la source des vibrations [175]. Pour les vibreurs intégrés dans des accessoires et portés au contact de la peau, il est préférable d'utiliser une bande textile élastique pour garantir un contact constant. En revanche, les liens rigides comme une ceinture sont déconseillés. Ce type de lien facilite en effet la conduction des vibrations et il constitue une masse supplémentaire amortissant le signal vibratoire. La fixation des moteurs doit de plus garantir un contact continu et constant avec la peau. En effet, la pression exercée par les vibreurs et les mouvements de la peau (comme la respiration) sont des éléments modifiant la perception des vibrations. Il est de fait conseillé de limiter la complexité des motifs vibrotactiles si les utilisateurs sont impliqués dans des tâches physiques [55].

3.1.2.2 Le positionnement des vibreurs sur le corps

Les interfaces vibrotactiles sont aussi caractérisées par la partie du corps avec laquelle elles sont en contact. Cet aspect de la conception peut-être une réelle problématique qui est souvent adressée en trouvant un compromis entre les performances de communication et les contraintes d'utilisation. Étant donné que la peau humaine constitue le plus grand organe sensoriel de la peau, plusieurs régions du corps peuvent être pertinentes pour accueillir une interface vibrotactile. La sélection d'une région du corps doit être faite en fonction de la sensibilité tactile et de sa forme pour permettre la création de suffisamment d'items vibrotactiles. Il est aussi nécessaire de s'assurer que la région sélectionnée ne soit pas contraignante pour l'utilisateur. En effet, certaines parties du corps ont des rôles spécifiques. La peau glabre est par exemple particulièrement impliquée dans le toucher actif

étant donné qu'elle est constituée des régions de la peau qui sont les plus sensibles. La peau velue, quant à elle, est principalement impliquée dans le toucher passif et particulièrement le toucher affectif [177]. Afin de comparer les différentes interfaces vibrotactiles, le corps humain a été subdivisé en considérant les principales articulations du corps : tête, face, cou, épaule, bras, avant-bras, main, paume, doigt, torse, ventre, dos, jambe, pied (Table 3.1.4, Caractéristique F1).

De plus, il est tout à fait possible de placer des dispositifs vibrotactiles sur plusieurs parties simultanément. En effet, la création de métaphores spatiales ne se limite à une seule partie du corps humain. D'une part, augmenter le nombre de parties du corps utilisées peut faciliter la perception des motifs spatiaux : Wang *et al.* [258] ont constaté que les motifs spatiaux utilisant des vibreurs sur les deux bras sont plus facilement identifiés que des motifs spatiaux combinant le même nombre de vibreurs, mais situés sur le même bras. D'autre part, c'est un moyen simple de faciliter la création de motifs métaphoriquement explicites. Par exemple, Morrison *et al.* [155] proposent un langage d'icônes vibrotactiles pour indiquer à des danseurs quels mouvements ils doivent réaliser. Différents types de mouvements sont associés à différentes parties du corps avec lesquels ils peuvent partager du sens. Particulièrement, la symétrie du corps humain est utilisée pour indiquer la direction d'un mouvement. Ce dispositif fait ici usage d'*associations écologiques*³, un terme proposé par Van Erp *et al.* [67] qui définit un type d'association utilisant des propriétés de l'environnement pour véhiculer une partie de l'information.

L'utilisation de plusieurs parties du corps augmente ainsi les possibilités de communication. D'autant plus que les observations faites par Luzhnica *et al.* [139] montrent que les utilisateurs sont capables de transférer les caractéristiques perceptuelles d'un motif vers une autre partie du corps pour laquelle ils n'ont pas reçu d'entraînement. En revanche, cela reste vrai si les utilisateurs n'ont pas besoin de comparer le ressenti entre ces différents emplacements dont les capacités perceptuelles peuvent varier de manière significative [77]. Dans le cas contraire, la conception des motifs devient beaucoup plus complexe. En conséquence, les utilisateurs pourront identifier des motifs moins complexes pour lesquels il sera nécessaire d'ajuster les niveaux de chacune des dimensions utilisées pour compenser les différences perceptuelles.

3.1.2.3 Le type de vibreur

Plusieurs technologies d'actionneurs sont capables de produire des vibrations. Le choix d'un type d'actionneur dépend de différents paramètres comme le coût, l'ergonomie (masse, encombrement, dissipation thermique, etc.) ainsi que de ces capacités physiques (expressivité et dynamique de l'actionneur). Les vibreurs les plus répandus fonctionnent par la mise en mouvement d'une masse grâce au passage d'un courant électrique dans un bobinage. Les vibreurs à balourd ou ERM (eccentric rotating mass) et les vibreurs *pancake* sont les modèles de vibreurs les moins chers et les plus simples à mettre en œuvre. Cependant, leur dynamique est généralement lente due à l'inertie de la masse mise en mouvement, constituant une limite pour les applications nécessitant de produire des stimuli de courte durée. L'expressivité de ce type de vibreurs est de plus assez limitée étant donné que la fréquence et l'intensité du signal ne peuvent être pilotées séparément. C'est aussi le cas pour les modèles de vibreur LRA (Linear Resonant Actuator) pouvant seulement être pilotés en intensité sur une bande de fréquence très étroite correspondant à sa fréquence de résonance. En comparaison, les vibreurs *haut-parleur* permettent un contrôle indépen-

3. ang. *ecological associations*

dant de ces deux dimensions, mais nécessitent un circuit électronique dédié beaucoup plus complexe pour être opéré [24]. Pour une comparaison plus en détail de ces modèles de vibreurs, vous pouvez vous référer au travail de Choi *et al.* [40]. D'autres technologies de vibreurs utilisent des matériaux piézoélectriques, des matériaux à mémoire de forme ou bien pneumatique. Ces technologies ont elles aussi leurs propres avantages et inconvénients. Elles offrent en outre des perspectives intéressantes en permettant de combiner différentes modalités tactiles comme des pressions ou des formes.

La construction d'un dispositif vibrotactile est alors de trouver un compromis entre ces 3 paramètres de conception et l'information communiquée en fonction du contexte dans lequel l'interface est utilisée. Le choix d'une technologie de vibreur implique des contraintes sur la conception des stimuli vibrotactiles et leur présentation à l'utilisateur. La complexité des stimuli nécessite de choisir une région du corps et une forme de dispositif ne contraignant par l'utilisateur dans sa tâche et qui soit suffisamment sensible pour les distinguer.

3.1.3 Comment encoder l'information par des stimuli vibrotactiles ?

L'encodage de l'information par des stimuli vibrotactiles se fait en recourant à une métaphore qui associe l'information à un signal ou une combinaison de stimuli vibrotactiles de manière à produire un signal intelligible comme le décrit Nigay *et al.* pour les interfaces multimodales [165]. Sanders *et al.* [201] expliquent que la conception d'un dispositif de communications basé sur des stimuli sensoriels doit répondre à au moins 5 principes parmi lesquels nous retenons : la détectabilité, la discriminabilité et apprentissage. En effet, pour que l'information soit reçue par l'utilisateur celui-ci doit être capable de détecter l'émission d'un stimulus en toutes circonstances. Il est de plus nécessaire que l'ensemble des stimuli utilisés puissent être identifiés séparément, mais aussi une fois combinés. Parfois, ce ne sont pas les stimuli les plus simples qui sont les plus pertinents. C'est pourquoi la technique d'encodage de l'information doit être facile à mémoriser. Pour cela, il est possible d'exploiter les stéréotypes et connaissances des utilisateurs. Il est aussi conseillé de proposer des outils pouvant en faciliter l'apprentissage. La conception d'une technique de communication, nous conduits d'abord à considérer la nature de l'information reçue et sa représentation.

3.1.3.1 La représentation de l'information

Pour la communication vibrotactile, l'information peut être catégorisée en deux catégories en fonction de s'il existe ou non une relation d'ordre entre les différents éléments d'information. L'information est alors représentée par une représentation ordinale si cette relation d'ordre existe. Ce type de représentation se traduit par une échelle de valeurs qui peut être continue, par exemple lorsque l'information communiquée est une grandeur physique, ou bien discrète lorsqu'il s'agit de différents niveaux d'alerte. En l'absence d'une relation d'ordre, l'information est représentée de manière figurative par une représentation symbolique. Ce type de représentation repose sur la construction d'un ensemble d'*items vibrotactiles*. La représentation d'une information par un item vibrotactile constitue alors un *symbole vibrotactile*. Pour ce type de représentation, l'information peut être, par exemple, traitée sous la forme d'un ensemble d'items codés ou par des icônes vibrotactiles, aussi appelées *tactons* (ang. tactile icons) [20].

Pour respecter le principe d'apprentissage [201], la métaphore de représentation doit être la plus intuitive possible. Pour une représentation ordinaire de l'information, il est préférable de respecter la polarité et d'adopter une échelle qui représente au mieux les valeurs représentées. La polarité exprime dans quelle direction est perçue une variation du signal vibratoire codant l'information. Si une variation du stimulus se traduit par une variation de l'information dans le même sens alors la polarité est positive sinon elle est négative [70, 82]. Pour l'échelle, il s'agit de quantifier combien un incrément du signal servant à coder l'information représente pour l'utilisateur [70]. Par exemple, si l'on représente la distance restante à l'approche d'un obstacle, une diminution exponentielle du rythme d'un signal vibratoire peut être plus représentative pour l'utilisateur qu'une diminution linéaire.

Afin d'améliorer la communication, il peut être pertinent de s'intéresser au sens que véhiculent les items vibrotactiles plutôt que de créer des associations abstraites [32, 66]. Cependant, l'information reste souvent arbitrairement associée, car il est difficile de trouver des combinaisons qui fassent sens pour tout le monde [20, 47]. Par conséquent, il est souvent nécessaire que les utilisateurs passent par un intense processus d'apprentissage. En revanche, pour un petit nombre d'informations, laisser les utilisateurs créer leurs propres associations n'améliore pas forcément les performances de communication [66]. Cette situation semble s'expliquer du fait que certains utilisateurs rapportent avoir trouvé que certaines relations étaient explicites bien que générées aléatoirement. Il est alors possible de conclure que créer des associations qui font sens est nécessaire pour faciliter la communication, mais que dans les cas où ces associations sont difficiles à créer les utilisateurs tendent à créer du sens par eux-mêmes.

La création d'items vibrotactiles explicites fait appel à l'expérience de différents univers comme la musique [246] ou bien la texture des matériaux [174, 224]. Mais il est possible de citer d'autres associations considérées comme naturelles. D'abord, le rythme et la durée des stimuli peuvent être utilisés pour exprimer une quantité ou un degré d'urgence [82]. Ensuite une variation d'intensité permet d'exprimer une quantité [82]. Il est aussi possible de reproduire la forme d'un symbole connu comme les lettres de l'alphabet [33, 113, 133]. Il est possible de créer des analogies spatiales simples où la position des stimuli permet de véhiculer une direction [67]. Mais aussi des analogies plus complexes comme Zhao *et al.* [278] qui proposent par exemple d'associer la position où sont produits les phonèmes dans la bouche avec la position de différents vibreurs sur l'avant-bras. Avec cette analogie, il est alors possible d'améliorer la reconnaissance de nouveaux mots facilitant le processus d'apprentissage [35, 244, 278].

3.1.3.2 Transfert d'informations

L'objectif premier en concevant une interface vibrotactile est de concevoir une métaphore de représentation de l'information qui soit suffisamment expressive. C'est-à-dire qu'elle permet de produire assez d'items vibrotactiles pour communiquer l'ensemble des informations. Pour cela, il faut avant tout vérifier que l'information est bien transmise à l'utilisateur. Pour cela, il est pertinent de s'intéresser à la théorie de l'information.

Pour évaluer les performances d'un dispositif de communication vibrotactile, la théorie de l'information propose des techniques permettant de mesurer le transfert d'informations en faisant abstraction de la tâche ou du contexte. Cette quantité est notée IT et exprimée en bits. Elle mesure la quantité d'informations bien reçue par le destinataire au travers du canal de communication [151]. L'IT d'une interface vibrotactile donne une approximation du nombre d'items vibrotactiles pouvant transmettre de manière fiable de l'information à

l'utilisateur, qui est égale à 2^{IT} [237]. Une estimation de l'IT, notée IT_{est} est expérimentalement calculable en construisant une matrice de confusion et en utilisant l'équation 3.4 suivante :

$$IT_{est} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^k \left(\frac{n_{ij}}{n} \right) \log_2 \left(\frac{n_{ij}n}{n_i n_j} \right) \quad (3.4)$$

Dans cette équation, n est le nombre d'essais réalisés par les utilisateurs, k est le nombre total d'items, n_{ij} représente le nombre de réponses j pour l'item i , et n_i et n_j sont les sommes des lignes et des colonnes de la matrice de confusion.

L'estimation calculée par cette formule peut être biaisée si le nombre d'essais est insuffisant. Pour un ensemble de k items, il est nécessaire d'en réaliser plus de $5k^2$, afin réduire cette erreur [151]. Pour un large nombre d'items, le nombre d'essais devant être réalisé peut être rapidement irréalisable. C'est pourquoi plusieurs alternatives existent pour faire une estimation de l'IT [235]. Notamment pour une erreur ϵ faible du taux de reconnaissance par utilisateur (généralement inférieure à 5%), la valeur d'IT réside entre $1 - 2\epsilon$ et $IS(1 - \epsilon)$ où IS représente la quantité d'information par item [237].

Cette technique d'évaluation est très peu utilisée dans les applications de communication vibrotactile. Cependant, nous pensons qu'elle devrait être utilisée plus systématiquement, en particulier avec l'apparition de dispositifs combinant plusieurs modalités. Premièrement, estimer l'IT facilite le choix d'une architecture et d'une technique de représentation de l'information. Deuxièmement, c'est une manière simple de comparer son interface avec d'autres interfaces existantes. Cependant, pour comparer des valeurs estimées d'IT, il faut s'assurer que les mesures sont réalisées dans les limites de ce que permet la perception humaine au risque que l'estimation soit biaisée. Le niveau d'expertise de l'utilisateur doit donc aussi être pris en considération. D'autant plus que certaines catégories d'utilisateurs peuvent être avantagées. Il est donc important de permettre à l'utilisateur de se familiariser avec l'interface avant de commencer la mesure.

Une représentation ordinale de l'information - La relation d'ordre qui caractérise les représentations ordinales se retrouve aussi bien pour des données qualitatives que quantitatives. Pour ces deux types de données, la relation d'ordre qui caractérise la représentation des données est une relation d'ordre entre les différences de magnitude perçue entre les niveaux des différentes dimensions utilisées pour coder l'information.

Pour les données continues, il peut être tentant d'utiliser un signal vibratoire continu pour en exprimer les variations dans le temps. Cependant, pour les interfaces vibrotactiles, la perception humaine est trop imprécise pour lui permettre d'évaluer efficacement la valeur transmise. Néanmoins, il est toujours possible d'exploiter les capacités de l'utilisateur à distinguer les variations du signal. Il est alors possible d'implémenter une technique de guidage incitant l'utilisateur à atteindre une valeur cible. L'un des extrema de la fonction de guidage doit alors être associé avec la cible. Pour ce type de représentation, il est conseillé d'utiliser des fonctions de transfert non linéaires, permettant de compenser les limites de la perception humaine [114]. Par exemple, il est préférable d'utiliser une fonction quadratique pour contrôler l'intensité du signal vibratoire afin de guider la tête d'un utilisateur vers la cible qu'il doit observer.

En revanche, si l'utilisateur doit reconnaître une quantité ou différencier plusieurs niveaux d'alertes de manière absolue, la représentation utilisée doit en plus permettre à l'utilisateur d'estimer de manière absolue la quantité communiquée. Avec, une métaphore temporelle ou directe, il est possible de facilement créer un ensemble d'items ordonnés de

dimension 1. Ces ensembles ont cependant un IT généralement compris entre 1 et 2 bits [23, 33, 166, 192, 216]. En combinant plusieurs dimensions, il devient possible d'augmenter le nombre d'items distinguables [216] mais aussi de créer des items à 2 voire 3 dimensions permettant de présenter des informations à plusieurs dimensions [23, 192]. Rabbitowitz *et al.* [192] mesurent un IT de 3 à 4 bits en combinant plusieurs niveaux d'intensité et de fréquence et en utilisant différentes tailles de vibreurs. Brown *et al.* [23] atteignent un IT de 3.4 bits en utilisant une technique basée sur une technique d'attribution spatiale de l'information et Chen *et al.* [33] atteignent 2.5 bits en combinant rythme, intensité et fréquence.

Pour produire un plus grand nombre d'items, il est préférable d'utiliser des métaphores spatio-temporelles. MacLander *et al.* [147] ont créé une échelle de vibreurs permettant la représentation de plusieurs valeurs à partir de motifs spatiaux. Luzhnica *et al.* [137] proposent quant à eux une représentation continue sur l'avant-bras d'une échelle de valeurs en recourant aux illusions vibrotactiles. ActiveVib [30] démontre la faisabilité d'une représentation utilisant des motifs temporels. Ces motifs représentent 10 niveaux encodés sur le modèle d'écriture des nombres romains. La reconnaissance de ces items nécessite alors de compter le nombre de stimuli courts et longs qui composent le motif temporel.

Il est important de noter que le nombre de niveaux distinguables pour chaque dimension par un utilisateur est généralement plus petit que le nombre de combinaisons possibles de ces niveaux. Comme l'explique Tan *et al.* [236], les dimensions utilisées pour représenter l'information doivent être indépendantes pour que la somme de leur IT respectif soit égale à l'IT total de l'interface. En effet, différentes interactions perceptuelles apparaissent lorsque l'on combine l'intensité, la fréquence, la durée, le rythme et la position des stimuli [168, 192, 239]. Pour respecter le principe de discrimination [201], ces interactions doivent être identifiées. Il est alors important d'éliminer les combinaisons qui sont perceptuellement similaires. Pour cela, il est possible d'utiliser une technique de représentation graphique multidimensionnelle (MSD) [45, 239, 246]. Cette technique permet de représenter les items les uns par rapport aux autres en fonction de leur distance perceptuelle établie à partir du jugement des différents utilisateurs. Cette représentation permet alors de constituer graphiquement un ensemble d'items facilement distinguables.

Une représentation symbolique de l'information - Le second type de représentation est la représentation symbolique d'informations qui propose une représentation imagée ou codée de l'information qui associe à chaque item ou groupe d'items un élément d'information indépendant. Ces items peuvent ensuite être combinés pour former des séquences d'items formant ainsi un dictionnaire [138, 207, 278] ou sur une grammaire [182]. Ce type de représentation est utilisé pour créer des systèmes de communication alternatifs ou bien des systèmes de lecture en remplacement de la modalité sonore ou visuelle.

Pour les interfaces utilisant un unique vibreur, il est préférable de donner la priorité au rythme. Les motifs basés sur le rythme sont plus efficaces pour communiquer de l'information [198]. Cependant, Ternes *et al.* [239] conseillent de répéter plusieurs fois les motifs basés sur le rythme pour faciliter leur perception par l'utilisateur. Barralon *et al.* [8] ont mesuré un IT de 4 bits pour ce type d'interface en utilisant seulement des items basés sur des stimuli monotones.

L'utilisation de plusieurs vibreurs permet une fois de plus d'augmenter facilement l'IT de l'interface. Que ce soit par des métaphores spatiales ou spatio-temporelles. Une approche consiste à utiliser des algorithmes de conversion acoustique permettant la traduction, par exemple, des langages naturels en motifs vibrotactiles. Turcott *et al.* [244]

comparent 3 de ces algorithmes avec une technique de codage spatio-temporel des phonèmes. Les dispositifs en forme de matrice peuvent être aussi utilisés pour créer des images ou des symboles où chaque vibreur se comporte comme un pixel graphique [51, 107]. Kim *et al.* [107] observent un taux de reconnaissance proche de 60% pour les 10 premières lettres de l’alphabet en utilisant une matrice de 25 vibreurs sur le pied.

Pour les techniques spatio-temporelles, la position de départ et d’arrivée du motif sont aussi des éléments discriminants et qui sont facilement reconnus par l’utilisateur. Buzzwear [128] a un IT estimé de 4,28 bits soit un total de 19 items distinguables sur l’avant-bras de l’utilisateur sur l’ensemble des essais. Après 40 minutes d’entraînement, le taux d’identification pour les 24 items proposés atteint 99%. L’activation désynchronisée facilite aussi grandement la création de larges ensembles d’items. La méthode OST [138, 139] est utilisée pour encoder les 36 lettres de l’alphabet latin en créant des motifs combinant de un à deux vibreurs. Un taux moyen de reconnaissance de 97% est atteint pour la reconnaissance des lettres et des mots générés à partir de cet alphabet tactile. Pour cette technique, les auteurs annoncent la possibilité de produire un total de 136 items en utilisant les deux mains de l’utilisateur, soit un IT maximum inférieur à 7,1 bits. D’autre part, l’utilisation de mouvements apparents facilite aussi la création d’items vibrotactiles. EdgeVib [133] permet de dessiner sur le dessus de l’avant-bras une représentation simplifiée des lettres de l’alphabet. L’IT d’EdgeVib est évalué à approximativement 5 bits. Park *et al.* [175] créent une interface vibrotactile atteignant un IT estimé entre 4.55 et 7.02 bits en utilisant entre 2 et 4 vibreurs sur le dos d’une tablette. Finalement, Tan *et al.* [237] après 6 h de familiarisation mesurent un IT compris entre 5.6 et 6.5 bits pour des motifs d’une durée comprise en 125 et 500 ms qui combinent spatialement différents stimuli multi-fréquentiels variant en intensité.

3.1.3.3 La vitesse du transfert d’informations

Après avoir créé un ensemble d’items vibrotactiles distinguables, les concepteurs d’une interface peuvent être intéressés par la vitesse à laquelle ils peuvent présenter l’information à l’utilisateur. La vitesse du transfert d’informations, notée IT_{rate} en bit/s, est définie comme le produit de la quantité d’information par item, en bit/item, par la vitesse de présentation, en item/s. Une estimation de IT_{rate} est calculable en utilisant la théorie de Shannon à partir de l’équation 3.5 pour un ensemble de n items avec un temps moyen de reconnaissance T et ayant un taux d’identification moyen p .

$$IT_{rate} = \left(\frac{60}{T} (\log_2(n)) \right) + p \cdot \log_2(p) + \log_2 \left(\frac{1-p}{n-1} \right)^{1-p} \quad (3.5)$$

Puisque la génération des items prend un certain temps, il est tentant pour augmenter la vitesse de présentation de l’information de réduire la durée des stimuli afin de présenter plus d’items. Cependant, la vitesse du transfert d’informations ne dépend pas seulement de la durée des stimuli comme il est montré par l’équation, 3.5 mais aussi du temps nécessaire pour que l’utilisateur capte l’information. Ce temps de réaction dépend alors de la complexité de la métaphore et de la nature des stimuli. L’analyse faite par Wang *et al.* [261] montre que les temps de réaction des indices vibrotactiles varient en fonction des dimensions vibrotactiles utilisées. Le temps de réaction le plus rapide survient généralement en réponse à la détection de l’apparition ou de la disparition d’un stimulus. Ils ont alors observé qu’en moyenne, les utilisateurs ont un meilleur temps de réponse lorsqu’ils doivent identifier un stimulus spatial en comparaison à d’autres représentations de l’information par exemple les alphabets tactiles codés (Morse).

Ainsi, la durée des stimuli ne doit pas être trop réduite sous peine de diminuer la capacité des utilisateurs à reconnaître ces stimuli [237]. Tan *et al.* [237] suggèrent d'augmenter la quantité d'informations par items pour améliorer la vitesse de communication. Pour une représentation abstraite de l'information (en comparaison avec les langages naturels), la vitesse optimale de présentation se situe entre 2 et 3 items/s. Cependant, un compromis doit être trouvé entre la complexité des items et la durée de présentation. En effet, la reconnaissance d'un item plus complexe nécessite généralement plus de temps à l'utilisateur.

Tan *et al.* [237] ont mesuré que le canal vibrotactile à un IT_{rate} d'informations en pic se situant entre 10 à 13 bits/s en moyenne (et pouvant aller jusqu'à 18 bit/s) pour une représentation spatiale de l'information. Ce débit d'informations est mesuré pour une vitesse de présentation de 1.9 à 4.5 items/s et pour une quantité d'informations par item allant de 6.4 à 2.81 bits. En comparaison, Summer *et al.* [229] ont évalué que l' IT_{rate} moyen pour un seul vibreur sur le poignet de 7 bits/s et un seul vibreur sur le bout des doigts était de l'ordre de 5 bits/s pour des séquences de 3 stimuli d'intensité et de fréquence variables. Ce qui semble confirmer que l'amélioration de la vitesse de communication nécessite le recours à plusieurs positions. Il faut toutefois noter qu'ils considèrent seulement des dispositifs de communication ne présentant des informations qu'une à une et dans une seule direction.

Liao *et al.* [133] font, par exemple, le choix d'utiliser une matrice de vibreurs de 2 par 2 au lieu de 3 par 3 pour réduire le temps de présentation en sacrifiant l'expressivité du dispositif. L'amélioration de la vitesse de communication passe aussi par le caractère explicite de la représentation plutôt que par l'optimisation du temps de présentation [107].

La continuité de la communication L'information peut être présentée à l'utilisateur de manière continue ou discrète. En continu, l'information peut être représentée par un stimulus continu (retour vibrotactile) [114] ou bien en présentant périodiquement des items à l'utilisateur. En mode discret, l'information est présentée à la demande [182].

Cependant, il est nécessaire de limiter la stimulation vibrotactile, car celle-ci peut être la source d'une fatigue tactile. La communication en continu, particulièrement sur les mains et les poignets, peut provoquer à terme des traumatismes physiques comme une perte temporaire voir définitive des sensations tactiles ou des douleurs chroniques [68]. Ainsi, pour réduire les risques pour l'utilisateur, il est préférable de limiter l'exposition aux vibrations. La norme ISO 2631-5 :2018 restreint l'exposition des vibrations sur une période de 8 heures à une intensité moyenne inférieure à $2.5 m/s^2$. De plus, la stimulation répétée d'une région du corps provoque un phénomène d'adaptation. L'adaptation, qui peut durer plus de 25 minutes, apparaît plus rapidement avec l'augmentation de l'intensité vibratoire. Ce phénomène a des effets secondaires sur la perception et provoque une augmentation des seuils de perception absolue et des seuils de discrimination [89]. Cependant, la discrimination de l'intensité et de la fréquence semble s'améliorer pour des stimuli proches du stimulus pour lequel l'adaptation est provoquée [242]. Les risques d'adaptation peuvent être diminués en changeant la fréquence des stimuli entre les différents axes perceptuels [190].

Par conséquent, il est préférable de réduire la durée totale de stimulation en observant un temps mort suffisant entre les stimuli ou bien de privilégier une communication discrète.

Le traitement de l'information L'information est traitée habituellement de manière séquentielle comme cela est fait pour la majorité des langages naturels. Mais il est aussi

possible de la présenter simultanément en présentant par exemple plusieurs items simultanément à différentes positions. Cette technique peut être efficace pour augmenter la vitesse de présentation de l'information. Cependant, la présentation simultanée de plusieurs items impose que l'utilisateur partage son attention entre les différentes positions. Il est alors préférable de la limiter à deux items simultanément [78, 166]. Dans le cas où des items complexes sont utilisés, cette technique peut rapidement se transformer en un capharnaüm tactile [59, 67]. Ainsi, il est conseillé d'utiliser des motifs simples avec un taux de reconnaissance élevé afin de maximiser les chances pour l'utilisateur de recevoir l'information. Cependant, puisque l'attention de l'utilisateur est divisée, il aura peut-être besoin de plus de temps pour interpréter ce qu'il ressent. Il est alors nécessaire d'ajuster le temps de présentation par items pour en faciliter la reconnaissance. La présentation séquentielle facilite par conséquent la reconnaissance des items vibrotactiles par l'utilisateur [207, 212]

La présentation simultanée d'information peut potentiellement être améliorée en plaçant les vibreurs sur différents dermatomes. Les dermatomes correspondent à des régions dont l'influx nerveux est traité par des parties différentes du cerveau et qui en conséquence ont le potentiel de faciliter la reconnaissance des stimuli [212]. Bien que les résultats préliminaires montrent que pour des utilisateurs non entraînés, la présentation séquentielle des stimuli vibrotactiles sur un même dermatome ou entre deux dermatomes reste meilleure que la présentation simultanée. Une amélioration sur le long terme avec suffisamment d'entraînement est cependant attendue.

L'activation simultanée de plusieurs vibreurs permet aussi la réduction de la charge cognitive de l'utilisateur en réduisant le temps de génération de certains items vibrotactiles. Kim *et al.* [107] observent en effet une amélioration du taux de reconnaissance d'images vibrotactiles lorsque les vibreurs constituant la matrice du dispositif de communications sont activés deux à deux au lieu d'un par un.

3.1.3.4 L'importance de la personnalisation et de l'entraînement

Pour améliorer la discrimination, la personnalisation des stimuli vibrotactiles pour chaque utilisateur peut être obligatoire. En effet comme la perception tactile varie entre les utilisateurs, il devient difficile de créer des stimuli complexes qui soient identifiables par beaucoup d'utilisateurs. Il faut, pour cela, ajuster les stimuli à la perception de chaque utilisateur en évaluant leurs seuils absolus de détection et de discrimination. Pour estimer ces seuils, une méthode est la procédure en escalier proposée par Morioka *et al.* [154]. Il peut être aussi possible de laisser l'utilisateur ajuster personnellement chaque item [113].

L'amélioration de la communication tactile se fait aussi grâce à la familiarisation de l'utilisateur avec les stimuli et par l'entraînement. L'entraînement peut améliorer la perception générale de l'utilisateur [79]. Stronks *et al.* [226] ont constaté que 30 minutes d'entraînement peut-être suffisant pour réduire le seuil de détection de l'intensité en moyenne de 36% et le seuil de discrimination de 44%. Glucan *et al.* [84] observent aussi une différence de rapport de Weber pour la durée entre un groupe d'utilisateurs considéré comme experts, ici des musicien (0,32) et groupe d'utilisateurs non expérimentés (0,40). L'entraînement est aussi bénéfique pour améliorer la discrimination des stimuli [66, 128] mais aussi des items [50, 140, 237]. De plus, Enriquez *et al.* [66] constatent que le bénéfice de ces entraînements persiste dans le temps. En effet, ils observent une progression du taux d'identification 14 jours après un entraînement de 20 min.

Cependant, l'entraînement pour de grands ensembles peut être une tâche ingrate pour l'utilisateur lui demandant d'être assidu et de pratiquer de manière régulière [35]. Par

conséquent, il est nécessaire de chercher une méthode appropriée. Plusieurs techniques ont été expérimentées, mais très peu ont été comparées en ce qui concerne les interfaces vibrotactiles. La technique la plus répandue reste celle des « cartons mémoires » qui est une technique d'apprentissage renforcée pour laquelle l'utilisateur doit deviner les items qu'ils lui sont présentés [138, 278]. Pour cette méthode, l'utilisateur teste par série l'ensemble des items et reçoit après chaque reconnaissance la bonne réponse. Ce qui lui permet de vérifier sa réponse et au besoin de se corriger. Pour les applications basées sur une décomposition de l'information en séquences d'éléments unitaires (par exemple les mots en lettre), il est important de vérifier la capacité de l'utilisateur à généraliser son apprentissage à de nouvelles séquences. Ceci peut être évalué en mélangeant de nouvelles séquences jamais rencontrées par l'utilisateur avec celles pour lesquelles il s'est entraîné. Pour ce type d'information, une méthode d'entraînement "top-down" peut alors être utilisée qui consiste à entraîner l'utilisateur directement avec des séquences d'items. Zhao *et al.* [278] observent pour cette méthode une meilleure généralisation des perceptions apprises à de nouvelles séquences, ce qui peut accélérer l'entraînement. D'autres méthodes essaient d'améliorer l'engagement de l'utilisateur. Il est possible, par exemple, de laisser l'utilisateur sélectionner son programme d'entraînement. Cette méthode n'est cependant pas recommandée pour des débutants, car elle demande à l'utilisateur d'être capable de s'autoévaluer et de ne pas se disperser [35]. Plus récemment en 2018, des méthodes d'entraînement passif ont été proposées en cachant la tâche de mémorisation au travers d'un jeu vidéo ou d'une interface ludique pour faciliter l'entraînement des utilisateurs [140, 244].

L'encodage de l'information nécessite donc de concevoir une technique ou métaphore afin de traduire l'information par différents stimuli vibrotactiles. La nature de l'information et le nombre d'informations devant être communiquées sont deux paramètres de conception qui vont considérablement influencer la dimension principale des stimuli utilisés. Bien que complexifier les stimuli en combinant plusieurs dimensions permette d'augmenter le nombre théorique d'informations pouvant être transmises, l'encodage de l'information doit aussi tenir compte de la vitesse à laquelle elle doit être transmise. Un aspect important de la conception est alors de prendre en considération la capacité de l'utilisateur à progresser en proposant par exemple des solutions lui permettant de se perfectionner.

3.1.4 Synthèse

Le tableau 3.1.4 rassemble un total de 21 caractéristiques qui viennent d'être extraites de la littérature et qui sont utilisées pour concevoir des interfaces vibrotactiles. Dans ce tableau, nous trouvons l'identifiant (Id) de la caractéristique utilisée dans l'application, le nom de la caractéristique, la liste des valeurs qu'elle peut prendre et la section dans laquelle ces valeurs ont été discutées précédemment.

3.2 TacTool, un outil d'assistance pour le design vibrotactile

Cette section présente TacTool, un outil d'aide à la conception. Nous présentons ici comment, à partir de l'état de l'art précédent et en nous appuyant sur les 21 caractéristiques identifiées (Tab. 3.1.4), nous avons conçu une interface web qui permet à des

Id	Caractéristiques	Valeurs	Section
F1	Body Part	{Unspecified, Head, Face, Neck, Shoulder, Arm, Forearm, Hand, Palm, Finger, Torso, Belly, Back, Leg, Foot}	3.1.2.2
F2	Display Form	{Unspecified, Mono, Radial/Longitudinal, Matrix}	3.1.2.1
F3	Information Representation	{Unspecified, Ordinal, Symbolic}	3.1.3.1
F4	Ordinal Set Size	{Unspecified, 2-4, Over 4}	3.1.3.2
F5	Symbolic Set Size	{Unspecified, 2-10, Over 10}	3.1.3.2
F6	Simultaneity	{Unspecified, Sequential, Simultaneous}	3.1.3.3
F7	Continuity	{Unspecified, Continuous, Discrete}	3.1.3.3
F8	Multi Body Part	{Unspecified, No, Yes}	3.1.2.2
F9	Spatial Pattern	{Unspecified, No, Yes}	3.1.1.3
F10	Spatial Allocation	{Unspecified, No, Yes}	3.1.1.3
F11	Apparent Motion/Position	{Unspecified, No, Yes}	3.1.1.3
F12	Spatial Enhancement	{Unspecified, No, Yes}	3.1.1.3
F13	Temporal Pattern	{Unspecified, No, Yes}	3.1.1.2
F14	Duration	{Unspecified, Mono, Multi}	3.1.1.2
F15	Rhythm	{Unspecified, Mono, Multi}	3.1.1.2
F16	Perception Level	{Unspecified, Just Noticeable (< 10 dB SL), Noticeable (10-55 dB SL), Uncomfortable (> 55 dB SL)}	3.1.1.1
F17	Intensity Level	{Unspecified, Mono, Multi}	3.1.1.1
F18	Perception Channel	{Unspecified, 0-80 Hz, 80-300Hz}	3.1.1.1
F19	Frequency Level	{Unspecified, Mono, Multi}	3.1.1.1
F20	Waveform	{Unspecified, Mono, Multi}	3.1.1.1
F21	Rugosity	{Unspecified, Mono, Multi}	3.1.1.1

TABLE 3.2: 21 caractéristiques et leurs valeurs servant à décrire les interfaces vibrotactiles.

utilisateurs de parcourir les recommandations faites dans cet état de l'art.

3.2.1 Les recommandations

Depuis ACM Digital Library et Google Scholar, principalement dans deux domaines de recherche que sont Perception et Psychologie et Interaction Humain-Machine, nous avons sélectionné 97 articles afin de formuler des recommandations sur la conception des interfaces vibrotactiles. Ces articles ont été choisis parce qu'ils présentent différentes évaluations en rapport avec la perception humaine des stimuli vibrotactiles ou bien sur différentes techniques de communication vibrotactiles indépendamment d'un contexte métier. Ces articles sont associés au sujet avec les mots clés suivants : « tactile and vibration perception », « tactile and vibration sensations », « vibration sensations », « vibrotactile displays », « vibrotactile communication », « frequency », « wave forms », « intensity », « spatial illusion », « duration », « spatial patterns », « temporal patterns », « simultaneous », « sequential », « continuous ».

Un total de 181 recommandations ont été écrites en reformulant les résultats et discussions proposées par ces 97 articles retenus. Ces recommandations proposent ainsi des instructions pour faciliter la conception et la mise en œuvre des interfaces vibrotactiles en prodiguant des conseils et en alertant sur différents aspects liés aux 21 caractéristiques que nous avons énumérées. L'ensemble des recommandations formulées se trouvent dans l'annexe A.

3.2.2 TacTool avec une carte mentale

Pour ne pas présenter les recommandations sous la forme d'une simple liste qui est difficilement exploitable, nous avons proposé une solution interactive pouvant aider un concepteur à explorer et trier ces recommandations. Nous avons d'abord proposé dans une première version de représenter ces recommandations sous une forme arborescente de type carte mentale (Fig. 3.10). Cette représentation permet d'organiser les différentes caractéristiques en 4 branches principales (architecture et information, métaphore directe, métaphore temporelle et métaphore spatiale), pouvant être explorées progressivement par les utilisateurs de TacTool. Pour cela, les nœuds principaux de cette carte mentale sont des questions sur différents choix de conception conduisant l'utilisateur à considérer la création de métaphores directes, spatiales ou temporelles. Ces questions sont alors connectées aux feuilles de l'arbre qui apportent les définitions et les recommandations associées aux mots clés de la question. Ces feuilles sont complétées par des références scientifiques d'où les définitions et les recommandations sont liées. Une question conduit aussi à de nouvelles questions permettant aux utilisateurs de rentrer progressivement dans les détails de chaque sujet abordé.

Ces connexions conduisent alors à une augmentation de la complexité et à une certaine redondance de l'information. L'indépendance de chaque branche empêche aussi l'utilisateur de considérer facilement les combinaisons des différentes caractéristiques sans explorer chaque branche dans son intégralité. C'est pourquoi nous avons abandonné cette représentation pour une nouvelle version de TacTool cette fois sous la forme d'une application Web, qui se concentre sur une exploration combinatoire de ces recommandations. Pour cela, nous avons dû trier ces recommandations dans une base de données relationnelle.

Le problème avec cette approche est qu'elle aboutit à des branches profondes et indépendantes. Ce qui rend alors difficile la création de passerelles simples entre ces branches alors qu'il existe des recommandations qui connectent ces branches entre elles.

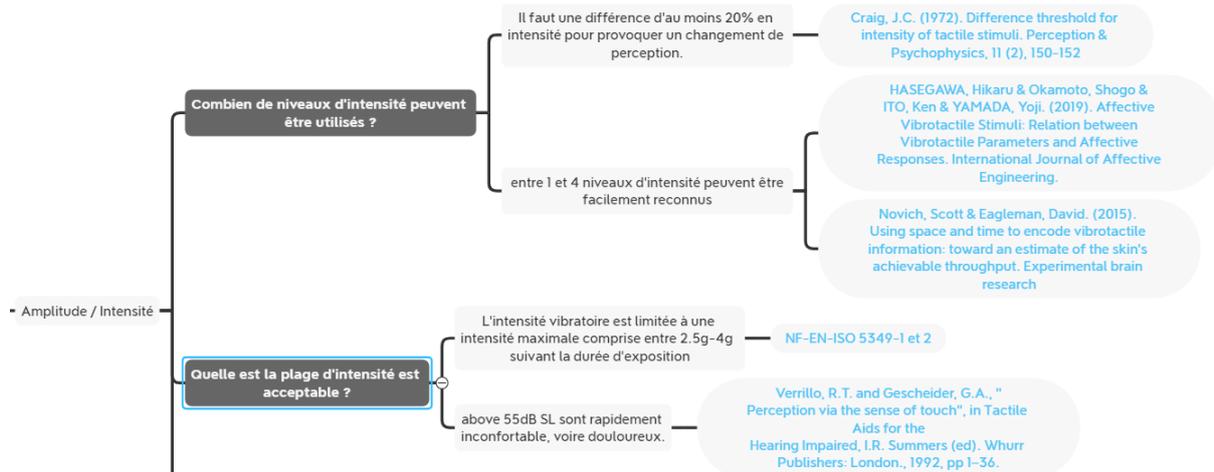


FIGURE 3.10 – TacTool formalisé sous la forme d’une carte mentale.

Par exemple, l’utilisation d’un dispositif utilisant plusieurs vibreurs sur plusieurs parties du corps et un dispositif utilisant plusieurs vibreurs sur une même partie à une incidence sur la conception des stimuli délivrés sur chacun des vibreurs. Ce qui crée des connexions entre la branche dédiée aux métaphores directes avec celle dédiée aux métaphores spatiales. Nous avons ainsi abandonné cette représentation pour une nouvelle version de TacTool qui cette fois se présente sous la forme d’une application Web qui permet une exploration combinatoire des recommandations. Pour cela, nous avons mis en place un système de tri reposant sur l’étiquetage de chaque recommandation.

3.2.3 TacTool avec une application web

L’application web TacTool est développée en utilisant le langage JAVA EE et repose sur plusieurs pages HTML générées à partir de fichiers JavaServer Pages (JSP). TacTool est actuellement déployé sur un serveur Tomcat et est accessible depuis notre site via l’URL suivant : <http://185.219.240.36:8090/TacTool>.

Le développement de cette application a nécessité la création d’une base de données SQL (Fig. 3.11) dans laquelle sont stockées l’ensemble des recommandations. Pour cela, la base de données est structurée autour d’une table *guideline* qui contient l’ensemble des recommandations ainsi que les étiquettes que nous leur avons attribuées. Pour créer ces étiquettes, nous avons converti chacune des 21 caractéristiques en une table. Chaque table porte le même nom que la caractéristique à laquelle elle est associée et contient l’ensemble de ces valeurs (Tab. 3.1.4). Afin d’étiqueter chaque recommandation, la table *guideline* est constituée d’une colonne pour chaque caractéristique permettant de créer une relation un-à-un avec la table correspondante. Une exception existe cependant pour la caractéristique F1 qui regroupe les différentes parties du corps. Afin de pouvoir étiqueter une recommandation avec plusieurs parties du corps, une table de jointure a été créée entre la table *bodypart* et la table *guideline*. Finalement, une table *article* permet d’associer une référence scientifique à chaque recommandation.

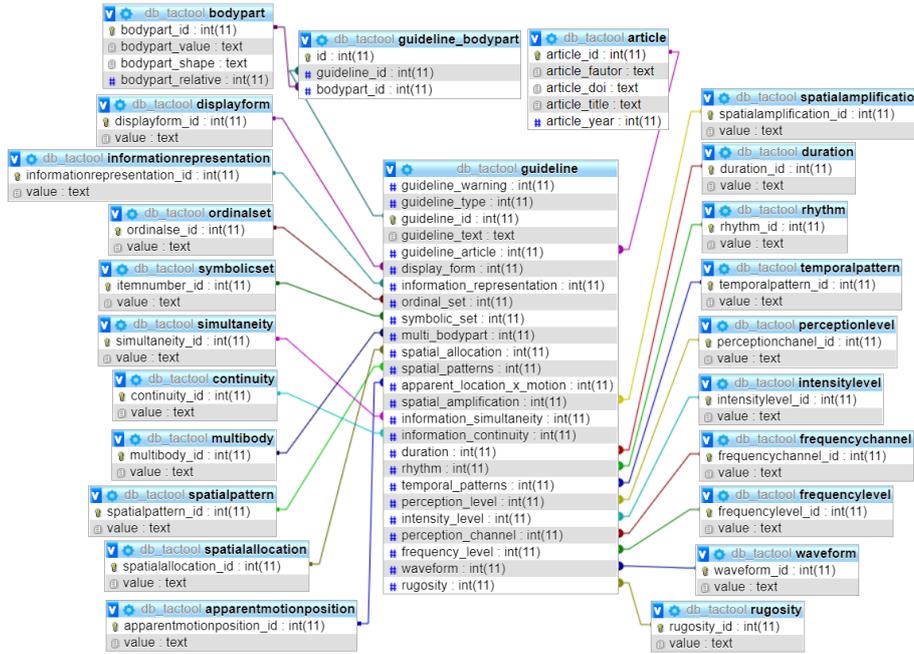


FIGURE 3.11 – Structure de la base de données, générée depuis PhpmyAdmin.

3.2.4 Comment sont étiquetées les recommandations ?

Par défaut, toutes les recommandations reçoivent une étiquette *Unspecified* pour chacune des 21 caractéristiques. Ensuite, pour chaque caractéristique, nous cherchons s’il existe un lien entre la recommandation et la caractéristique. Si pour définir ce lien nous devons répondre à une question de type fermée par exemple « Est-ce que la recommandation est en lien avec l’utilisation de cette caractéristique ? » Si la réponse est *oui* alors la recommandation prend la valeur *Yes*. Dans le cas contraire, elle prend la valeur *No* si elle s’oppose à la recommandation. En revanche, si aucun lien n’est mis en évidence entre les deux alors la valeur de l’étiquette reste à *Unspecified*. Par contre si la question est une question ouverte comme : « Est-ce que la recommandation est en lien avec l’une des valeurs possibles ? » La recommandation reçoit alors l’étiquette avec la valeur pour laquelle ce lien existe. Si toutes les valeurs peuvent être acceptées ou si aucune valeur n’est acceptée alors la valeur de l’étiquette reste à *Unspecified*.

Pour illustrer, la procédure d’étiquetage, nous proposons de commenter l’étiquetage des recommandations suivantes :

(R159) *Warning : Discrimination of the intensity and frequency levels of a stimulus is affected by hair density. [Oliveira et al, 2016][intensity_level : Multi][frequency_level : Multi]*

Pour la recommandation R159, deux étiquettes ont été attribuées concernant les caractéristiques liées à l’utilisation de plusieurs niveaux d’intensité (F17) et de fréquence (F19). Pour cette recommandation, nous sommes alertés sur la difficulté de discriminer une différence d’intensité ou de fréquence en présence de poils. Pour le cas de la caractéristique F17, nous avons trois valeurs possibles *Unspecified*, *Mono*, *Multi*. Comme cette recommandation s’adresse à l’usage de plusieurs niveaux d’intensité, la recommandation reçoit l’étiquette `[intensity_level : Multi]`.

(R171) *Spatial patterns using tactors on both arms tend to be easier to identify than similar patterns using tactors on the same arm.* [Wang et al, 2018][*multi_bodypart*][*spatial_patterns*][*arm*][*forearm*]

Pour la recommandation R171, la recommandation est en relation avec 3 caractéristiques qui permettent d’illustrer cette fois les deux types de questions. D’abord, les deux premières étiquettes sont choisies à partir d’une question fermée. Comme cette recommandation s’applique dans le cadre de motifs spatiaux, elle prend l’étiquette [*spatial_patterns*] et comme elle bénéficie de l’utilisation de plusieurs parties du corps elle prend l’étiquette [*multi_bodypart*]. Les deux dernières étiquettes sont associées à la caractéristique F1 qui fait référence aux différentes parties du corps. Pour cette recommandation, les étiquettes [*arm*][*forearm*] ont été ajoutées étant donné que l’article dont est extraite cette recommandation met en évidence une amélioration pour ces deux parties du corps en particulier sans permettre de la généraliser au reste du corps humain.

3.2.5 Comment sont triées les recommandations ?

Le tri des recommandations depuis la base de données est réalisé grâce à une unique requête SQL générée dynamiquement à partir des choix de conception que fait l’utilisateur. Pour effectuer ces choix, l’utilisateur répond à différentes questions dont les réponses correspondent aux valeurs des 21 caractéristiques. Au démarrage de l’application, chaque réponse est par défaut à la valeur *Unspecified* et TacTool retourne à l’utilisateur l’ensemble des recommandations. Le tri appliqué sur la base de données devient alors de plus en plus sélectif à mesure que l’utilisateur précise son concept. Par conséquent, le nombre de recommandations va en diminuant.

La routine (Fig. 3.12) mise en place pour générer cette requête prend en paramètres d’entrée l’ensemble des étiquettes correspondant aux choix faits par l’utilisateur. Pour chaque valeur qui est différente de *Unspecified*, une condition logique OU est créée pour chaque caractéristique qui combine la valeur de l’étiquette choisie par l’utilisateur et la valeur *Unspecified*. Ces conditions sont combinées en une condition finale séparée par des opérateurs ET. Les étiquettes associées aux différentes parties du corps sont quant à elles traitées séparément afin de réaliser une jointure entre les tables *guideline* et *bodypart*. Ces étiquettes sont combinées pour former une condition OU sur la jointure.

L’exécution de cet algorithme résulte par exemple en la requête suivante :

```
SELECT * FROM guideline WHERE " + ("displayform" = "Mono" OR "displayforme" =  
"Unspecified") AND "duration" = "Mono" OR "duration" = "Unspecified") INNERJOIN  
guideline_bodypart ON guideline.id = guideline_id WHERE " + "bodypart" = "Hand" OR  
"bodypart" = "Unspecified" ;
```

Cette requête permet de trier les recommandations depuis la base de données en fonction de 3 caractéristiques : la caractéristique F1 - *Body Part* pour l’étiquette *Hand*, la caractéristique F2-*Display Form* pour l’étiquette *Mono* et la caractéristique F14-*Duration* pour l’étiquette *Mono*.

Algorithm 1 Générer la requête SLQ

Require: La liste des valeurs sélectionnées V_F par l'utilisateur pour les 21 caractéristiques

```
 $F$ 
for  $i$  from 1 to 21 do
  if  $i == 1$  then
    if  $V_F(i) != \text{"unspecified"}$  then
      for all String  $BodyPart$  in  $V_F[i]$  do
         $Condition\_BP += F[1] + "=" + BodyPart[1] + \dots + F[1] + "=" +$ 
         $BodyPart[n] + \text{"OR"} + F[1] + \text{"= unspecified"}$ 
      end for
    end if
  else
    if  $V_F(i) != \text{"unspecified"}$  then
       $Condition[i] = F[i] + "=" + V_F[i] + \text{"OR"} + F[i] + \text{"= unspecified"}$ 
    end if
  end if
end for
for all String  $s$  in  $Condition$  do
   $Condition\_F += Condition[i] + \text{"AND"} + \dots + \text{"AND"} + Condition[m]$ 
end for
return "SELECT * FROM guideline WHERE" +  $Condition\_F$  + "INNERJOIN
guideline_bodypart ON guideline.id = guideline_id WHERE" +  $Conditions\_BP$ 
```

FIGURE 3.12 – Algorithme permettant la génération des requêtes SQL en fonction des choix de conceptions de l'utilisateur.

3.2.6 Comment utiliser TacTool ?

TacTool propose deux vues séparées : la vue d'accueil permet d'exprimer les caractéristiques de l'interface vibrotactile désirée et la vue solution retourne à l'utilisateur le sous-ensemble de recommandations correspondant.

La première interface est (Fig. 3.13) divisée en quatre volets : *Architecture and Information*, *Spatial Metaphor*, *Temporal Metaphor* et *Direct Metaphor* qui correspondent aux sous-sections de l'état de l'art (voir p.92 , p.87 , p.83 et p.78). Pour aider l'utilisateur à définir les caractéristiques de son interface, chaque caractéristique est associée à une question à laquelle l'utilisateur répond en sélectionnant une des réponses possibles depuis une liste déroulante. Pour chaque question, l'utilisateur a de plus accès à une bulle d'explication qui décrit chaque caractéristique et ses valeurs, ainsi qu'un exemple pris depuis la littérature. Si l'utilisateur n'est tout de même pas capable de choisir une réponse ou si l'ensemble des solutions semblent correspondre à sa situation, il peut laisser la valeur par défaut et passer à la question suivante.

En cliquant sur le bouton *Show Solution*, l'utilisateur accède à la vue solution (Fig. 3.14). Cette page retourne les recommandations dans 4 listes, correspondant aux 4 volets de la page d'accueil, en fonction de la thématique principale de chaque recommandation. Pour compléter la vue solution, une représentation du corps humain permet d'identifier la présence de recommandations spécifiques à certaines parties du corps. Si l'utilisateur veut affiner sa sélection, il peut à tout moment retourner à la vue d'accueil, modifier ses

How to code information using vibrotactile display?

[Help us!](#)

To proceed: Answer to the questions of the different topics in the order that looks the more relevant for your project.

You can update your selections as much as you to modify the outputted guidelines.

The screenshot shows the TacTool interface with four filter buttons at the top: "Architecture and Information", "Spatial Metaphor", "Temporal Metaphor", and "Direct Metaphor". Below these are five questions, each with a dropdown menu and a small circular icon to its right:

- (F8) Do you want to place factors on **multiple body parts**? (dropdown: Unspecified)
- (F9) Do you want to use **spatial patterns** to code information? (dropdown: Unspecified)
- (F10) Do you want to **spatially allocate** information? (dropdown: Unspecified)
- (F11) Do you want to use **apparent location or apparent motion**? (dropdown: Unspecified)
- (F12) Do you want to use multiple factors to provoke **spatial enhancing** effect?: (dropdown: Unspecified)

At the bottom, there are two blue buttons: "Reset" and "Update Solution".

FIGURE 3.13 – La vue d'accueil de TacTool où sont opérés les choix de conception de l'utilisateur.

réponses afin d'affiner le filtre et relancer l'extraction.

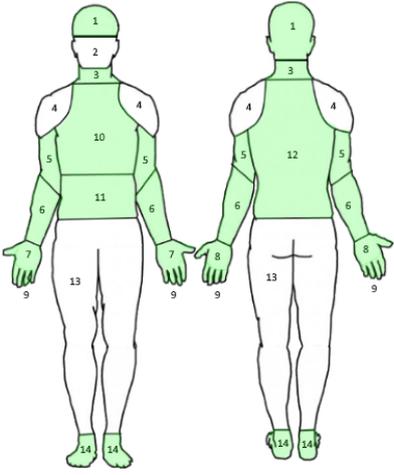
Pour faciliter, l'exploration de ces listes, chaque recommandation est accompagnée par les étiquettes qui lui ont été attribuées. La première étiquette est un lien vers l'article servant de référence scientifique pour la recommandation. Les autres étiquettes sont celles associées aux différentes caractéristiques et permettent à l'utilisateur de trier visuellement le contenu des différentes recommandations. L'affichage de ces étiquettes varie en fonction des valeurs de la caractéristique afin de faciliter leur lecture. Pour les caractéristiques avec des valeurs *No* et *Yes*, l'étiquette est affichée par le nom de la caractéristique quand la recommandation est étiquetée avec la valeur *Yes*. Par exemple, pour la caractéristique *Spatial Pattern*, l'étiquette affichée pour la valeur *Yes* est *[Spatial Patterns]*. Pour les caractéristiques avec des valeurs *Mono* et *Multi*, l'étiquette affiche le nom de la caractéristique suivi de la valeur avec laquelle la recommandation a été étiquetée. Par exemple, pour la caractéristique *Duration*, l'étiquette affichée pour la valeur *Multi* est *[Duration :Multi]*. Pour les autres caractéristiques, l'étiquette est affichée directement par sa valeur. Par exemple, pour la caractéristique *Display Form*, l'étiquette affichée peut être *[Matrix]*.

Dans la suite, nous illustrons l'utilisation de TacTool avec quelques scénarios qui illustrent comment TacTool peut accompagner les utilisateurs dans la création de leur propre interface vibrotactile.

Guidelines for Your Vibrotactile Display

This page provides guidelines sorted out based on choices you have previously made.

Limitations



There is a total of 181 guidelines extracted from 97 references.

Architecture... **Spatial Metaphor** Temporal Metaphor Direct Metaphor

- (58) **Warning:** Vibrations with an intensity higher than 2.5 m/s² at a specific body site must be limited in time.
Exposure should not exceed for this intensity 8h a day. The exposure duration is smaller for higher intensity.
Long exposure to vibration can provoke traumatic consequence (for example chronic pain, loss of sensations ...). [ISO 10816, 2018] [Noticeable]
- (72) **Warning:** Prolonged vibration stimulation on the same location provokes a perception phenomenon named adaptation.
Adaptation is characterized by a change in the perception of vibrations. Adaptation occurs faster with increasing intensity and duration of stimulation.
It can take up to 25 minutes for users to recover from adaptation.
Adaptation has a negative effect on vibration thresholds: it increases the absolute threshold and reduces perceived intensity of vibration. [Hahn, 1966] [continuous] [Noticeable]
- (55) **Warning:** Combining multiple dimensions to create vibrotactile items (for example a combination of intensity, frequency), the number of pieces of information that are communicable is smaller than the product of the quantity of information that each dimension is able to transmit separately. [Rotenberg et al, 1977] [ordinal_set:Over 4] [Noticeable]
- (111) **Warning:** Mixing multiple coding dimensions to create complex vibrotactile

Design Features	User's Choices
Display form	Unspecified
Information Representation	Unspecified
Ordinal Sets	Unspecified

FIGURE 3.14 – La vue solution où l'utilisateur retrouve le sous-ensemble de recommandations obtenu après le tri effectué depuis la base de données.

3.2.6.1 Scénario 1 : EdgeVib [133]

Tout d'abord, TacTool peut-être utilisé pour extraire rapidement un ensemble de recommandations et de références en lien avec une interface précise dans le but de la reproduire. Par exemple, un utilisateur de TacTool pourrait avoir envie de reproduire une interface similaire à EdgeVib [133] afin de communiquer de manière séquentielle et discrète des informations en utilisant des symboles produits à partir de mouvements apparents (motif spatial + temporel). Pour cela, cet utilisateur choisit de créer une matrice de vibreurs sur l'avant-bras avec des stimuli d'intensité, de fréquence, de durée et de rythme unique. L'ensemble des sélections réalisées par l'utilisateur est résumé dans le tableau 3.3. Pour ce scénario, l'utilisateur trouvera un total de 42 recommandations pour 34 références.

3.2.6.2 Scénario 2 : une exploration incrémentale

Un utilisateur moins expert trouvera plus intéressant d'itérer sur ses choix de conception (Tab. 3.4). En effet, TacTool permet de progressivement réduire le nombre de recommandations retournées en spécifiant ces choix au fur et à mesure. Supposons dans ce scénario que l'utilisateur soit intéressé de communiquer de manière séquentielle une quantité spécifique de 10 informations sans avoir d'idée sur la manière de procéder. Il recevra alors à ce stade 159 recommandations issues de 91 références. À la lecture des

ID	Caractéristiques	Choix utilisateurs
F1	Body parts	Forearm
F2	Display form	Matrix
F3	Information Representation	Symbolic Set
F4	Ordinal Sets	Unspecified
F5	Symbolic Sets	Unspecified
F6	Simultaneity	Sequential
F7	Continuity	Discrete
F8	Multiple Body Parts	No
F9	Spatial Patterns	Yes
F10	Spatial Allocation	No
F11	Apparent Location/Motion	Yes
F12	Spatial Enhancing	No
F13	Temporal Patterns	Yes
F14	Duration	Mono
F15	Rhythm	Mono
F16	Perception Level	Noticeable
F17	Intensity Levels :	Mono
F18	Perception Channel	80-300 Hz
F19	Frequency Levels	Mono
F20	Waveforms	Mono
F21	Rugosity Levels	Mono

TABLE 3.3: Scénario 1 : sélection réalisée par l’opérateur depuis l’interface de TacTool.

recommandations, plusieurs valeurs d’IT rapportées indiquent que l’utilisateur devrait se concentrer sur la création d’une métaphore spatiale ou temporelle. L’utilisateur ne pouvant se décider entre les deux options, choisit de sélection à la fois les motifs temporels et spatiaux. De plus, il décide de simplifier les stimuli utilisés en choisissant de fixer le niveau d’intensité, de fréquence et de rugosité, et d’utiliser une seule forme d’onde vibratoire. Il reçoit alors un total de 123 recommandations issues de 75 références. L’utilisateur choisit ensuite d’utiliser un seul vibreur sur une seule partie du corps. En faisant ces deux nouveaux choix, l’application révoque automatiquement le choix de l’utilisateur d’utiliser des motifs spatiaux étant donné que l’architecture de son dispositif ne permet plus de produire des motifs spatiaux. TacTool retourne alors 50 recommandations issues de 36 références. Finalement, l’utilisateur décide d’utiliser des motifs temporels basés sur le rythme seul. Cette dernière itération réduit le nombre de recommandations à 45 issues de 34 références.

ID	Caractéristiques	Sélection 1 Scénario 2	Sélection 2 Scénario 2	Sélection 3 Scénario 2	Sélection 4 Scénario 2	Sélection 5 Scénario 3
F1	Body parts	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Unspecified
F2	Display form	Unspecified	Unspecified	Mono	Mono	Mono
F3	Information Representation	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Ordinal Set
F4	Ordinal Sets	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Over 4
F5	Symbolic Sets	Over 10	Over 10	Over 10	Over 10	Unspecified
F6	Simultaneity	Sequential	Sequential	Sequential	Sequential	Sequential
F7	Continuity	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Unspecified
F8	Multiple Body Parts	Unspecified	Unspecified	No	No	No
F9	Spatial Patterns	Unspecified	Yes	No	No	No
F10	Spatial Allocation	Unspecified	Unspecified	No	No	No
F11	Apparent Location/Motion	Unspecified	Unspecified	No	No	No
F12	Spatial Enhancing	Unspecified	Unspecified	No	No	No
F13	Temporal Patterns	Unspecified	Yes	Yes	Yes	Yes
F14	Duration	Unspecified	Unspecified	Mono	Mono	Mono
F15	Rhythm	Unspecified	Unspecified	Multi	Multi	Multi
F16	Perception Level	Noticeable	Noticeable	Noticeable	Noticeable	Noticeable
F17	Intensity Levels :	Unspecified	Mono	Mono	Mono	Mono
F18	Perception Channel	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Unspecified
F19	Frequency Levels	Unspecified	Mono	Mono	Mono	Mono
F20	Waveforms	Unspecified	Mono	Mono	Mono	Mono
F21	Rugosity Levels	Unspecified	Mono	Mono	Mono	Mono

TABLE 3.4: Scénario 2 et 3 : sélection réalisée par l’opérateur depuis l’interface de TacTool.

3.2.6.3 Scénario 3 : une exploration basée sur la performance

L'utilisateur de TacTool doit être particulièrement attentif aux recommandations que l'outil lui retourne. En effet, TacTool n'est pas capable d'évaluer automatiquement les performances que permet d'atteindre la conception que l'utilisateur envisage. Dans le cas du scénario précédent, si l'utilisateur spécifie maintenant qu'il veut représenter l'information comme un ensemble de valeurs ordonnées, TacTool retournera un ensemble de 41 recommandations issues de 32 références (Tab. 3.4, dernière colonne). En analysant le contenu de ces recommandations, l'utilisateur devrait découvrir qu'en utilisant seulement le rythme pour coder cet ensemble ordonné de valeurs, il s'expose au risque de ne pas pouvoir produire assez d'items distinguables. Il devrait alors revenir sur ces choix et privilégier une représentation spatio-temporelle de l'information en augmentant le nombre de vibreurs de son interface ou en utilisant plusieurs parties du corps.

3.2.6.4 Scénario 4 : une complexification progressive de l'interface

Finalement, TacTool peut aider à augmenter progressivement la complexité de la métaphore de représentation de l'information. Pour cela, l'utilisateur doit démarrer en considérant le dispositif le plus simple possible à partir duquel il souhaite commencer à itérer. Considérons qu'au début, l'utilisateur souhaite démarrer avec un simple stimulus vibrotactile monotone. C'est-à-dire un stimulus facilement perceptible d'un niveau unique d'intensité et de fréquence. L'utilisateur est d'abord intéressé par la création d'un retour vibrotactile continu. Il choisit un dispositif constitué d'un seul vibreur placé sur une partie unique du corps humain. Il souhaite alors associer les variations du signal vibratoire directement sur les variations de l'information. Cet utilisateur peut alors choisir soit d'utiliser plusieurs niveaux d'intensité (Fig. 3.15, 1), soit utiliser un signal temporel basé sur le rythme en faisant varier la durée du temps mort entre deux stimuli (Fig. 3.15, 2).

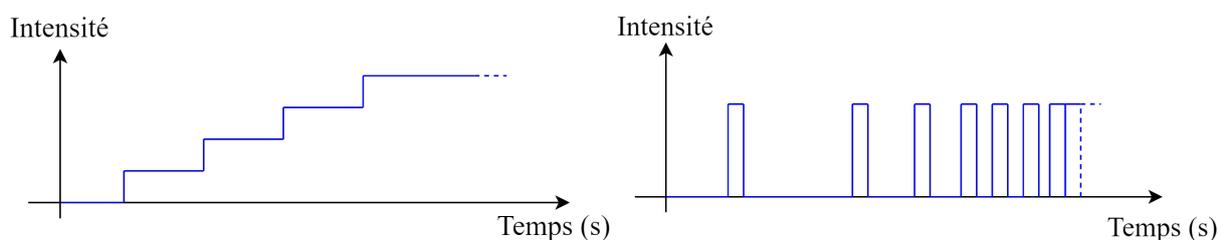


FIGURE 3.15 – Un retour vibrotactile continu basé sur la variation d'intensité, de rythme ou d'une combinaison des deux permettant d'informer, par exemple, d'un obstacle se rapprochant.

Dans le premier cas, TacTool retourne 39 recommandations issues de 30 références pour la représentation basée sur l'intensité. Dans le second cas, TacTool retourne 30 recommandations issues de 25 références pour la représentation rythmique. Il peut aussi considérer de combiner les deux techniques afin de proposer un retour vibrotactile pour lequel le rythme et l'intensité codent pour la même information, 40 recommandations, 30 références (Fig. 3.16).

L'utilisateur souhaite communiquer une seconde information de type qualitative simultanément. Pour cela, il veut créer un retour vibrotactile qui utilise deux dimensions du signal vibratoire séparément. L'utilisateur peut par exemple conserver pour la première information un retour vibrotactile continu basé sur l'intensité. Puis pour la seconde information, il peut utiliser le rythme pour créer un motif temporel d'un, deux ou trois

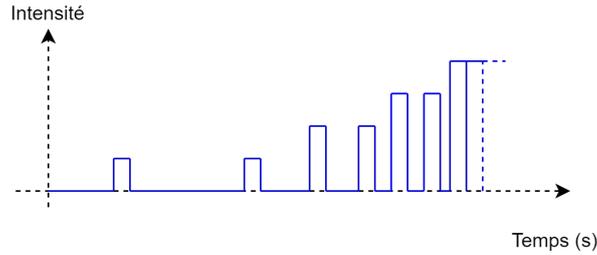


FIGURE 3.16 – Retour vibrotactile combinant rythme et intensité.

stimuli vibratoires (Fig. 3.17, gauche). Il résulte de cette combinaison le retour vibrotactile visible à droite sur la figure 3.17. Pour cette interface, TacTool retourne un total de 44 recommandations s'appuyant sur 33 références. Cet ensemble est supérieur à l'ensemble de recommandations retourné précédemment étant donné que l'on complexifie la technique de communication.

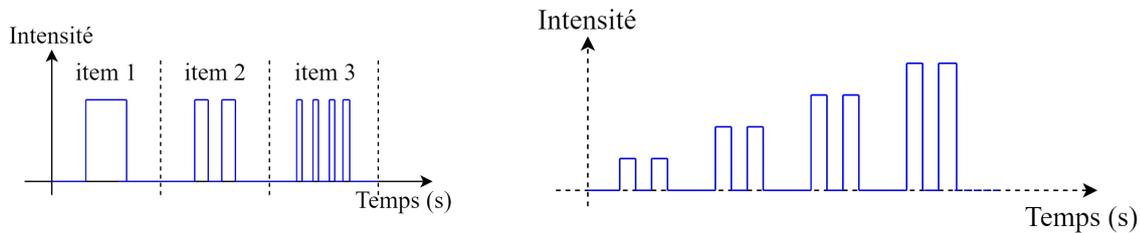


FIGURE 3.17 – (3 motifs vibratoires basés sur le rythme (gauche) représentant par exemple 3 types d'obstacles. Un retour vibrotactile continu utilisant un motif 2D permettant, par exemple, d'informer l'utilisateur de la proximité d'un obstacle de type représenté par l'item 2 (droite).

Si à ce moment du design, l'utilisateur souhaite intégrer une troisième information. Il peut utiliser la position des stimuli, par exemple, en attribuant l'information à un vibreur. Pour cela, il choisit de placer un vibreur sur chaque main (Fig. 3.18). Il conçoit ainsi une interface composée de deux dispositifs mono-vibreurs. À ce stade, TacTool retourne un total de 48 recommandations issues de 37 références.

Finalement, l'utilisateur décide de changer la forme de l'interface afin d'augmenter le nombre de vibreurs de 2 à 3 vibreurs. Il décide alors de remplacer le dispositif précédent par une ceinture (dispositif radial) qu'il positionne sur le dos de l'utilisateur. L'utilisateur fait de plus le choix de changer le mode de présentation de l'information pour un mode de communication séquentiel et discret qui était précédemment simultané et continu. Ce choix est fait pour respecter les recommandations qui préconisent de limiter à 2 le nombre d'informations présentées simultanément à différentes positions (Fig. 3.19). Pour cette dernière interface, TacTool retourne maintenant un total de 59 recommandations issues de 39 références.

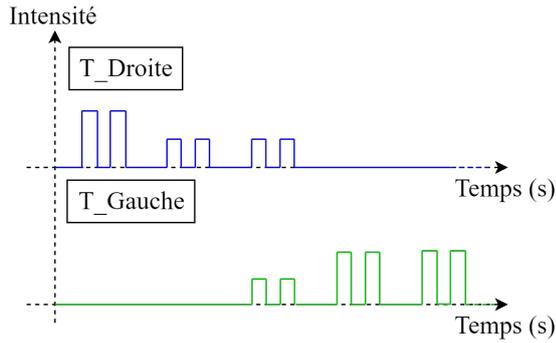


FIGURE 3.18 – Communication continue d’items vibrotactiles 2D permettant, par exemple, d’annoncer les changements de distance de deux obstacles aux positions T_gauche et T_droite, respectivement la main gauche et droite de l’utilisateur.

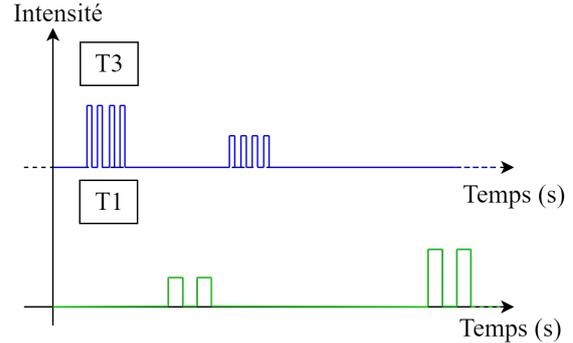


FIGURE 3.19 – Communication discrète d’items vibrotactiles 2D permettant, par exemple, d’annoncer les changements de distance de deux obstacles aux positions T1 et T3. Sur T2 aucune information n’est présentée.

ID	Sélection 1	Sélection 2	Sélection 3	Sélection 4	Sélection 5	Sélection 6
F1	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Hand	Back
F2	Mono	Mono	Mono	Mono	Mono	Radial/Longitudinal
F3	Ordinal Set	Ordinal Set	Ordinal Set	Unspecified	Unspecified	Unspecified
F4	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Unspecified
F5	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Unspecified
F6	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Simultaneous	Simultaneous	Sequential
F7	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous	Discrete
F8	No	No	No	No	Yes	No
F9	No	No	No	No	Yes	Yes
F10	No	No	No	No	Yes	Yes
F11	No	No	No	No	No	No
F12	No	No	No	No	No	No
F13	No	No	No	Yes	Yes	Yes
F14	Mono	Mono	Mono	Mono	Mono	Mono
F15	Mono	Multi	Multi	Multi	Multi	Multi
F16	Noticeable	Noticeable	Noticeable	Noticeable	Noticeable	Noticeable
F17	Multi	Mono	Multi	Multi	Multi	Multi
F18	80-300 Hz	80-300 Hz	80-300 Hz	80-300 Hz	80-300 Hz	80-300 Hz
F19	Mono	Mono	Mono	Mono	Mono	Mono
F20	Mono	Mono	Mono	Mono	Mono	Mono
F21	Mono	Mono	Mono	Mono	Mono	Mono

TABLE 3.5: Scénario 4 : sélection réalisée par l’opérateur depuis l’interface de TacTool.

3.2.7 Bilan de TacTool

En conclusion, TacTool est un outil d’exploration pour les concepteurs d’interfaces vibrotactiles ayant peu ou aucune expérience avec la communication vibrotactile d’informations. Il introduit l’utilisateur à un vocabulaire expert sur ce domaine et offre un ensemble de recommandations facilitant la création des interfaces vibrotactiles. Cet outil peut aussi accompagner les concepteurs lors de l’utilisation d’outils de conception de motifs vibrotactiles comme ceux listés par Panels *et al.* [173]. Les outils présentés par Panels *et al.* sont des outils graphiques qui s’inspirent très souvent d’outils de composition musicale, mais qui bien que très pratiques restent difficiles d’utilisations. En effet, ces outils laissent les concepteurs donner libre cours à leur imagination, leur laissant combiner plusieurs niveaux de différentes dimensions sans les alerter sur les différentes limites de la perception humaine comme nous le faisons dans cet état de l’art. Tactool reste utile

pour les utilisateurs plus expérimentés en offrant un accès rapide à plusieurs références scientifiques.

Plusieurs limitations restent néanmoins non-traitées dans la version actuelle de TacTool. La difficulté reste à maintenir la qualité du contenu de TacTool et de l'enrichir. Une des limites concerne les différences qui existent entre les technologies de vibreurs qui ont des conséquences sur les choix de conception, en particulier avec l'apparition de nouvelles technologies permettant de produire différents stimuli tactiles. Une autre limite concerne la comparaison des techniques basées sur les différentes régions du corps qui a pour le moment un effet limité sur le tri des recommandations. La raison du manque d'efficacité de cette partie du filtre est due à la disparité qui existe entre les informations disponibles pour les différentes parties du corps. En effet, la majorité des études se concentrent sur la partie haute du corps humain (les mains, les bras, le tronc et la tête) alors que le reste du corps est quasi inexploré. Dans ce chapitre, nous faisons mention qu'il existe des différences importantes de perceptions entre les différentes parties du corps humain. Par conséquent, beaucoup de recommandations de TacTool offrent pour le moment un contenu général, notamment sur les différences de perception entre les parties du corps. Il pourrait être intéressant d'explorer ces différences afin de donner des recommandations plus spécifiques.

La force de TacTool réside dans sa capacité à proposer une exploration dynamique de l'état de l'art et des recommandations qui en découlent. Depuis l'interface de TacTool, les utilisateurs ont la possibilité de tester plusieurs combinaisons de caractéristiques afin d'envisager différentes interfaces et d'obtenir des recommandations spécifiques à celle-ci. Dans sa version actuelle, l'application permet d'empêcher les utilisateurs de créer certaines combinaisons quand elles sont physiquement impossibles. L'application alerte aussi les utilisateurs lorsque deux caractéristiques présentent des interactions pouvant entraîner des effets négatifs sur la communication d'information. Cependant, TacTool ne prend pas en considération les performances de communication. Cet outil est donc incapable d'alerter l'utilisateur de l'incompatibilité de ces choix avec le niveau de performance désiré.

Pour améliorer TacTool, il serait nécessaire d'intégrer des indicateurs de performances pouvant guider l'utilisateur dans le choix d'une combinaison de caractéristiques compatible avec son application. Tout d'abord, la capacité de l'interface à produire suffisamment d'items vibrotactiles est importante. La mesure du transfert d'informations est un indicateur qui semble pertinent pour cette tâche. Pour le moment, TacTool retourne cette information seulement au travers de différentes recommandations mais il serait préférable d'afficher cette information au moment de l'expression des choix de conception, d'autres indicateurs qualitatifs peuvent être imaginés. Il peut être intéressant d'évaluer l'effet des différentes caractéristiques sur la vitesse d'apprentissage, sur la durée moyenne de présentation des items, sur la vitesse de transfert de l'information ou sur le temps moyen de réaction de l'utilisateur. Ces différents indicateurs pourraient apparaître sous la forme de jauges colorées dont les intervalles seraient définis à partir du regroupement des résultats de la littérature. Ces jauges évolueraient en fonction des combinaisons réalisées par l'utilisateur.

Finalement, les effets d'un usage prolongé des techniques de communication vibrotactile restent assez flous. D'une part, une exposition régulière et longue aux vibrations est souvent rapportée comme désagréable voire inconfortable étant donné qu'elle peut provoquer des sensations de picotements. Van Erp *et al.* [68] rapportent même le cas d'un adolescent victime de blessures sérieuses suite à une exposition longue à des vibrations de hautes intensités. Pourtant, les interfaces vibrotactiles sont conçues pour produire des interfaces de lecture tactile [139] ou bien même de surveillance [164]. D'autre part, des

exercices vibratoires réguliers peuvent grandement améliorer la reconnaissance vibrotactile. Il est donc intéressant maintenant de mesurer de combien peut-être augmentée la complexité d'une interface et comment ces exercices peuvent faciliter l'intégration de ces dispositifs dans la vie quotidienne des utilisateurs.

Dans le chapitre suivant, grâce à TacTool, nous définissons plus précisément le type d'ambiance vibrotactile adaptée pour la surveillance des procédés de fabrication additive et à son implémentation sous la forme de deux bracelets vibrotactiles.

Chapitre 4

La fabrication additive augmentée

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la création d'une ambiance vibrotactile pour la surveillance d'un système automatisé de fabrication. Par cette ambiance, nous souhaitons alerter un opérateur de l'apparition d'un dysfonctionnement d'un processus automatisé tout en l'informant sur la nature du dysfonctionnement. Cette ambiance doit être capable de communiquer à un opérateur en mobilité un total de 5 critères de fabrication de nature géométrique et thermique comme nous les avons identifiés au Chapitre 2 et que nous définissons dans ce chapitre. Pour ce faire, nous commençons par donner une définition générique de cette ambiance pour la modalité vibrotactile. Puis avec l'aide de TacTool présenté au Chapitre 3, nous créons d'un bracelet vibrotactile capable de produire une telle ambiance. Nous avons nommé ce bracelet ViMA, pour Vibrotactile Monitoring Armband. ViMA permet de créer 20 items vibrotactiles, combinant un motif temporel et une position, dont nous évaluons les performances. À partir de ViMA, nous avons développé ViMAAM, pour Vibrotactile Monitoring Armband for Additive Manufacturing. La spécification de ViMAAM se caractérise alors par la création de 18 symboles vibrotactiles permettant l'expression des 5 critères de fabrication. Nous concluons par la présentation des hypothèses d'une seconde expérimentation devant valider le choix de ces symboles.

4.1 La création d'un dispositif vibrotactile pour la surveillance des procédés automatisés

Nous souhaitons créer une ambiance vibrotactile qui puisse d'une part rassurer l'opérateur du bon fonctionnement d'un procédé automatisé dont il a la responsabilité, et d'autre part, de l'alerter lorsque celui-ci dysfonctionne en lui communiquant des informations de plusieurs critères caractérisant la nature du dysfonctionnement. Pour cela, nous devons définir les propriétés de cette ambiance puis nous intéresser à la création d'un dispositif capable de produire cette ambiance. Les différentes interfaces présentées au chapitre 3, nous permettent d'envisager plusieurs modes de communication qu'il nous faut discuter, ceci en tenant compte d'un cadre où plus de deux informations doivent être communiquées de manière concurrente et en continu sur une longue durée (possiblement une journée complète de travail, soit environ 8 h).

4.1.1 Une ambiance vibrotactile par présentation variable et répétée d'un message séquentiel évolutif

Pour parvenir à notre objectif de créer notre ambiance, nous nous sommes d'abord aidés de TacTool afin de répondre à une première question :

Comment doit être structurée et présentée l'information à l'utilisateur ?

4.1.1.1 Le choix d'une représentation séquentielle de l'information

Afin de répondre à cette question nous nous sommes concentrés sur les aspects liés au volet *Architecture and Information* de la page d'accueil de TacTool. Il nous est possible de coder l'information par une stimulation vibratoire continue ou bien par des items vibrotactiles. Ces items vibrotactiles sont des motifs vibratoires d'une durée finie combinant différents stimuli qui reconnus permettent à des utilisateurs de les distinguer les uns des autres [235]. Le recours à une stimulation continue implique quant à elle de produire une fonction de transfert qui associe l'information aux variations d'un signal vibratoire. Cette représentation est donc une représentation de type ordinal. Comme nous avons pour objectif de communiquer l'information de 5 critères différents simultanément à l'utilisateur, il serait alors nécessaire de créer autant de signaux vibratoires continus que d'informations, et de les présenter simultanément à l'utilisateur. Si nous entrons ce choix de représentation depuis l'interface de TacTool pour la communication en continu de plusieurs informations simultanément, TacTool retourne un total de 126 recommandations issues de 77 références. Or, la perception de plus de 2 signaux vibratoires en parallèle est jugée difficile [59, 77, 166] (Annexe A, recommandation n°18) car ces signaux se masqueraient les uns les autres [51].

Nous devons donc opter pour la seconde approche est choisir une représentation symbolique de l'information. Pour cela, nous proposons de présenter de manière périodique un message vibrotactile renvoyant l'information des différents critères. Ce message présentera alors l'information en continu et séquentielle sur un intervalle de temps donné compatible avec le système observé. Cette seconde approche nécessite de créer autant d'items que d'informations différentes à communiquer. Nous choisissons de créer une interface pouvant produire plus de 10 items vibrotactiles différents. En rentrant les caractéristiques de cette interface dans TacTool, l'outil nous retourne 130 recommandations issues de 78 références. Pour cette sélection, le premier onglet de la page solution de Tactool, nous invite à réduire la durée totale de stimulation afin de réduire la fatigue tactile de l'utilisateur (Annexe A, recommandation n°54). Il nous faut donc optimiser la communication d'informations en minimisant le nombre d'items vibrotactiles communiqués à l'utilisateur. Nous décidons alors de distinguer, d'un côté, une situation normale correspondant à la situation maîtrisée pour laquelle nous faisons l'hypothèse qu'elle est présente la majorité du temps, et d'un autre côté, nous distinguons différentes situations de dysfonctionnement qui échappent à l'automatisation.

4.1.1.2 Une vitesse de présentation des items adaptée en fonction de la situation

L'ambiance vibrotactile que nous souhaitons proposer doit alors permettre de distinguer ces deux types de situations et alerter l'utilisateur dès qu'un dysfonctionnement apparaît. Pour cela, nous pouvons comparer cette ambiance aux ambiances sonores pour lesquelles il est possible en faisant varier le tempo et le volume d'alerter l'utilisateur.

Dans le cas de notre ambiance vibrotactile, le tempo désigne la vitesse de présentation des messages vibrotactiles, et le volume fait référence à l'intensité ressentie des vibrations. C'est pourquoi nous proposons de transposer les propriétés d'une ambiance sonore à une ambiance vibrotactile afin de distinguer la situation normale des situations de dysfonctionnement. Il nous faut donc définir deux modes de communication différents pour représenter la situation normale et celles de dysfonctionnement.

La représentation de la situation normale Afin de garantir le confort de l'utilisateur, il est nécessaire de limiter au maximum la durée et l'intensité de stimulation [68]. Dans cette optique, comme la situation normale est associée à une situation maîtrisée, il devient possible de réduire la durée totale de stimulation en diminuant la vitesse de rafraîchissement des messages vibrotactiles. Autrement dit, il s'agit de transmettre moins de messages vibrotactiles quand tout va bien. Cependant, nous voulons tout de même créer un message vibrotactile pour exprimer cette situation, car communiquer quand *tout-va-bien* pourrait avoir effet de rassurer l'utilisateur. Ainsi, les stimuli choisis doivent être discrets, au sens de non dérangeants, afin de limiter les risques d'interruption de tâche. Il est donc préférable d'utiliser des stimuli de faible intensité proche du seuil de détection et de courte durée [183] (Annexe A, recommandation n°72). Pour ces stimuli, il faut opter pour une présentation la plus espacée dans le temps possible même si cela augmente les chances que l'information soit perdue.

Pour la situation normale, la vitesse de rafraîchissement des messages n'a pas besoin d'être fixe. Il peut être même utile de faire varier l'apparition du message *tout-va-bien*. Cela pourrait mettre en alerte l'utilisateur de manière progressive que le système vient à s'écarter de sa plage de fonctionnement, sans pour autant dysfonctionner. L'opérateur n'aura alors pas une information précise sur la situation, car elle est toujours considérée comme normale, mais pourra tout de même anticiper un éventuel dysfonctionnement. Nous cherchons donc à créer, pour cette situation, un mode de communication non-intrusif et de faible bande passante similaire au mode de communication proposé par Pielot *et al.* [183]. Leur technique de communication repose sur un battement cardiaque vibrotactile dont l'intensité est proche du seuil de détection pour être traitée de manière périphérique, diminuant ainsi la prise d'attention.

La représentation des situations de dysfonctionnement Par contre, lorsqu'une situation de dysfonctionnement apparaît, il est nécessaire de créer une rupture pour capter l'attention de l'utilisateur. Pour cela, le passage d'une situation normale vers une situation de dysfonctionnement est caractérisé par une nette augmentation de la vitesse de rafraîchissement des messages vibrotactiles. Ce changement a pour effet d'augmenter le nombre de stimuli vibrotactiles transmis à l'utilisateur par unité de temps, qui, combiné avec des stimuli de plus fortes intensités, doit interpeller l'utilisateur [70, 246]. Pour ce type de situation, nous souhaitons par contre fixer la vitesse de rafraîchissement des messages en fonction de la dynamique du système, et cela afin que les messages communiqués par l'ambiance correspondent à la situation observée.

Pour représenter les situations de dysfonctionnement, deux approches doivent être considérées. La première consiste à créer un item vibrotactile représentant chacune des situations possibles décrites par les critères, alors que la seconde consiste à coder les différentes valeurs que peut prendre chacun des critères décrivant les différentes situations. Dans le second cas le message vibrotactile transmis à l'utilisateur est une séquence de symboles vibrotactiles dont l'information est représentée par un item vibrotactile. La

seconde approche est ici préférable, car elle demande à l'utilisateur d'apprendre à reconnaître moins d'items vibrotactiles. De plus, cette seconde méthode facilite l'ajout ou la suppression d'informations dans le message vibrotactile sans exiger de l'utilisateur de réapprendre l'ensemble des items vibrotactiles qui correspondent aux situations pour lesquelles un élément d'information a été inséré ou supprimé. Toujours dans le but de créer une ambiance tactile qui limite la quantité de stimuli délivrée à l'utilisateur, les messages de dysfonctionnement n'expriment que les valeurs caractérisant le dysfonctionnement.

4.1.1.3 Le rafraîchissement des messages

Pour assurer une communication en temps réel, il est nécessaire de rafraîchir régulièrement l'information transmise à l'utilisateur, notamment durant les situations de dysfonctionnement où l'état du système est changeant. Cette vitesse de rafraîchissement doit permettre de suivre l'évolution de la tâche réalisée par le système. Pour la fabrication additive, c'est la vitesse de déplacement de l'outil qui conditionne cette progression. Dans l'idéal, l'opérateur doit pouvoir répondre à l'apparition d'un défaut avant qu'il ne soit recouvert afin de pouvoir le caractériser visuellement. Il est donc nécessaire que l'information soit régulièrement rafraîchie pour qu'il puisse quantifier l'importance du défaut. C'est pourquoi nous imposons une vitesse de rafraîchissement de 1 message par seconde. Imposer une durée de rafraîchissement pour la présentation des messages permet de discrétiser le déroulement de la fabrication dès l'apparition d'un dysfonctionnement. Le message résulte ainsi de l'évaluation de chaque critère sur cet intervalle de temps.

Cette vitesse de présentation est compatible avec les limites de la communication vibrotactile, d'autant plus que les messages transmis ne devraient que partiellement changer d'un message à un autre étant donné que nous suivons un processus physique continu. Une répétition fréquente des messages doit ainsi faciliter la captation de l'information par l'utilisateur en réduisant la quantité de stimuli qu'il devra interpréter de nouveau.

4.1.2 Vibrotactile Monitoring Armband (ViMA)

Dans la suite, nous présentons la conception d'un dispositif vibrotactile permettant la création de l'ambiance vibrotactile définie précédemment ayant les caractéristiques suivantes :

- Communiquer un message toutes les secondes lors d'une situation de dysfonctionnement
- Communiquer des messages séquentiels d'une longueur maximale de 5 symboles d'une durée maximale d'une seconde.

4.1.2.1 Le choix d'un bracelet aux poignets

Tout d'abord, il nous faut faire le choix d'un emplacement pour notre interface vibrotactile. Nous éliminons tout d'abord la région de la tête et du cou deux régions sensibles sur lesquelles des stimulations vibrotactiles peuvent être pénibles sur la durée. Ensuite, il est possible de remarquer que les doigts, les mains, les avant-bras et le tronc sont les parties du corps les plus largement utilisées dans la littérature. Étant donné que notre utilisateur est amené à réaliser diverses tâches manuelles, nous devons conserver la liberté de ses mains. L'utilisation des doigts et de la main est alors proscrite. Une ceinture ou un bracelet vibrotactile sont donc à privilégier. Comparés au tronc, les avant-bras offrent une meilleure sensibilité vibrotactile [42, 44], plus particulièrement au niveau des articulations

où la concentration de mécanorécepteurs est plus grande. Il est aussi possible d'envisager les membres inférieures comme les jambes ou les pieds, mais que nous écartons en perspective de l'intégration de cette interface dans un périphérique avec lequel l'utilisateur peut facilement interagir. Nous choisissons ainsi de créer un bracelet vibrotactile qui sera porté au poignet de l'utilisateur.

4.1.2.2 TacTool : La création d'items spatio-temporels

Nous nous intéressons ici plus particulièrement à la création des items vibrotactiles permettant d'exprimer les différentes situations de dysfonctionnement. Pour cela, nous avons effectué une extraction depuis TacTool en 4 itérations que nous avons résumées dans le tableau 4.1.

Les messages de dysfonctionnement se caractérisent par la présentation de courtes séquences de symboles vibrotactiles. Afin de capter l'attention de l'utilisateur, les items vibrotactiles utilisés pour ces différents symboles doivent être facilement perçus. Afin de proposer un mode de communication qui reste confortable, nous optons pour des stimuli restant à un niveau d'intensité confortable. Cette première sélection nous renvoie un total de 130 recommandations issues de 78 références.

Il nous faut utiliser des motifs spatiaux ou temporels afin de pouvoir réaliser un nombre suffisant d'items vibrotactiles sur le poignet de l'utilisateur, compte tenu des valeurs de transfert d'informations comprises entre 4 et 7 bits retournés par TacTool (Annexe A, recommandations n°146, n°154 et n°R155). Ce qui nous conduit à considérer l'utilisation de plusieurs positions autour du poignet. Pour ce dispositif, nous envisageons d'utiliser un bracelet muni de plusieurs vibreurs suivant un positionnement radial (Annexe A, recommandations n°2). Le nombre de positions disponibles limitées à 4 autour du poignet nous amène alors à considérer la création de motifs temporels pour créer différentes sensations à chacune de ces positions. Notre nouvelle sélection de critères de conception nous donne 95 recommandations issues d'un total de 67 références.

À ce point, nous devons alors considérer la combinaison de plusieurs dimensions pour créer différents motifs à partir de stimuli ayant des niveaux différents de durée, rythme, intensité et fréquence. Ce qui réduit le nombre de recommandations à 74 issues de 53 références, dont la lecture nous a permis de faire les choix expliqués dans les sections suivantes.

4.1.2.3 Privilégier la spatialisation

Les études précédentes indiquent que des motifs spatiaux et temporels sont à privilégier pour produire un nombre d'items vibrotactiles supérieur à 10 et facilement identifiables [128, 133, 138, 175]. Dans un cadre où la pression temporelle est élevée (plusieurs items à la seconde), les items vibrotactiles basés sur des motifs temporels sont plus sensibles aux phénomènes de masquage, rendant alors difficile leur identification [68]. En conséquence, pour faciliter leur identification, il devient nécessaire d'augmenter la durée de présentation des stimuli composant ces items. Ceci a alors pour effet d'augmenter le temps de présentation total par items, ce qui n'est pas compatible avec nos objectifs de communication. De fait, nous donnons une priorité à une représentation spatiale de l'information.

4.1.2.4 Une spatialisation autour des poignets

Le poignet offre une bonne acuité spatiale. Des études ont montré qu'il est possible d'identifier 4 positions régulièrement espacées autour de celui-ci avec un taux d'identi-

ID	Caractéristiques	Sélection 1	Sélection 2	Sélection 3
F1	Body parts	Unspecified	Forearm	Forearm
F2	Display form	Unspecified	Radial/Longitudinal	Radial/Longitudinal
F3	Information Representation	Symbolic	Symbolic	Symbolic
F4	Ordinal Sets	Unspecified	Unspecified	Unspecified
F5	Symbolic Sets	Over 10	Over 10	Over 10
F6	Processing	Sequential	Sequential	Sequential
F7	Continuity	Continuous	Continuous	Continuous
F8	Multiple Body Parts	Unspecified	Unspecified	No
F9	Spatial Patterns	Unspecified	Yes	Yes
F10	Spatial Allocation	Unspecified	Unspecified	Unspecified
F11	Apparent Location/Motio	Unspecified	Unspecified	No
F12	Spatial Enhancing	Unspecified	Unspecified	No
F13	Temporal Patterns	Unspecified	Yes	Yes
F14	Duration	Unspecified	Unspecified	Multi
F15	Rhythm	Unspecified	Unspecified	Multi
F16	Perception Level	Noticeable	Noticeable	Noticeable
F17	Intensity Levels :	Unspecified	Unspecified	Multi
F18	Perception Channel	Unspecified	Unspecified	80-300 Hz
F19	Frequency Levels	Unspecified	Unspecified	Multi
F20	Waveforms	Unspecified	Unspecified	Mono
F21	Rugosity Levels	Unspecified	Unspecified	Mono

TABLE 4.1: Les différentes itérations réalisées pour la définition de l'interface vibrotactile ViMA depuis TacTool.

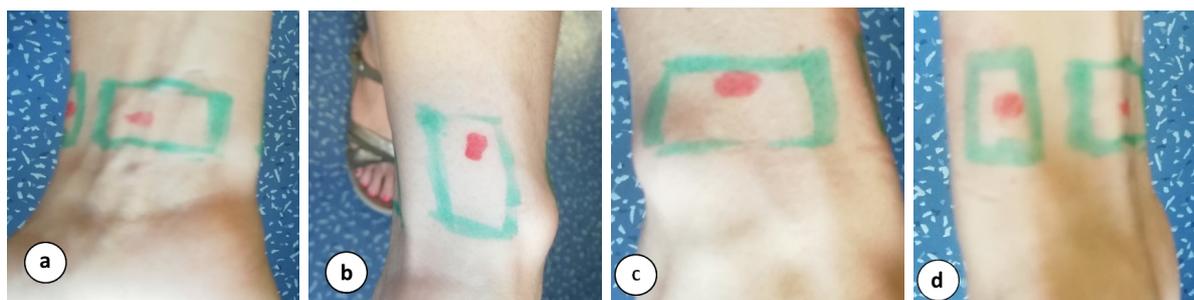


FIGURE 4.1 – Régionalisation de la position des stimuli vibrotactiles autour du poignet de gauche à droite : Dessous, Extérieur, Dessus et Intérieur. La région verte représente le contour de la région pour laquelle les stimuli ont tendance à être identifiés avec la position matérialisée par le point rouge.

cation supérieur à 90% [85, 87]. Ces mesures ont été réalisées pour des stimuli d'intensité constante et d'une durée comprise entre 60 et 1000 ms. Ce qui est compatible avec la durée totale de communication dont nous disposons par messages.

Un exercice perceptuel durant les prétests réalisés avec un vibreur a permis d'identifier que les sensations sont principalement localisées sur 4 zones du poignet. Les sensations sur le dessus et le dessous sont associées à deux grandes régions de peau (Fig. 4.1, (a) et (c)), principalement constituées de tissus mous, alors que les sensations situées à l'intérieur et l'extérieur du poignet sont regroupées sur deux plus petites régions (Fig. 4.1, (b) et (d)), principalement constituées d'os. Ces 4 positions sont donc choisies comme sites initiaux.

En faisant l'hypothèse que la perception est équivalente pour les deux poignets [65, 204, 258], nous pouvons créer 8 items vibrotactiles en utilisant les 4 positions autour des deux poignets de l'utilisateur. Avec cette configuration seule, il est techniquement possible de produire un large nombre d'items vibrotactiles. Ceci est possible par exemple avec la méthode de superposition spatio-temporelle (OST) proposée par Luzhnica [138] ou en utilisant une illusion tactile [133]. Cependant, nous préférons utiliser une technique reposant sur l'attribution spatiale de l'information. Certes, cela réduit le nombre potentiel

d'items vibrotactiles pouvant être construits, mais l'attribution spatiale permet en retour de donner la priorité à la sémantique des items vibrotactiles, en associant une position à une dimension de l'information en particulier. Par exemple, il est facilement possible de créer une relation d'ordre par cette technique et opposer par exemple deux valeurs [163]. Bien que cette technique nécessite d'utiliser plus de vibreurs que nécessaire, c'est une méthode simple pour apporter du sens [67], favorisant ainsi l'apprentissage des items vibrotactiles [278].

En revanche, ce choix de représentation limite la création à un item par position ou par groupe de positions. Il est donc nécessaire d'augmenter la complexité des stimuli utilisés pour augmenter le nombre d'items pouvant communiquer de l'information.

4.1.2.5 La création de motifs temporels pour augmenter l'expressivité

Afin de produire des items supplémentaires et augmenter les possibilités de communication de l'information, il nous faut recourir à des stimuli vibrotactiles plus complexes qu'un simple stimulus monotone. Il s'agit alors de considérer des stimuli combinant plusieurs dimensions que l'utilisateur devra reconnaître aux différentes positions autour du poignet. Quelles options devons-nous alors comparer pour distinguer plusieurs informations sur la même position ?

Pour cela, il est possible de faire varier les propriétés vibratoires du stimulus en utilisant des stimuli d'intensité, de fréquence et/ou de durée différente. Il est aussi possible de créer des motifs temporels courts, basés de préférence sur le rythme plutôt que sur une représentation codée pour laquelle de longs enchaînements d'items rendent difficile la restitution de l'information [195].

Cependant, le recours à une dimension temporelle est préférable à l'utilisation de plusieurs niveaux d'intensité [117]. Il est donc plus indiqué d'exploiter l'acuité temporelle de l'utilisateur, c'est-à-dire sa capacité à juger de la durée et du timing d'un stimulus. En effet, du fait des différences de sensibilités entre deux régions de la peau, un même niveau d'intensité peut être perçu différemment entre ces régions. Ceci rend plus complexe la conception des motifs. Il convient alors d'utiliser plusieurs niveaux de rythme ou de durée.

Le rythme - La littérature révèle que la première dimension que nous devrions considérer est le rythme, car il est facilement identifiable par l'utilisateur et est compatible avec l'utilisation de stimuli combinant plusieurs dimensions [20, 199, 239]. Le rythme, pour la modalité vibrotactile, est comparable au rythme musical, et il est souvent jugé plus naturel et donc plus facilement identifiable [246]. De plus, cette dimension à un taux de reconnaissance élevé quand elle est combinée avec d'autres dimensions [66]. La création de rythme peut se faire par le contrôle de la durée entre deux stimuli brefs consécutifs. Il est alors conseillé d'avoir un seuil de différence pour le temps mort entre deux stimuli d'au moins 15 à 30% supérieur [198]. En pratique, pour une identification absolue des différents niveaux de rythme, il est préférable de doubler le nombre de stimuli pour un même intervalle de temps [33].

Pour notre dispositif, nous proposons alors de comparer des motifs de rythme simple et de rythme double, car par la suite, nous souhaitons présenter ces items en séquence. En effet, la mémoire associée au traitement des stimuli vibrotactiles est très volatile [6], ce qui limite le nombre de stimuli qu'un utilisateur peut retenir. On peut remarquer que la numérosité limite à 5 le nombre de stimuli qu'un utilisateur est capable de quantifier précisément dans un intervalle de temps de l'ordre de la seconde [30].

La durée - Nous considérons ensuite de faire varier la durée des stimuli pour continuer d'accroître le nombre de motifs. Le recours à des stimuli courts et longs est largement employé dans d'autres applications, car utilisés seuls, ils sont facilement distingués par l'utilisateur [30, 195, 216]. La condition pour qu'un utilisateur soit capable de différencier deux niveaux de durée est qu'il y ait un seuil de différence d'au moins 20 à 30% entre ces deux durées [77]. Dans l'idéal, il est préférable de doubler à minima cette durée [195]. Nous proposons ainsi de créer seulement deux motifs composés de stimuli courts ou de stimuli longs pour limiter la durée des items vibrotactiles.

L'intensité et la fréquence - Finalement, nous choisissons de différencier une nouvelle fois ces motifs en utilisant des niveaux de fréquence et d'intensité différents. Pour des raisons d'abord perceptuelles, nous ne choisissons pas de découpler ces deux dimensions. En effet, la combinaison de ces deux dimensions lorsqu'elles varient dans le même sens facilite la création de stimuli distinguables [192, 216]. Ensuite, ce choix est fait pour des raisons techniques, car beaucoup de technologies de vibreur disponibles sur le marché ne permettent pas de contrôler séparément ces deux dimensions. Pour un utilisateur en mouvement, nous choisissons de limiter à deux le nombre de niveaux combinant fréquence et intensité avec une différence idéalement supérieure à 50% entre ces deux niveaux [40].

Nous décidons alors d'utiliser des motifs vibrotactiles multidimensionnels. Il s'agit de motifs vibratoires qui combinent simultanément plusieurs dimensions vibrotactiles. Pour des motifs multidimensionnels temporels, il a été observé que les utilisateurs sont capables d'identifier facilement et de manière absolue au moins deux niveaux pour chaque dimension [23, 192, 216]. Afin de conserver une durée totale de présentation courte, permettant la présentation d'au maximum 5 items/s, nous ne pouvons pas combiner deux stimuli de longue durée. De fait, nous proposons de créer des motifs 2D temporels couplant {rythme, intensité} et {durée, intensité}.

La création de morphes - Ce choix d'une dimension supplémentaire est motivé par la création de morphes [47]. Un morphe est défini par la superposition de deux items vibrotactiles. Le résultat de cette superposition est un nouvel item fils qui est perceptuellement différents des deux items parents, mais qui partageant tout de même certaines de leurs caractéristiques perceptuelles. Le recours aux morphes peut faciliter la création d'une représentation de l'information qui tient compte des relations sémantiques existantes entre ces informations.

Nous avons pu identifier deux types d'opérations morphiques. La première consiste à faire une concaténation des motifs temporels, c'est-à-dire de réaliser une combinaison séquentielle des motifs vibratoires. La seconde opération consiste en la superposition d'au moins deux motifs temporels. Cette dernière opération n'est pas toujours commutative en fonction des dimensions du signal qui sont superposées. Clark *et al.* [47] propose par exemple de superposer l'enveloppe du signal vibratoire, mais il est aussi possible de combiner les formes d'onde. Il faut aussi noter que la technologie de vibreur utilisée restreint la diversité des morphes qu'il est possible de créer. Pour notre bracelet, il est de manière intuitive possible d'envisager la concaténation des motifs vibratoires, par contre l'opération de superposition consistant à croiser l'intensité de $M1$ avec $M2$ pour donner $M4$ est moins intuitive.

4.1.2.6 De 6 motifs et 4 positions à 20 items vibrotactiles

Les éléments vus sur la spatialisation et l'expressivité nous ont donc amenés à créer un total de 6 motifs vibratoires, étiquetés de $M0$ à $M5$ (voir Fig. 4.2). $M0$ et $M1$ sont deux motifs vibratoires de rythme simple, composés d'un stimulus de courte durée et de niveaux d'intensité différents. $M2$ et $M4$ sont deux motifs vibratoires de rythme double, composés de deux stimuli de courtes durées et de niveaux d'intensité différents. Finalement, $M3$ et $M5$ sont deux motifs vibratoires de rythme simple, composés d'un stimulus de longue durée et de niveaux d'intensité différents. Pour ces motifs, $M4$ est alors un morphe de $M1$ et $M2$, et $M5$ est celui de $M1$ et $M3$. Par la suite, nous avons écarté le motif $M0$ (de durée courte et d'intensité faible) de la création des messages destinés à l'expression des situations de dysfonctionnement, car nous le jugeons trop discret (silencieux). De plus, il n'est pas assez distinct de $M1$ pour ne pas apporter de confusion lors de l'identification de ces motifs par les utilisateurs.

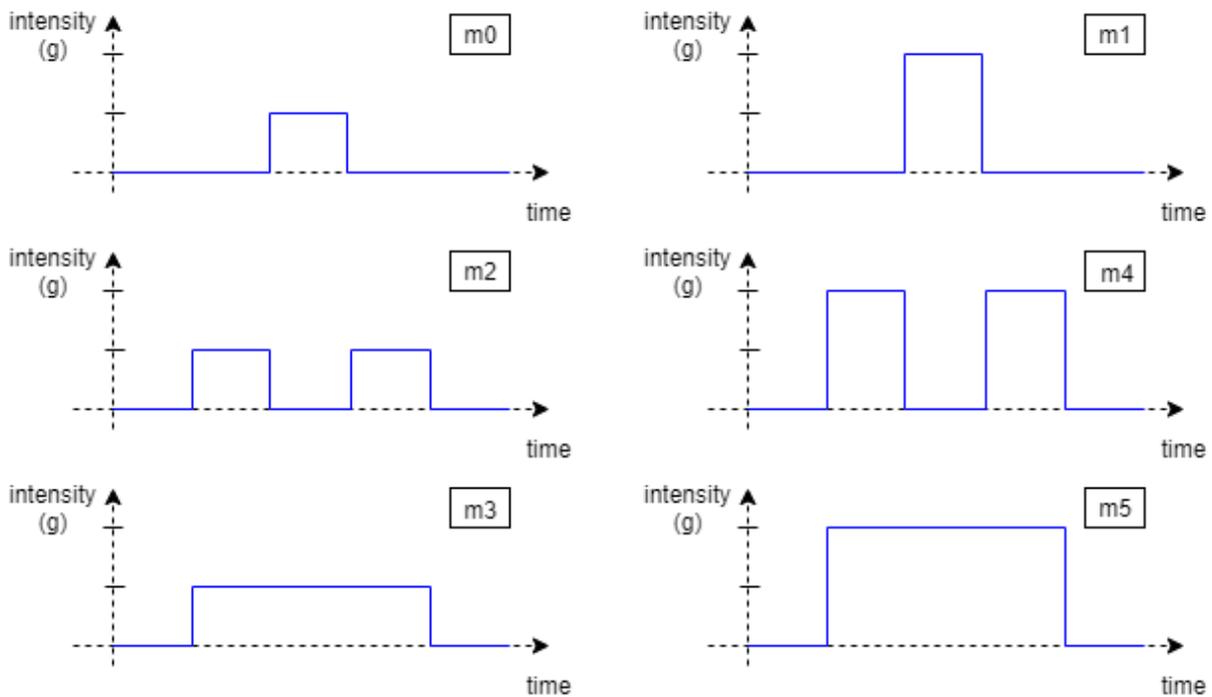


FIGURE 4.2 – Chronogrammes des différents motifs temporels $M0$ à $M5$ utilisés par notre dispositif vibrotactile.

Au final, nous définissons un ensemble de 20 items spatio-temporel, soit 5 motifs temporels qui pourront être appliqués sur 4 positions autour du poignet (Fig. 4.4).

4.1.3 L'implémentation de ViMA

4.1.3.1 Son architecture

Pour la réalisation de ce bracelet, nous avons sélectionné des vibreurs ERM de chez Precision Microdrive¹. Ce sont de petits moteurs électriques avec une masse excentrée en bout d'axe. Ils offrent une dynamique temporelle réactive pour un rendu tactile plus net

1. <https://bit.ly/339TWeO>

des motifs. En effet, la fiche technique mentionne un temps de montée de référence de 22 ms et de descente de 30 ms. Le temps de monter fait référence à la durée nécessaire pour passer de l'état de repos à l'état excité stable de référence, et le temps de descente à la durée nécessaire pour retourner à l'état de repos. Par contre, pour ce type de vibreur, la fréquence et l'intensité de la vibration ne peuvent être contrôlées indépendamment.

Ces vibreurs sont pilotés par un signal de commande PWM² via un circuit électronique dédié (Fig. 4.3). Ce circuit se compose d'un transistor (PN2219A) qui permet de contrôler la tension délivrée au vibreur (et donc sa vitesse) depuis l'alimentation de 3,3V délivrée par un microcontrôleur de type Arduino³. Un second transistor complémentaire au premier (PN2907A) permet de freiner le vibreur afin d'améliorer le contrôle de la durée des motifs.

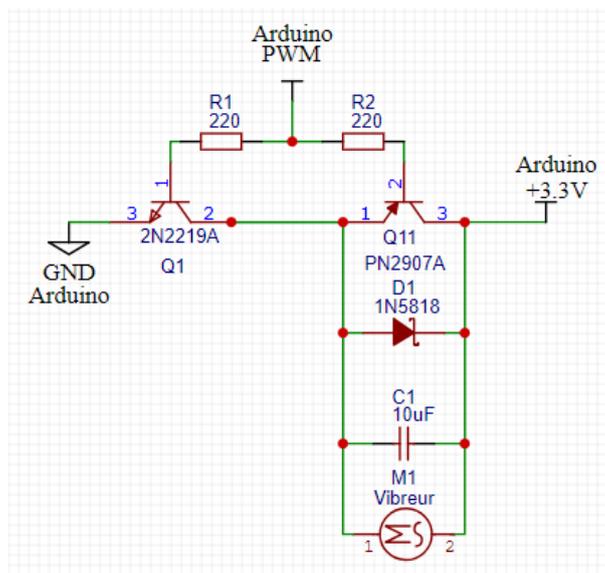


FIGURE 4.3 – Circuit de pilotage des vibreurs, produit sous EasyEDA.

4.1.3.2 La création des motifs vibrotactiles

La création d'items vibrotactiles nécessite le recours à des stimuli vibratoires perceptibles par l'utilisateur. Pour qu'un stimulus seul soit facilement identifiable, il est conseillé d'utiliser une durée minimale de présentation comprise à minima entre 30 et 50 ms en fonction de la technologie de vibreurs utilisée [239]. De plus, pour des items vibrotactiles combinant plusieurs dimensions, il est conseillé d'utiliser une durée totale de présentation par items comprise entre 80 et 500 ms pour faciliter l'identification [228, 235].

Nous proposons de créer des items en considérant une durée typique de 200 ms qui correspond à la durée minimale étudiée par Zhao *et al.* [278]. Cela permet la communication d'au moins 5 informations par message, soit 1 item pour 1 information, avec un rafraîchissement des messages toutes les secondes. Pour créer ces items, nous avons construit les motifs $M1$ à $M5$ pour une durée de 200 ms. Comme nous souhaitons communiquer les items en séquence, nous encadrerons les motifs avec un temps de pause minimal de 30 ms. Il y aura donc un temps de pause incompressible de 60 ms entre deux items. Par la suite, la durée d'un motif peut être facilement ajustée en multipliant la durée du stimulus par un coefficient, mais en conservant les temps de pause.

2. Pulse Width Modulation

3. <https://www.arduino.cc>

Compte tenu du modèle de vibreur choisi, nous avons défini, pour un stimulus de durée courte, un temps d'activation de 50 ms centré sur la durée totale du motif, et pour celui de temps long à 140 ms. Nous avons défini le niveau d'intensité faible à 0,8 g pour une fréquence de 80 Hz, et le niveau fort à 1,8 g pour une fréquence de 220 Hz. Ces niveaux ont été choisis de manière à maximiser leur identification. Le niveau faible est à la frontière de deux domaines perceptuels [68]. Le niveau fort est proche de la fréquence optimale de stimulation des corpuscules de Pacini (principaux récepteurs en charge de la détection des vibrations [15]). Concernant la création des motifs basés sur le rythme, un temps de pause de 40 ms est observé entre les deux stimuli.

4.2 L'évaluation de ViMA

4.2.1 Le mode de présentation, les hypothèses et le protocole

Nous cherchons maintenant à évaluer la reconnaissance de l'ensemble des 20 items vibrotactiles par un groupe d'utilisateurs initialement non entraînés afin de valider nos choix de conception. Pour cela, nous devons sélectionner un mode de présentation pour les 20 items étudiés (Fig. 4.4).

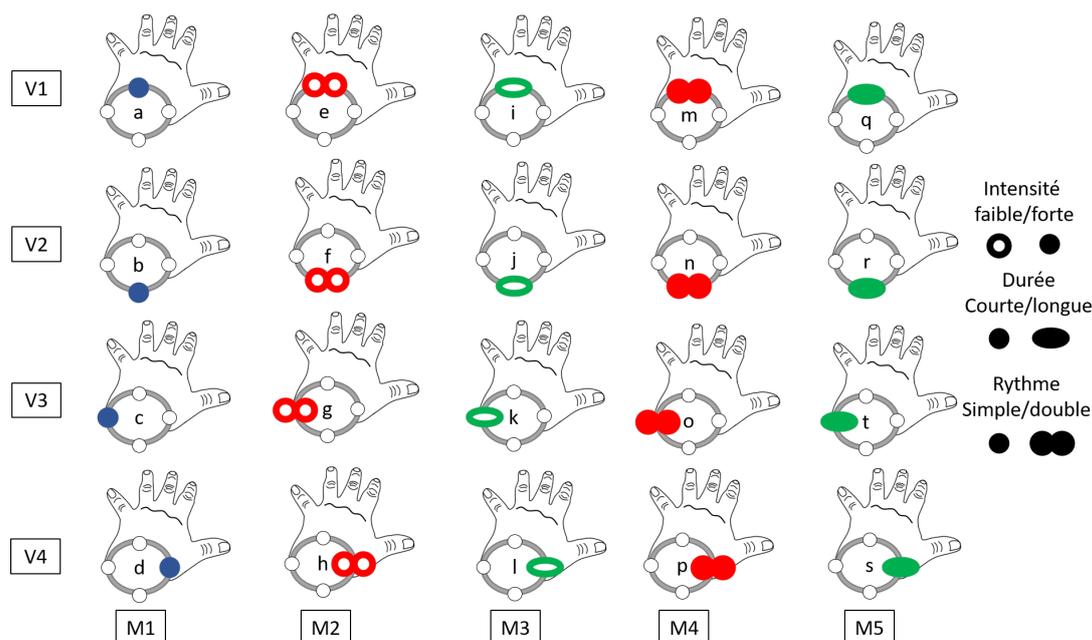


FIGURE 4.4 – Représentation graphique des 20 items vibrotactiles produits par la combinaison des motifs M1 à M5 et des 4 positions autour du poignet.

4.2.1.1 Le choix d'un paradigme de présentation des items

Avant de procéder à l'évaluation des items, nous avons rallongé la durée totale de chaque item à 300 ms afin de créer des séquences de 3 items pour évaluer la reconnaissance des 20 items que nous avons construits précédemment. Ce choix nous permet d'évaluer la reconnaissance de ces items pour des messages d'une durée totale d'une seconde. De plus, cela nous permet de proposer une durée de présentation par items plus longue afin de faciliter leur identification par les utilisateurs étant donné que les utilisateurs

sélectionnés pour évaluer ces items n'auront aucune expérience préalable de l'interface de communication vibrotactile. [237, 278].

4.2.1.2 Le paradigme AXB -

Comme ces items vibrotactiles ont vocation à être présentés en courtes séquences, nous optons pour un mode de présentation suivant le paradigme AXB, détaillé par Tan *et al.* [237]. Ce paradigme de présentation est conseillé par Zhao *et al.* [278] pour évaluer un ensemble d'items vibrotactiles dans un tel cas d'application. Ce paradigme implique la présentation d'une séquence de 3 items vibrotactiles A, X et B tirés aléatoirement. L'item, noté X, est l'item cible que devra reconnaître l'utilisateur. Les items, notés A et B, sont des items masqueurs. Ce mode de présentation impose un temps de pause non spécifié entre ces trois items sachant qu'un temps mort de 10 ms est au minimum nécessaire pour distinguer deux stimuli [77]. Pour respecter une durée totale de 1 s de présentation d'un message vibrotactile, nous avons imposé une durée de 50 ms entre chaque item qui vient s'ajouter au temps de pause déjà existant.

4.2.1.3 Les hypothèses de test sur la reconnaissance des items vibrotactiles

Nous présentons ici les hypothèses de tests que nous souhaitons vérifier en les écrivant sous leurs formes classiques en statistique qu'est le couple {hypothèse nulle, hypothèse alternative}. Pour rappel, les positions pour ces items sont définies Section 4.1.2.4 et les motifs temporels combinant différents niveaux de rythme, de durée et d'intensité, sont définis Section 4.1.2.5.

Pour une présentation des items selon le paradigme AXB, nous souhaitons d'abord vérifier que les 4 positions autour du poignet, pour l'item X, sont indifféremment identifiées par l'utilisateur. Nous posons alors les hypothèses suivantes :

- L'hypothèse nulle H_{0_1} : *il n'existe pas de différence de reconnaissance de la position pour l'item X et quel que soit le motif.*
- L'hypothèse alternative H_1 : *il existe une différence de reconnaissance de la position pour l'item X.*

Ces hypothèses seront vérifiées en comparant, pour chaque individu, l'identification de la position de chaque item X présenté.

Nous souhaitons ensuite, en cas d'erreur d'identification de l'item X, que celle-ci résulte principalement d'une erreur d'identification du motif vibrotactile, et non de la position. Dans le cas où l'item X n'est pas reconnu, il existe alors 3 résultats possibles ; soit seule sa position est identifiée, soit seul le motif est reconnu, ou soit ni la position ni le motif ne sont identifiés et reconnus. Nous posons alors les hypothèses suivantes :

- L'hypothèse nulle H_{0_2} : *il n'existe pas de différence d'identification entre la position et le motif pour l'item X.*
- L'hypothèse alternative unilatérale H_1 : *la reconnaissance de la position est systématiquement meilleure que la reconnaissance du motif pour l'item X.*

Nous vérifierons ces hypothèses en comparant l'identification de la position et du motif pour tous les items X non identifiés.

Nous suspectons alors, dans le cas de l'erreur précédente, que la cause d'une erreur d'identification du motif est due principalement à une mauvaise identification de l'intensité du motif. Pour cela, nous posons les hypothèses :

- L'hypothèse nulle H_{0_3} : *il n'existe pas pour le motif de l'item X de différence de reconnaissance entre le rythme et la durée.*

- L’hypothèse alternative bilatérale H_3 : il existe une différence entre l’identification du rythme et de la durée du motif pour l’item X.
- L’hypothèse nulle H_{0_4} : il n’existe pas pour le motif de l’item X de différence de reconnaissance entre le rythme et l’intensité.
- L’hypothèse alternative unilatérale H_4 : la reconnaissance du rythme est meilleure que l’identification de l’intensité pour le motif de l’item X.
- L’hypothèse nulle H_{0_5} : il n’existe pas pour le motif de l’item X de différence de reconnaissance entre la durée et l’intensité.
- L’hypothèse alternative unilatérale H_5 : la reconnaissance de la durée est meilleure que l’identification de l’intensité pour le motif de l’item X.

Nous vérifierons ces hypothèses en comparant la reconnaissance du rythme, de la durée et de l’intensité pour l’item X.

Nous souhaitons alors vérifier que les items $M4$ et $M5$, tous deux de forte intensité et respectivement de rythme double et de longue durée, sont les motifs les plus facilement identifiés quelle que soit la position. Pour cela, nous posons les hypothèses :

- L’hypothèse nulle H_{0_6} : il n’existe pas de différence de reconnaissance du motif pour l’item X quelle que soit la position.
- L’hypothèse alternative H_6 : il existe une différence de reconnaissance entre les motifs pour l’item X quelle que soit sa position.

Ces hypothèses seront vérifiées en comparant, pour chaque individu, l’identification du motif de chaque item X présenté.

Pour en terminer avec l’évaluation de la reconnaissance de l’item X, nous souhaitons ensuite vérifier si la reconnaissance du motif est fonction de la position. Nous posons alors les hypothèses suivantes :

- L’hypothèse nulle H_{0_7} : il n’existe pas de corrélation entre la reconnaissance du motif et la position pour l’identification de l’item X.
- L’hypothèse alternative H_7 : il existe une dépendance entre la reconnaissance du motif et la reconnaissance de la position pour la reconnaissance de l’item X.

Ces hypothèses seront vérifiées en comparant les motifs et les positions pour chacun des motifs X reconnus par les utilisateurs.

Finalement, nous avons complexifié les items proposés par ViMA afin de pouvoir produire des morphes. Nous souhaitons évaluer en particulier la capacité des utilisateurs à réaliser ce type d’opérations perceptuelles pour deux associations.

4.2.2 Le protocole

Nous avons recruté au hasard 22 utilisateurs, d’un âge compris entre 17 et 63 ans. Ce groupe est composé par 8 femmes et 16 hommes dont l’âge moyen est de $\bar{A} = 35,6$ ans, $\sigma_A = 12,7$, ayant un IMC moyen de $\overline{IMC} = 24,7$, $\sigma_{IMC} = 5,1$ et dont le tour de poignet moyen est $\bar{P} = 16,5$ cm, $\sigma_P = 1,5$. Ces sujets ne présentent aucun handicap sensoriel tel que la cécité ou surdité. En effet, ces deux populations peuvent faire preuve d’une meilleure sensibilité tactile [257]. Aucun de ces utilisateurs n’est familier avec les dispositifs de communication vibrotactile. On constate cependant la présence de 9 musiciens plus ou moins expérimentés, mais ayant plus d’un an de pratique.

Un sujet de 60 ans a été écarté d  à des troubles de la perception tactile. Ce sujet a un usage régulier d’outils de jardinage produisant un niveau élevé de vibrations auxquelles il a été exposé sur une durée supérieure à 6 h dans les 24 h précédent l’expérimentation.

Ce phénomène est déjà largement documenté [89] et fait l'objet d'une norme ISO en lien avec la prévention des troubles biomécaniques en milieu professionnel (ISO 2631-5 :2018). Ces troubles se sont traduits par une augmentation apparente du seuil de détection et une diminution de l'acuité temporelle.

4.2.2.1 Apparatus

Pour cette évaluation, les sujets sont assis devant un bureau au calme. Ils sont équipés de notre dispositif ViMA, et d'un casque Bose Quiet Comfort II diffusant du bruit blanc afin de masquer les indices sonores produits par les vibreurs. Il est demandé aux sujets de rester assis de manière confortable tout le long de l'expérimentation, en gardant au repos leur bras non dominant muni du dispositif vibrotactile sur l'accoudoir de la chaise (Fig. 4.5). Leur bras dominant sera libre de mouvement pour effectuer les différentes tâches demandées.

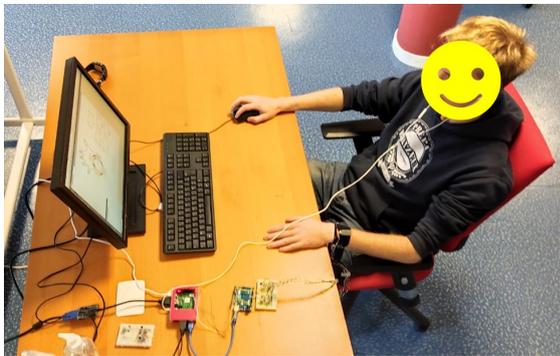


FIGURE 4.5 – Vue d'ensemble du dispositif expérimental.

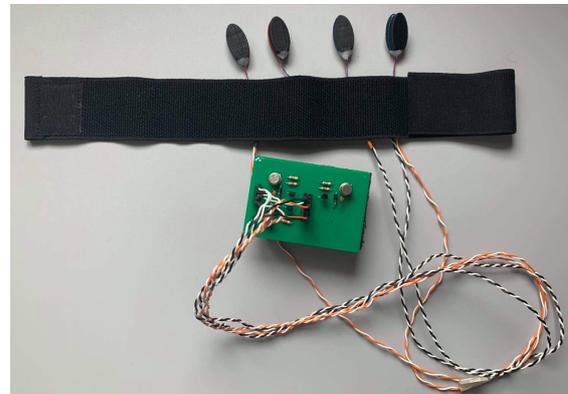


FIGURE 4.6 – Prototype du bracelet vibrotactile.

La génération des stimuli tactiles est pilotée par une interface matérielle en schéma maître-esclave. Un nano-ordinateur de marque Raspberry PI3⁴, exécutant une version Raspbian, supporte l'interface utilisateur et transmet les séquences d'activation à une carte à microcontrôleur de type Arduino UNO⁵. La communication avec l'Arduino est faite via un protocole de communication I2C. C'est cet Arduino qui est responsable de la génération des stimuli vibrotactiles et pilote les 4 vibreurs ERM, de modèle 306-10 fabriqué par Precision Microdrive⁶ par un signal de commande PWM via un circuit électronique dédié (Fig. 4.6).

L'application implémentée sur le Raspberry PI est codée en C++ avec Qt 5.9.5⁷.

4.2.2.2 Les procédures d'évaluation

L'expérimentation débute lorsque l'utilisateur a renseigné le formulaire de consentement libre et éclairé (Annexe B), et que nous avons collecté des informations spécifiques

4. <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>

5. <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3/>

6. <https://bit.ly/339TWeO>

7. <https://doc.qt.io/archives/qt-5,9-devicecreation/qtee-preparing-hardware-raspberrypi.html>

à l'utilisateur : son âge, son IMC (que le sujet calcule sur un site dédié⁸) et son tour de poignet mesuré avec un mètre ruban.

Le sujet est alors informé du déroulement de l'expérimentation durant laquelle il lui est demandé de réaliser deux tâches (Annexe C). La première tâche est une tâche perceptuelle pour laquelle il doit identifier des relations entre différents motifs vibratoires. La seconde tâche avec deux exercices consiste à identifier les 20 items vibrotactiles au sein d'une séquence de trois items présentés à différents endroits du poignet.

A - La tâche perceptuelle

La première tâche a deux objectifs. Le premier est de vérifier si l'utilisateur est capable de réaliser certaines opérations mentales sur les items que nous étudions. Le second objectif est de permettre à l'utilisateur de se familiariser une première fois avec les motifs vibratoires qu'il va devoir identifier par la suite.

Phase de test La tâche assignée à l'utilisateur est la suivante : « *Identifiez le ou les motifs que vous percevez comme la combinaison ou superposition de deux autres motifs, parmi les motifs suivants* ». Cet exercice est entièrement subjectif, il n'y a pas de bonnes ou de mauvaises réponses. Pour mener cette tâche, l'utilisateur est encouragé à interagir avec les cinq boutons dont l'ordre est tiré aléatoirement (Fig. 4.7). Cet exercice est limité à une durée de 5 min, et il peut être interrompu avant la fin s'il pense avoir terminé.

Phase de discussion S'en suit une discussion sur les combinaisons qu'il a pu identifier afin de comprendre quelles opérations mentales sont faites. À la fin de cette discussion, nous lui suggérons les trois combinaisons suivantes : $M1 + M1 = M4$, $M1 + M2 = M4$ et $M1 + M3 = M5$, et nous lui demandons s'il est en accord ou en désaccord avec ces combinaisons.

B - La tâche d'identification des items vibrotactiles au sein d'une séquence

Cette seconde tâche a pour objectif d'évaluer la reconnaissance des 20 items vibrotactiles étudiés. Cette tâche de reconnaissance est présentée à l'utilisateur de la manière suivante : « *Vous devez maintenant reconnaître, au sein d'une séquence de 3 items, l'item du milieu. Pour cet item, il vous est demandé d'identifier la position (droite | gauche | haut | bas), l'intensité (faible ou forte), le rythme (simple | double) et la durée (courte | longue) du motif vibratoire que vous sentirez* ».

Phase de calibration Avant de démarrer l'exercice, une phase de calibration de la position des 4 vibreurs autour du poignet est effectuée pour s'assurer que les 4 positions choisies sont distinctes. Cette calibration est jugée satisfaisante quand l'utilisateur est capable d'enchaîner douze réponses sans se tromper (soit 3 essais consécutifs pour chaque position).

Phase d'entraînement L'utilisateur poursuit alors par un entraînement qui consiste à répéter 5 fois, pour l'ensemble des 20 items vibrotactiles, la tâche d'identification. Cet entraînement est effectué sur une interface depuis laquelle l'utilisateur reçoit, à un top

8. <https://www.calculersonimc.fr/faites-le-test.html>

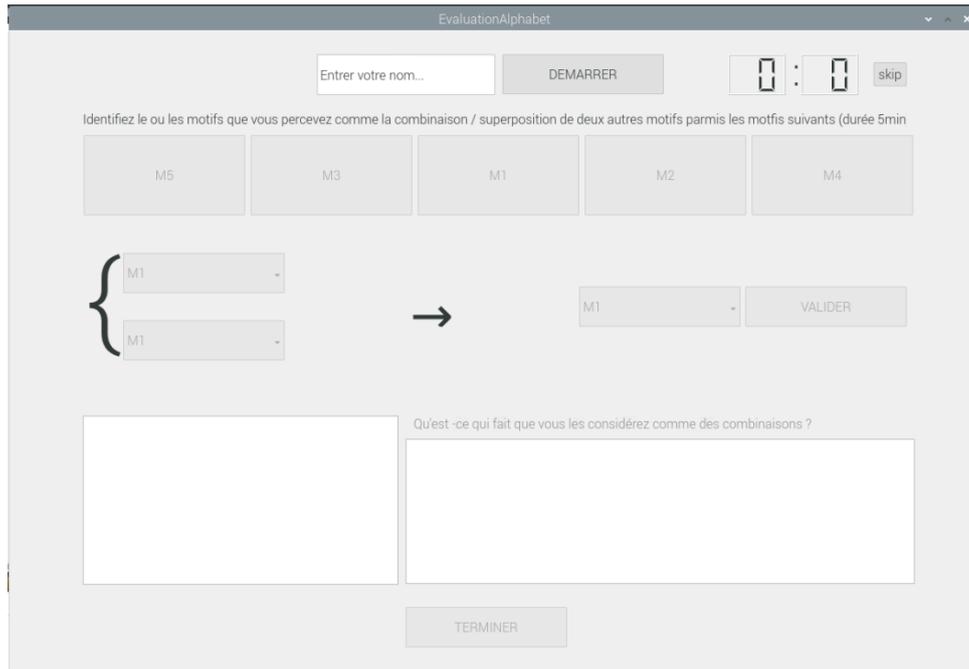


FIGURE 4.7 – Interface graphique associée à la tâche perceptuelle permettant à l'utilisateur d'essayer les différents motifs en cliquant sur l'un des 5 boutons.

départ, des séquences de trois items. Elle permet ensuite de retranscrire l'item qu'il pense avoir identifié. Après validation, l'utilisateur peut comparer sa réponse avec celle attendue (Fig. 4.8 (gauche)).

Une fois l'entraînement terminé, l'utilisateur enchaîne avec un questionnaire permettant de recueillir son ressenti. Ce moment constitue une courte pause avant de débiter l'évaluation (un temps de pause minimum de 10 min est observé). Lors de ce questionnaire, l'utilisateur doit classer, dans l'ordre, la dimension qu'il juge le plus facile à identifier entre la position, le rythme, la durée et l'intensité. Il lui est ensuite demandé d'exprimer quelles combinaisons sont les plus faciles à identifier, puis les plus dures. Finalement, il est demandé à l'utilisateur de s'exprimer sur le confort et l'usage d'un tel système s'il devait l'utiliser dans la vie de tous les jours.

Phase de tests L'évaluation est séparée en deux exercices qui sont contre-balançés dont la tâche est d'identifier l'item X, pour l'ensemble des items, présenté suivant le paradigme AXB. Pour ces deux exercices, l'utilisateur ne réalise qu'une fois la tâche. Pour l'exercice 1, l'interface reste la même que durant l'entraînement, seulement, l'utilisateur ne reçoit plus de retour visuel validant sa reconnaissance (Fig. 4.8 (gauche)). Un questionnaire termine le premier exercice pour recueillir le ressenti de l'utilisateur. Pour le second exercice, la tâche est la même, mais cette fois l'interface est différente. Il est demandé à l'utilisateur de sélectionner directement le motif qu'il pense avoir identifié parmi les 5 proposés et non plus chaque dimension du motif temporel séparément (Fig. 4.8 (droite)). Le premier exercice met l'accent sur l'identification des différentes dimensions composant l'item vibrotactile. Cependant, l'interface laisse libre l'utilisateur d'exprimer des combinaisons de dimensions qui ne sont pas proposées par le bracelet (ex : un stimulus long de rythme double). En revanche, le deuxième exercice force l'utilisateur à faire le choix d'un motif qui existe et qui est le plus proche de ce qu'il pense avoir perçu. Cette seconde méthode a l'avantage d'être plus représentative du système de communication pour lequel

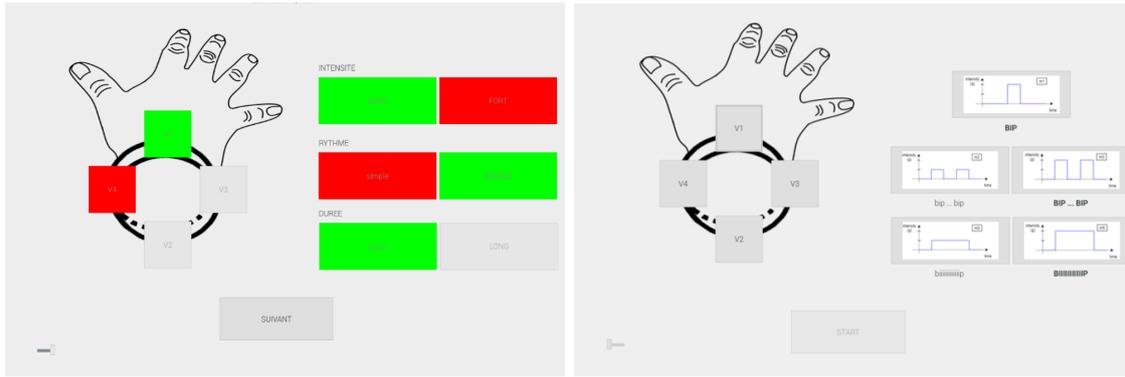


FIGURE 4.8 – Interface utilisateur pour renseigner l’item vibrotactile identifié : interface d’entraînement servant aussi à l’évaluation n°1 (à gauche), interface pour l’évaluation n°2 (à droite).

l’utilisateur sait qu’il existe un ensemble fini de motifs possibles.

4.2.3 Analyses et résultats

4.2.3.1 Analyses

Variables indépendantes Nous souhaitons évaluer l’effet des différentes dimensions servant à créer nos items vibrotactiles.

Ainsi, nos variables indépendantes principales sont les différentes dimensions servant à coder l’information : le vibreur (V), le motif(M), le rythme (R), la durée (D), l’intensité (I).

Nous nous intéressons également à plusieurs paramètres biologiques qui peuvent influencer la perception des différents items vibrotactiles. Pour cette évaluation, nous regardons l’âge de l’individu (A) [44], le sexe de l’individu (S), le tour du poignet (Tp) [46, 116] et l’indice de masse corporelle (IMC) [13].

Variables dépendantes Nous nous intéressons de plus à une variable dépendante qui est le nombre d’items reconnus par utilisateur (TR). Ce nombre permet de quantifier la performance de l’utilisateur.

Afin d’évaluer les retours « subjectifs » des utilisateurs, et ceci pour chaque dimension vibrotactile, nous examinerons les scores NASA-TLX⁹, ajoutant ainsi 6 autres variables dépendantes ; la demande mentale (DM), la demande physique (DP), la demande temporelle (DT), la performance globale (PG), l’effort (E) et le niveau de frustration (F).

4.2.3.2 Résultats de la tâche perceptuelle

Nous rappelons ici que nous cherchons à identifier si un motif peut être perçu comme une opération de concaténation ou comme une opération de superposition de deux autres motifs (Tab. 4.2).

La première opération révèle que, sur les 21 utilisateurs, 18 (soit 85%) mettent en place assez intuitivement une concaténation (ou combinaison séquentielle) des motifs. En effet, ils créent principalement le motif M_4 à partir de deux motifs M_1 . Parmi eux, 2 n’ont

9. <https://humansystems.arc.nasa.gov/groups/tlx/>

Opération	Type d'opération	Effectif	
		Identification seule	Identification après suggestion
M1 + M1 → M4	concaténation	18	21
M3 + M3 → M4	concaténation	4	2
M1 + M2 → M4	superposition	6	15
M1 + M3 → M4	superposition	8	13
M2 + M2 → M5	superposition	1	4
M3 + M3 → M5	superposition	1	4

TABLE 4.2: Tableau récapitulatif des opérations morphiques identifiées par les utilisateurs de manière seule, puis après suggestion.

identifié cette relation qu'après qu'elle leur ait été présentée au cours de la discussion. De plus, 4 utilisateurs produisent le motif $M2$ à partir de la combinaison séquentielle de deux motifs $M3$, bien que la durée théorique du stimulus de $M3$ soit plus longue que celle des deux stimuli composant le motif $M2$. Cette différence de durée est finalement perçue, au cours de la discussion, que par 2 individus. Ils mentionnent alors que cette relation fonctionne seulement du point de vue de l'intensité.

La seconde opération que les utilisateurs mettent en place est une opération de superposition. Elle consiste à croiser l'intensité du motif $M1$, de forte intensité, avec la durée de $M3$ pour créer le motif $M5$. $M5$ est de même durée que $M3$, mais de même intensité que $M1$. La même superposition peut être appliquée en croisant $M1$, de forte intensité, avec le rythme de $M2$ pour créer $M4$. La première superposition est effectuée intuitivement par 8 utilisateurs (38%) et la seconde par 6 utilisateurs (29%). Après que ces relations aient été mises en évidence lors de la discussion, 15 (71%) utilisateurs sont d'accord avec la première superposition, et seulement 13 (62%) avec la seconde. Par contre, cette expérimentation a mis en évidence une autre opération de superposition que nous n'avions pas anticipée et pour laquelle nous n'avons que des données partielles. Elle a été réalisée par au moins 4 individus pour 1 de manière naturelle et pour les autres après avoir été suggérée. Elle consiste à superposer deux fois le même motif pour produire le même motif temporel, mais d'intensité plus élevée. Ils ont alors identifié que la somme de deux $M3$ permet de produire $M5$ et celle de deux $M2$ produit $M4$.

L'exploration des différents motifs par les utilisateurs nous a permis de constater que ces utilisateurs sont capables de mettre en place 3 opérations mentales au total. Elles se traduisent par la création de morphes au sein des items qui nous intéressent. Cependant, en l'état, il est difficile de juger du naturel de ces opérations.

En effet, les relations $M1 + M2 \rightarrow M5$ et $M1 + M3 \rightarrow M5$ ne sont perçues que par un peu moins de 2 utilisateurs sur 3, et seulement après leur avoir présentées. Il ressort de cela que cette expérience tactile est un exercice nouveau pour ce groupe d'utilisateurs, car ils ont plus de facilité à opérer une concaténation des motifs temporels qu'à opérer une opération sur l'intensité. Cet exercice nécessite donc d'être reproduit en accompagnant les utilisateurs dans la démarche, peut-être en leur faisant une analogie avec une représentation visuelle ou sonore des différentes dimensions.

4.2.3.3 Résultats de la tâche de reconnaissance des items

Un total de 2940 reconnaissances ont été réalisées durant cette évaluation. Parmi ces reconnaissances, 2100 ont été réalisées durant la phase d'entraînement et 840 durant les

deux phases d'évaluation. Sur ces deux évaluations, un total de 461 items a bien été identifié, soit un peu plus de 55% de chance de succès pour le choix de 1 item parmi 20, Pour ces items, la position est reconnue à presque plus de 85% pour 1 position parmi 4 et le motif à environ 54% pour 1 motif parmi 5.

Afin de vérifier l'hypothèse H_{01} , nous avons comparé les taux de reconnaissance de chaque position de l'item X, d'abord indépendamment du motif, puis en fonction du motif. Les performances des utilisateurs sont résumées dans le tableau 4.3.

	M1	M2	M3	M4	M5	\bar{M}
V1	92,86	61,90	71,43	90,48	88,10	80,95
V2	83,33	83,33	78,57	97,62	90,48	86,67
V3	88,10	92,86	85,71	92,86	88,09	89,52
V4	71,43	80,95	85,71	76,19	85,71	80,00
\bar{V}	83,93	79,76	80,36	89,29	88,10	84,29

TABLE 4.3: Taux de reconnaissance (en %) des positions $V\{x\}$ pour chaque motif $M\{x\}$, ainsi que les moyennes respectives (en gras), quelque soit la reconnaissance de l'item X.

Nous avons utilisé le test non-paramétrique de Friedman, et ce, afin de comparer les performances de tous les utilisateurs pour l'ensemble des cas (Fig. 4.9, Tab. 4.4). Le résultat du test montre qu'il n'existe pas de différence statistique significative sur le taux d'identification des 4 positions ($\chi^2 = 6,8084$, $df = 3$, $p\text{-value} = 0,07826$), nous devons donc accepter l'hypothèse H_0 et rejeter l'hypothèse alternative H_1 . Ainsi, ce premier test semble confirmer que la reconnaissance du motif ne dépend pas réellement de la position sur laquelle il est présenté sur le poignet.

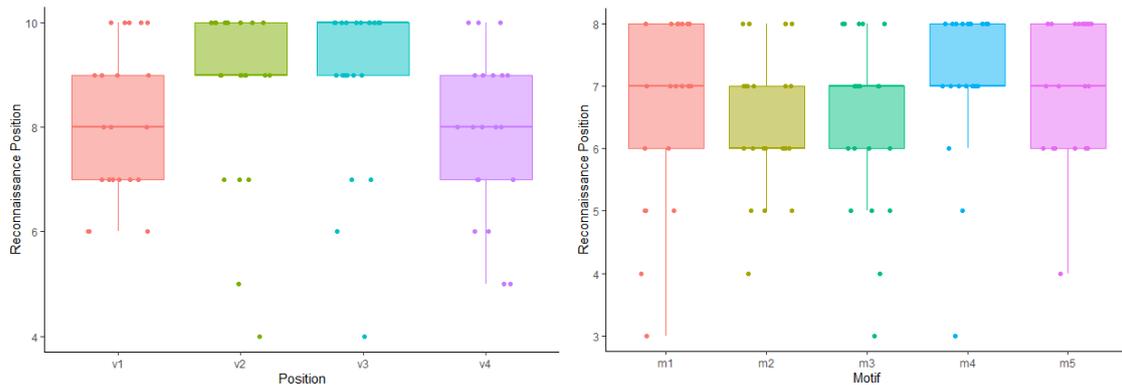


FIGURE 4.9 – Reconnaissance moyenne des 4 positions de l'item X, à gauche quelque soit le motif et à droite pour les 5 motifs par les utilisateurs de ViMA.

Cependant, comme la p-value observée reste proche de 0,05, il serait nécessaire de réaliser plus d'observations. Notamment, parce que l'on distingue une différence significative de la position pour les motifs $M1$, $M2$ et $M4$.

Pour la deuxième hypothèse H_{02} , nous comparons, pour chaque utilisateur, la proportion de positions et de motifs bien identifiés sur le total d'items X non reconnus, et ceci pour les deux itérations de l'évaluation des items. Comme nous l'avons mentionné lors de

Friedman	Motif	Conover	t-value	Pr(> t)	SI ¹⁰
$\chi^2 = 9,1648$, df = 3, p-value = 0,02718	M1	v4-v1 = 0	-2,96	0,06424	*
$\chi^2 = 11,483$, df = 3, p-value = 0,009382	M2	v3-v1 = 0	3,408	0,0070507	**
$\chi^2 = 2,2759$, df = 3, p-value = 0,5172	M3		Non significatif		
$\chi^2 = 12,114$, df = 3, p-value = 0,007003	M4	v4-v2 = 0	-3,298	0,0098305	**
$\chi^2 = 12,114$, df = 3, p-value = 0,007003	M4	v4-v3 = 0	-2,799	0,0413484	*
$\chi^2 = 0,7411$, df = 3, p-value = 0,8635	M5		Non significatif		
$\chi^2 = 6,8084$, df = 3, p-value = 0,07826	M{x}		Non significatif		

TABLE 4.4: Résultats du test de Friedman pour la comparaison de la reconnaissance de la position en fonction des motifs $M\{x\}$.

la formulation des hypothèses, les erreurs menant à une mauvaise identification de l'item X se regroupent en trois cas de figure (Tab. 4.5, Fig. 4.10), à savoir ; M_NI (le cas où le motif n'est pas reconnu), V_NI (le cas où la position n'est pas reconnue) et VM_NI (le cas où aucun des deux n'est reconnu). De plus, on s'assure que l'identification de la position est significativement différente de l'erreur d'identification de la position et du motif simultanément. Cette comparaison est faite par un test de Friedman sur des données appariées, et pour réaliser toutes les comparaisons deux à deux après ce test, nous avons utilisé un test post hoc de Conover, avec ajustement des p-values selon la méthode de Bonferonni.

Dimension	Moyenne	Écart type	Médiane	IQR
M_NI	19,86% (2,90)	17,30% (1,79)	17,39	13,99
V_NI	65,27% (11,76)	21,76% (5,99)	66,67	21,43
VM_NI	14,87% (3,38)	13,32% (3,68)	12,500	26,087

TABLE 4.5: Origines des erreurs pour l'identification de l'item X.

On peut alors déduire de ce test (Tab. 4.6) que l'hypothèse H_2 est vérifiée ($\chi^2 = 25,725$, df = 2, p-value = 2,594e-06). Pour les items X non-identifiés par l'utilisateur, nous remarquons que la position est identifiée pour 65,27% d'entre eux et que le motif l'est seulement pour 19,86% d'entre eux. Finalement, pour 14,87% des motifs non-identifiés, ni la position, ni le motif ne sont identifiés. Nous pouvons en conclure que les items non identifiés le sont à cause d'une erreur d'identification de la position, contre 80,14% qui le sont pour une erreur sur le motif ($\sigma = 17,30\%$), et 34,74% des cas ($\sigma = 13,32\%$) résultent d'une erreur simultanée.

Post hoc de Conover	t value	Pr(> t)	SI
PosMotNI - MotNI = 0	-0,237	1,00000000	
PosNI - MotNI = 0	4,274	0,00034595	***
PosNI - PosMotNI = 0	4,512	0,00016577	***

TABLE 4.6: Comparaisons des trois cas de figure impliquant la mauvaise identification de l'item X.

Pour vérifier les hypothèses nulles H_{0_3}, H_{0_4} et H_{0_5} , nous avons comparé l'identification des différentes dimensions constituant les motifs (Tab. 4.7, Fig. 4.11).

Cette comparaison est faite par un test de Friedman pour ensuite comparer les modalités deux à deux par un post-hoc de Conover (Tab. 4.8).

De manière générale, on observe une différence d'identification du rythme qui est environ 10% mieux identifié que la durée (H_3 , t-value = 4,512, p=0,00290590) et que

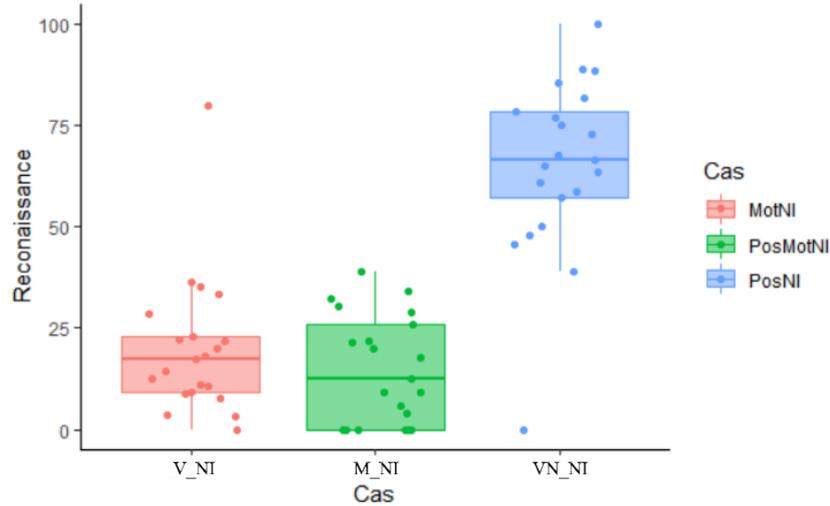


FIGURE 4.10 – Comparaison des causes d’erreurs pour la reconnaissance de l’item X.

	n	Moyenne	Écart Type	Médiane	IQR
Motif	21	24,857	8,380	26	12
Position	21	33,714	4,638	35	6
Rythme	21	35,810	5,455	38	6
Durée	21	32,095	6,220	33	8
Intensité	21	30,524	4,813	29	8

TABLE 4.7: Taux de reconnaissance (en %) des motifs $M\{x\}$ pour chaque position $V\{x\}$, ainsi que les moyennes respectives (en gras), quelque soit la reconnaissance de l’item X.

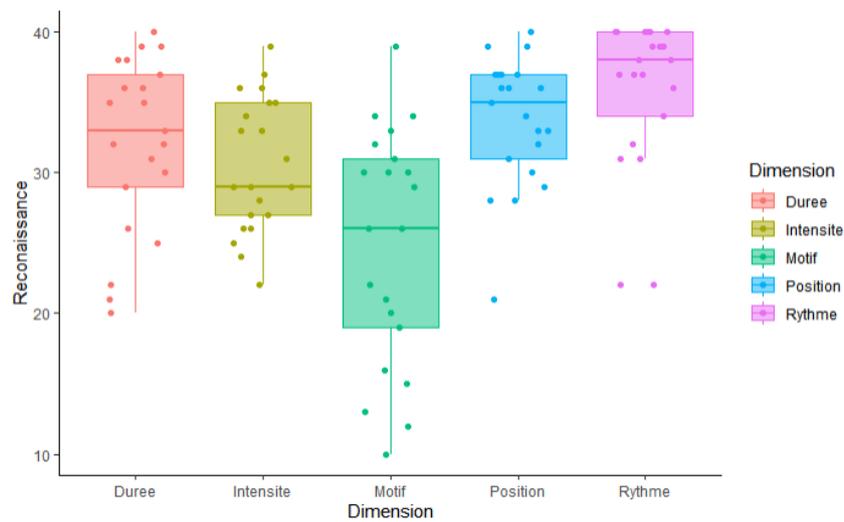


FIGURE 4.11 – Comparaison de la reconnaissance des différentes dimensions du motif, de la position et du motif de l’item X.

l’intensité (H_4 , t-value = 4,512, $p = 0,00016577$) pour ces motifs 2D. Il n’existe cependant pas de différence significative entre la durée et l’intensité (H_5 , t-value = -0,950, $p = 1,0$). Les hypothèses alternatives H_3 , H_4 et l’hypothèse nulle H_{05} sont conservées.

Friedman	Conover	t-value	Pr(> t)	SI
$\chi^2 = 22,575$, df = 2, p-value = 1,253e-05	I - D = 0	-0,950	1,00000000	
$\chi^2 = 22,575$, df = 2, p-value = 1,253e-05	R - D = 0	3,562	0,00290590	**
$\chi^2 = 22,575$, df = 2, p-value = 1,253e-05	R - I = 0	4,512	0,00016577	***

TABLE 4.8: Résultat du test de Friedman et du *Post-Hoc* de Conover pour la comparaison de la reconnaissance du rythme, de la durée et de l'intensité.

Afin de vérifier l'hypothèse H_{06} , nous avons comparé la reconnaissance de chaque motif pour l'item X, d'abord indépendamment de la position, puis en fonction de chaque position. Les performances des utilisateurs sont résumées dans le tableau 4.9.

	V1	V2	V3	V4	\bar{V}
M1	61,90	30,95	38,10	40,48	42,86
M2	80,95	73,81	78,57	73,81	76,79
M3	64,29	54,76	61,90	54,76	58,93
M4	78,57	42,86	57,14	54,76	58,33
M5	88,10	61,90	80,95	64,29	73,81
\bar{M}	74,76	52,86	63,33	57,62	62,14

TABLE 4.9: Taux de reconnaissance moyen (en %) des 5 motifs quelque soit la reconnaissance de l'item X.

Nous avons utilisé un test de Friedman pour comparer la reconnaissance des motifs. Nous observons qu'il existe une différence d'observation entre motifs, rejetant alors l'hypothèse H_6 (Tab. 4.10, Fig. 4.12), ce qui nous permet de mettre en évidence une différence d'identification des motifs entre les différentes positions autour du poignet. Les motifs $M2$ et $M5$, identifiés à 76,79% et 73,81%, sont bien mieux perçus que $M1$ (identifié à 42,86%). Nous constatons également que $M2$ est aussi mieux perçu que $M3$ et $M4$ (identifiés à 58,93% et 58,33%). De plus, nous observons que $M2$ et $M5$ sont bien mieux distingués pour l'ensemble des positions autour du poignet (Tab. 4.10).

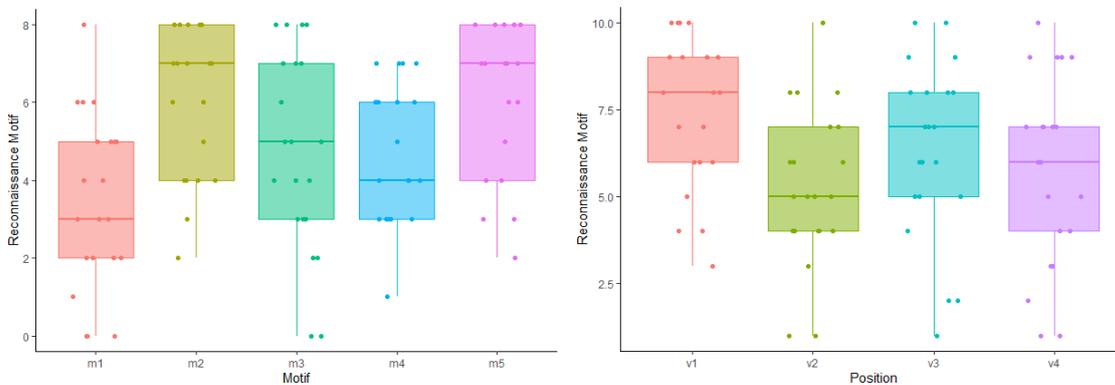


FIGURE 4.12 – Reconnaissance moyenne des 5 motifs pour les différentes positions de l'item X par les utilisateurs de ViMA.

Friedman	Position	Conover	t-value	Pr(t)	SI
$\chi^2 = 34,249$, df = 4, p-value = 6,624e-07	V{x}	m2 - m1 = 0	5,108	2,1619e-05	***
$\chi^2 = 34,249$, df = 4, p-value = 6,624e-07	V{x}	m5 - m1 = 0	4,291	0,00049463	***
$\chi^2 = 34,249$, df = 4, p-value = 6,624e-07	V{x}	m3 - m2 = 0	-2,963	0,04014722	*
$\chi^2 = 34,249$, df = 4, p-value = 6,624e-07	V{x}	m4 - m2 = 0	-3,371	0,01154226	*
$\chi^2 = 14,678$, df = 4, p-value = 0,005418	V1	m5 - m1 = 0	2,888	0,049791	*
$\chi^2 = 14,678$, df = 4, p-value = 0,005418	V1	m5 - m3 = 0	3,085	0,027916	*
$\chi^2 = 17,394$, df = 4, p-value = 0,00162	V2	m2 - m1 = 0	3,580	0,0058845	**
$\chi^2 = 17,394$, df = 4, p-value = 0,00162	V2	m5 - m1 = 0	2,898	0,0484699	*
$\chi^2 = 17,394$, df = 4, p-value = 0,00162	V2	m4 - m2 = 0	-2,784	0,0669596	.
$\chi^2 = 19,206$, df = 4, p-value = 0,0007161	V3	m2 - m1 = 0	3,385	0,0110411	*
$\chi^2 = 19,206$, df = 4, p-value = 0,0007161	V3	m5 - m1 = 0	3,860	0,0022832	**
$\chi^2 = 14,104$, df = 4, p-value = 0,006971	V4	m2 - m1 = 0	3,524	0,0070636	*
$\chi^2 = 14,104$, df = 4, p-value = 0,006971	V4	m5 - m1 = 0	2,673	0,0910140	.

TABLE 4.10: Résultats des tests de Friedman pour la comparaison de la reconnaissance du motif en fonction des positions V{x}.

Nous avons alors voulu vérifier si la reconnaissance du motif est liée à la position en utilisant un test de Friedman ($\chi^2 = 18,597$, $df = 3$, $p\text{-value} = 0,0003312$). Cette comparaison a mis en évidence qu'il existe une nette différence avec la position du dessus (V1), position qui permet une bien meilleure identification que sur les côtés (Tab. 4.11).

Friedman	Position	Conover	t-value	Pr(> t)	SI
$\chi^2=18,597$, $df = 3$, $p\text{-value} = 0,0003312$	V{x}	v2 - v1 = 0	-4,112	0,0007272	***
$\chi^2=18,597$, $df = 3$, $p\text{-value} = 0,0003312$	V{x}	v4 - v1 = 0	-3,100	0,0176924	*

TABLE 4.11: Test de Friedman et *Post Hoc* de Conover pour la comparaison de l'identification du motif en fonction de la position.

Après avoir analysé la reconnaissance de la position et du motif, nous analysons maintenant le résultat de la reconnaissance des items, et ce afin de déterminer quels items sont facilement identifiés par l'ensemble des utilisateurs. Les résultats de l'identification des motifs sont résumés dans le tableau 4.12.

	M1	M2	M3	M4	M5	\bar{M}
V1	59,52	54,76	47,62	73,81	78,57	62,86
V2	26,19	61,90	45,24	42,86	57,14	46,67
V3	38,10	76,19	57,14	52,38	76,19	60,00
V4	30,95	59,52	50,00	54,76	54,76	50,00
\bar{V}	38,69	63,10	50,00	55,95	66,67	54,88

TABLE 4.12: Taux de reconnaissance moyen (en %) des items X, en fonction de la position et du motif, par les utilisateurs de ViMA.

Pour cela, nous avons tout d'abord créé plusieurs matrices de confusion qui mettent en évidence les items les mieux perçus et les sources principales de confusion. Ces matrices ont permis de plus de calculer le transfert d'informations de notre bracelet vibrotactile après une durée moyenne d'entraînement de 20 min. Nous avons calculé une estimation pessimiste à partir de l'équation 3.4 (p.95) de l'IT de 2,31 bits, soit de 5 items sur 20 distinguables (Fig. 4.13). Nous observons de plus que les utilisateurs identifient au minimum 2 positions sur 4 (IT = 1,19 bits, Fig. 4.14) et au moins 1 item sur 5 (IT = 0,85 bits, Fig. 4.15).

Afin de comparer l'identification des différents items X, nous voulions initialement mettre en place une ANOVA à deux facteurs, mais le jeu de données ne vérifie pas les hypothèses nécessaires à son application. Nous avons donc évalué le niveau de corrélation entre les motifs $M\{x\}$ et les positions $V\{x\}$. Pour vérifier l'indépendance, nous avons utilisé un test de χ^2 dont le résultat montre qu'il existe une telle dépendance ($\chi^2=6,524975$, $df=12$, $p\text{-value} = 0,8873453$). L'hypothèse H_7 est donc conservée. Un test de V de Kramer montre cependant que l'effet de cette dépendance est faible ($V = 0,06922$).

Nous avons alors décidé de vérifier séparément l'influence du motif et de la position sur l'identification de l'item X. Comme pour l'hypothèse H_{0_1} , nous avons utilisé un test de Friedman pour d'abord comparer les positions (Tab. 4.13) puis les motifs (Tab. 4.14).



FIGURE 4.13 – Matrice de confusion pour la reconnaissance des items.

Friedman	Motifs	Conover	t-value	Pr(t)	SI
$\chi^2 = 15,032$, df = 3, p-value = 0,001789	M{x}	v2 - v1 = 0	-3,289	0,010098	*
$\chi^2 = 15,032$, df = 3, p-value = 0,001789	M{x}	v4 - v1 = 0	-2,657	0,060549	.
$\chi^2 = 15,032$, df = 3, p-value = 0,001789	M{x}	v3 - v2 = 0	2,657	0,060549	.
$\chi^2 = 12,961$, df = 3, p-value = 0,004722	M1	v2 - v1 = 0	-3,157	0,014980	*
$\chi^2 = 12,961$, df = 3, p-value = 0,004722	M1	v4 - v1 = 0	-3,080	0,018748	*
$\chi^2 = 3,5954$, df = 3, p-value = 0,3086	M2	Non Significatif			
$\chi^2 = 1,2703$, df = 3, p-value = 0,7362	M3	Non Significatif			
$\chi^2 = 7,8868$, df = 3, p-value = 0,04841	M4	v2 - v1 = 0	-2,747	0,047629	*
$\chi^2 = 9,1513$, df = 3, p-value = 0,02735	M5	v4 - v1 = 0	-2,481	0,095486	.
$\chi^2 = 9,1513$, df = 3, p-value = 0,02735	M5	v4 - v3 = 0	-2,481	0,095486	.

TABLE 4.13: Test de Friedman et *Post-Hoc* de Conover pour comparer la reconnaissance de l'item X en fonction de la position.



FIGURE 4.14 – Matrice de confusion pour la reconnaissance de la position.



FIGURE 4.15 – Matrice de confusion pour la reconnaissance du motif.

Friedman	Position	Conover	t-value	Pr(t)	SI
$\chi^2 = 21,572$, df = 4, p-value = 0,0002438	V{x}	m2 - m1 == 0	3,770	0,0031067	**
$\chi^2 = 21,572$, df = 4, p-value = 0,0002438	V{x}	m5 - m1 == 0	3,719	0,0037002	**
$\chi^2 = 21,572$, df = 4, p-value = 0,0002438	V{x}	m4 - m1 == 0	2,789	0,0660317	.
$\chi^2 = 11,126$, df = 4, p-value = 0,02518	V1	m5 - m3 == 0	2,916	0,045942	*
$\chi^2 = 13,834$, df = 4, p-value = 0,007842	V2	m2 - m1 == 0	3,161	0,022233	*
$\chi^2 = 13,834$, df = 4, p-value = 0,007842	V2	m5 - m1 == 0	2,927	0,044604	*
$\chi^2 = 17,098$, df = 4, p-value = 0,00185	V3	m2 - m1 == 0	3,307	0,014158	*
$\chi^2 = 17,098$, df = 4, p-value = 0,00185	V3	m5 - m1 == 0	3,245	0,017136	*
$\chi^2 = 11,245$, df = 4, p-value = 0,02394	V4	m2 - m1 == 0	3,006	0,035315	*

TABLE 4.14: Test de Friedman et *Post-Hoc* de Conover pour comparer la reconnaissance de l'item X en fonction de la position.

Les résultats obtenus montrent que la reconnaissance des items est significativement meilleure sur le dessus (V1) et le dessous (V3) du poignet. Bien qu'aucune différence ne soit visible entre le dessus/dessous et les côtés. Les utilisateurs ont quant à eux expliqué qu'ils préfèrent les positions du dessus et du dessous comparées aux positions latérales. Les utilisateurs rapportent aussi préférer le côté extérieur (V4) au côté intérieur du poignet (V2). Presque la moitié des utilisateurs ajoutent qu'il est parfois difficile de distinguer le côté extérieur (V4) avec le dessus (V1), et le côté intérieur (V2) avec le dessous (V3), bien qu'ils fassent la différence au moment de la calibration.

Par rapport au motif, la reconnaissance des items est significativement meilleure pour les motifs M2 et M5 pour l'ensemble des positions. M1 est par contre le motif le moins bien identifié, et ce quelle que soit la position. La matrice de confusion par motifs montre que M4 est souvent confondu avec M2. De plus, M2 et M4 ne sont quasiment jamais confondus avec le reste des motifs. Nous confirmons que le rythme peut faciliter la distinction des items, mais que les utilisateurs ont tendance à sous-estimer l'intensité des vibrations. Ce phénomène reste cependant moins marqué sur le dessus du poignet.

Nous observons que M1 est souvent confondu avec M3 ou M5, et M3 l'est plus régulièrement avec M5 qu'avec M1. Nous observons ici que la durée des stimuli tend à être plus facilement identifiée que l'intensité, cependant la durée a tendance à induire une surestimation de l'intensité. Nous observons ici les effets de l'interaction entre la durée et l'intensité, effets qui se traduisent par un ressenti des stimuli longs et de faibles intensités comme plus intenses que les stimuli courts et de même intensité. De fait, pour une majorité d'individus, les niveaux d'intensité et de durée séparément choisies ne sont pas suffisamment distincts une fois combinés.

Nous vérifions finalement l'hypothèse alternative H_7 qui implique, pour la reconnaissance des items, une interdépendance entre le motif et la position.

À partir des observations précédentes, nous proposons alors un classement final des 20 items en les regroupant en 5 groupes de performance (Tab. 4.15).

Groupes	Items
Gp 1	(V1, M2), (V1, M5), (V3, M2), (V3, M5)
Gp 2	(V4, M2), (V4, M5), (V2, M2), (V2, M5)
Gp 3	(V1, M3), (V1, M4), (V3, M3), (V3, M4)
Gp 4	(V4, M4), (V4, M3), (V2, M3), (V2, M4)
Gp 5	(V1, M1), (V4, M1), (V2, M1), (V3, M1)

TABLE 4.15: Regroupement des items en 5 groupes de performances, allant de Gp1, les mieux reconnus, à Gp5, les moins bien reconnus.

4.2.4 Discussion

Dans cette section, nous discutons des effets de l'entraînement sur les utilisateurs afin de quantifier la marge de progression qu'il est possible d'espérer des utilisateurs.

4.2.4.1 Le bilan après un court entraînement

Une analyse par un test de Friedman (Tab. 4.16) de la NASA-TLX remplie par l'ensemble des utilisateurs montre que la tâche de reconnaissance des items est globalement perçue comme ni facile ni difficile. La demande mentale est en revanche légèrement supérieure à une demande mentale neutre. Dans l'état, le rythme tend à être la dimension performant le mieux. En revanche, bien que la position soit bien reconnue par l'ensemble des utilisateurs, elle ne se dégage pas des autres dimensions. En recoupant, ces résultats avec les retours utilisateurs lors de l'entretien, l'élimination d'une position sur les quatre possibles pourrait améliorer les performances utilisateurs.

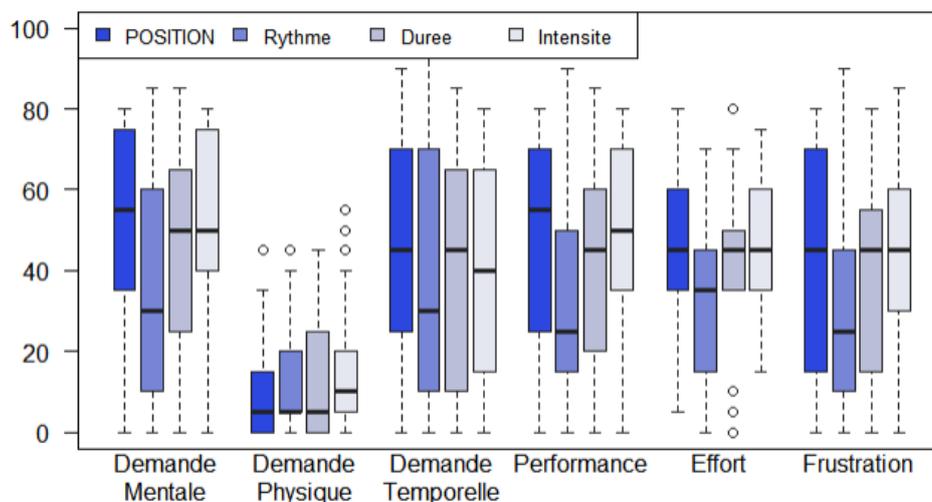


FIGURE 4.16 – Résultats du retour subjectif des utilisateurs recueilli par une NASA-TLX pour chaque dimension composant les items vibrotactiles.

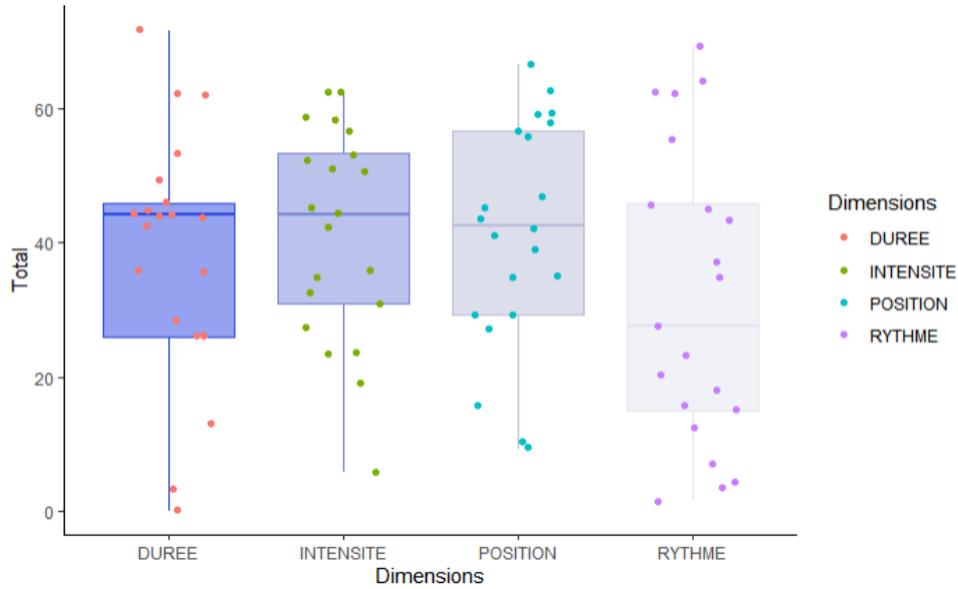


FIGURE 4.17 – Résultats Total pour chaque dimension de la NASA-TLX.

Friedman	Dimension	Conover	t-value	Pr(t)	SI
$\chi^2 = 3,8814$, df = 3, p-value = 0,2746	DM		Non Significatif		
$\chi^2 = 9,8077$, df = 3, p-value = 0,02027	DP	P - I = 0	-3,097	0,017817	*
$\chi^2 = 7,1053$, df = 3, p-value = 0,06862	DT	P - I = 0	2,578	0,07451	.
$\chi^2 = 7,9724$, df = 3, p-value = 0,04659	PG	R - I = 0	-2,631	0,064877	.
$\chi^2 = 6,7941$, df = 3, p-value = 0,07876	E		Non Significatif		
$\chi^2 = 3,2407$, df = 3, p-value = 0,356	F		Non Significatif		
$\chi^2 = 6,267$, df = 3, p-value = 0,09932	Total	R - I == 0	-2,433	0,1000	.

TABLE 4.16: Test de Friedman sur les différentes dimensions de la NASA-TLX.

Pour cela, un test de Friedman a été utilisé pour mesurer l'effet de l'entraînement sur l'identification des items (Tab. 4.17). Il apparaît globalement que la reconnaissance des motifs par les utilisateurs s'améliore de manière significative au bout du 4^e entraînement pour la reconnaissance des items (Fig. 4.18). Cette amélioration est surtout due à une amélioration de la reconnaissance du motif, reconnaissance qui est systématiquement meilleure d'itération en itération par rapport au premier entraînement. En comparaison, l'identification reste constante, avec une identification moyenne supérieure à 78% tout le long des entraînements. L'identification de la position est donc plus intuitive pour les utilisateurs.

Friedman	Dimension	Conover	t-value	Pr(t)	SI
$\chi^2 = 19,642$, df = 4, p-value = 0,0005876	Item	E4 - E1 == 0	4,200	0,00068711	***
$\chi^2 = 21,572$, df = 4, p-value = 0,0002438	Item	E5 - E1 == 0	2,965	0,03987789	*
$\chi^2 = 4,3597$, df = 4, p-value = 0,3595	Item	E3 - E1 == 0	2,866	0,05307362	.
$\chi^2 = 4,3597$, df = 4, p-value = 0,3595	V{x}		Non Significatif		
$\chi^2 = 18,179$, df = 4, p-value = 0,001139	M{x}	E4 - E1 == 0	4,019	0,0013139	**
$\chi^2 = 18,179$, df = 4, p-value = 0,001139	M{x}	E5 - E1 == 0	3,052	0,0308144	*
$\chi^2 = 18,179$, df = 4, p-value = 0,001139	M{x}	E2 - E1 == 0	2,696	0,0854723	.
$\chi^2 = 18,179$, df = 4, p-value = 0,001139	M{x}	E3 - E1 == 0	2,696	0,0854723	.
$\chi^2 = 15,8$, df = 4, p-value = 0,0033	R	E4 - E1 == 0	3,664	0,0044447	**
$\chi^2 = 15,8$, df = 4, p-value = 0,0033	R	E3 - E1 == 0	3,071	0,0291054	*
$\chi^2 = 7,743$, df = 4, p-value = 0,1015	D		Non Significatif		
$\chi^2 = 11,176$, df = 4, p-value = 0,02465	I	E4 - E1 == 0	3,129	0,024489	*

TABLE 4.17: Test de Friedman pour la comparaison de la reconnaissance des différentes dimensions par les utilisateurs au cours des 5 phases d'entraînement.

Lorsque nous nous intéressons plus particulièrement au motif, on constate une nette

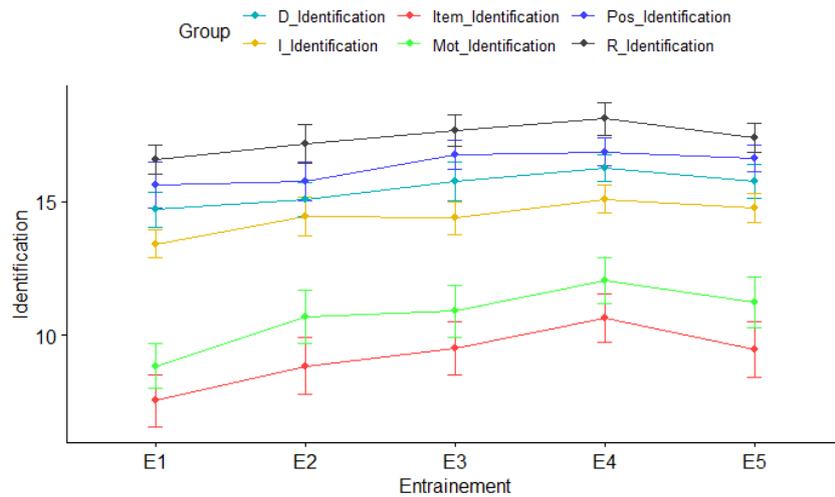


FIGURE 4.18 – Progression moyenne des utilisateurs pour l’identification des motifs, des items et de chaque dimension.

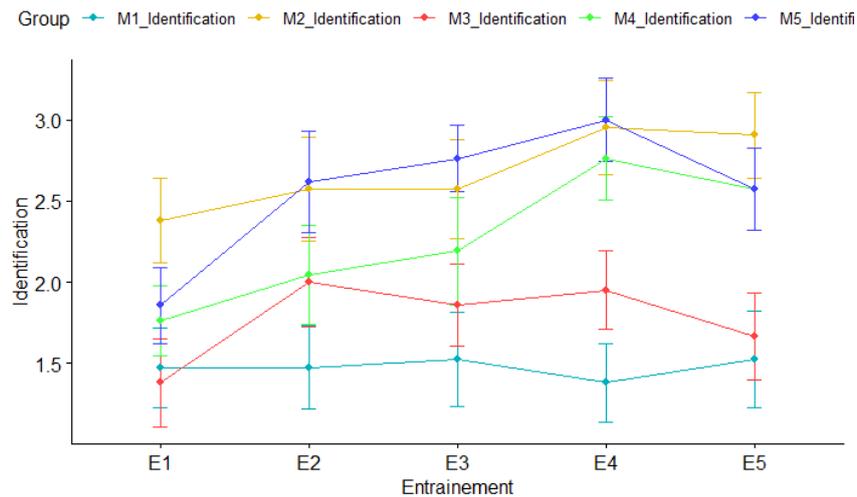


FIGURE 4.19 – Progression moyenne des utilisateurs pour l’identification de chaque motif.

amélioration du rythme, de la durée et de l’intensité au bout du 4^e entraînement. Cela se traduit par une amélioration de la reconnaissance des motifs $M4$ et $M5$. Pour ces motifs, la reconnaissance passe d’un peu moins de 2 occurrences du motif reconnues jusqu’à environ 3 occurrences sur les 4 possibles par série de 20 items (Fig. 4.19, Tab. 4.18).

L’amélioration des performances des utilisateurs est principalement due à une meilleure identification de l’intensité et du rythme. On observe une diminution des combinaisons de rythme et intensité qui ne trouvent pas de correspondance avec l’un des 5 motifs ($M1$ à $M5$). Nous avons noté ces motifs $M\{?\}$, motifs qui sont le plus régulièrement la combinaison :

- d’un stimulus de faible intensité, de courte durée, et de rythme simple,
- d’un stimulus de forte intensité, durée longue, rythme double.

Cela renforce nos observations indiquant une mauvaise estimation du couple durée-intensité (Tab. 4.19).

Friedman	Motif	Conover	t-value	Pr(t)	SI
$\chi^2 = 1,007$, df = 4, p-value = 0,9087	M1				Non Significatif
$\chi^2 = 8,0875$, df = 4, p-value = 0,08843	M2				Non Significatif
$\chi^2 = 5,6292$, df = 4, p-value = 0,2286	M3				Non Significatif
$\chi^2 = 12,553$, df = 4, p-value = 0,01368	M4	E4 - E1 == 0	3,071	0,029105	*
$\chi^2 = 12,553$, df = 4, p-value = 0,01368	M4	E5 - E1 == 0	2,802	0,063675	.
$\chi^2 = 23,808$, df = 4, p-value = 8,726e-05	M5	E2 - E1 == 0	3,150	0,02296548	*
$\chi^2 = 23,808$, df = 4, p-value = 8,726e-05	M5	E3 - E1 == 0	3,656	0,00456404	**
$\chi^2 = 23,808$, df = 4, p-value = 8,726e-05	M5	E4 - E1 == 0	4,556	0,00018441	***
$\chi^2 = 23,808$, df = 4, p-value = 8,726e-05	M5	E5 - E1 == 0	2,981	0,03802406	*

TABLE 4.18: Test de Friedman pour la comparaison de la reconnaissance des différents motifs par les utilisateurs au cours 5 phases d'entraînement.

Entraînements	E1	E2	E3	E4	E5	Évaluation n°1
Moyenne $M\{\}$	4,52	2,52	2,76	1,9	2,1	2,1
Écart Type $M\{\}$	2,96	3,25	2,59	2,66	2,59	2,3
Moyenne (en%) $M\{\}$	22,62	12,62	13,81	9,52	10,48	10,48

TABLE 4.19: Évolution du nombre moyen de motifs $M\{\}$ au cours des entraînements, puis la moyenne au cours de l'évaluation.

4.2.4.2 Une sous-population experte

Nous avons mis en place des comparaisons entre les différents sous-groupes de la population d'utilisateurs (Tab. 4.20). Ces groupes ont été comparés en utilisant un test de Student, après avoir vérifié la normalité des résidus avec un test de Shapiro et avoir vérifié l'absence de différence entre les variances des deux groupes. Pour l'âge, le tour de poignet et l'IMC nous n'avons observé aucune différence significative. En revanche, la différence est significative en faveur des utilisateurs pratiquant un instrument de musique dès lors qu'ils doivent reconnaître des motifs et des items (Tab. 4.21, Fig. 4.20). Pour affiner cette comparaison, il serait de plus utile d'intégrer leur expérience musicale.

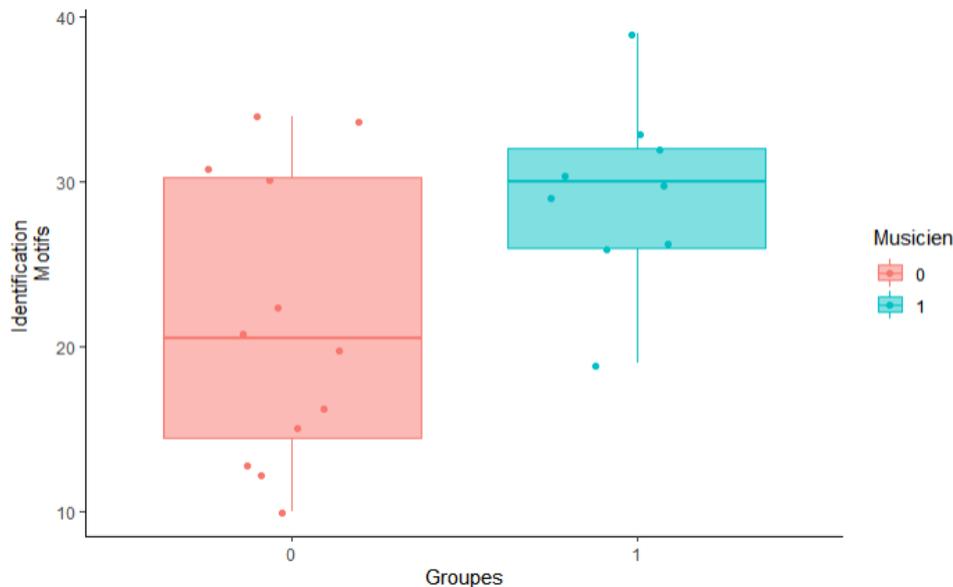


FIGURE 4.20 – Comparaison du groupe d'utilisateurs musiciens et non-musiciens pour la reconnaissance du motif.

La littérature scientifique indique que les musiciens montrent une meilleure intégration

temporelle des stimuli sensoriels qui se traduit par une plus grande facilité à distinguer les rythmes et les durées [126]. Cette différence semble être induite par une structuration différente du cerveau qui est liée à une pratique régulière. Cette structuration du cerveau favorise la mémoire à court terme et facilite le traitement des stimuli tactiles. De plus, pour les musiciens jouant d'un instrument induisant directement des vibrations sur la peau, on observe une capacité à distinguer certaines notes ainsi que le rythme de la mélodie au travers des vibrations seules [197]. Il est de fait possible de considérer ces utilisateurs comme experts, car ayant plus de facilité à distinguer les stimuli vibrotactiles.

	Groupes	N	Moyenne des Items	Écart Type des Items	Moyenne des Positions	Écart Type des Positions	Moyenne des Motifs	Écart Type des Motifs
Âge	- de 40 ans	12	23,00	8,68	33,50	3,48	26,08	9,24
	+ de 40 ans	9	20,56	8,76	34,00	6,08	23,22	7,28
Tour de Poignet	- de 16,4 cm	12	24,88	6,07	33,33	3,57	28,67	5,66
	+ de 16,4 cm	9	19,75	9,73	34,00	5,44	22,00	9,15
IMC	- de 22,9	10	25,00	6,85	33,50	3,77	28,5	6,42
	+ de 22,9	11	19,18	9,35	33,91	5,49	21,55	8,84
Musicien	Musicien	9	26,4	5,48	35,2	3,46	29,3	5,52
	Non-Musicien	12	18,6	9,12	32,6	5,21	21,5	8,76

TABLE 4.20: Comparaisons inter-groupes des performances utilisateurs (moyenne et écart type) pour la reconnaissance de 40 items au cours de la phase d'évaluation.

Dimensions	Normalité Non-musicien (Shapiro)	Normalité Musicien (Shapiro)	Différences des variances (Test F)	Test T	SI
Item	W = 0,93358, p-value = 0,4196	W = 0,98433, p-value = 0,9828	F = 2,7699, num df = 11, denom df = 8, p-value = 0,1588	t = -2,2864, df = 19, p-value = 0,03389	*
Position	W = 0,91768, p-value = 0,2673	W = 0,97112, p-value = 0,9041	F = 2,2751, num df = 11, denom df = 8, p-value = 0,253	t = -1,3134, df = 19, p-value = 0,2047	Non significatif
Motif	W = 0,90441, p-value = 0,1808	W = 0,96282, p-value = 0,8273	F = 2,5186, num df = 11, denom df = 8, p-value = 0,2	t = -2,3465, df = 19, p-value = 0,02995	*

TABLE 4.21: Comparaison par le test de Student des musiciens et non-musiciens pour la reconnaissance des items, du motif et de la position.

Pour ce groupe expert, nous évaluons le transfert d'informations de ViMA à 2,95-3,14 bits, soit un minimum de 7 à 9 items distinguables. Pour ce profil d'utilisateurs, 4 positions sont identifiées à plus de 80% et sont significativement mieux identifiées que l'intérieur du poignet lorsque l'item X est bien identifié. L'estimation de l'IT pour la position est de 1,38 bits, suggérant toujours un maximum de 3 positions sur 4 facilement identifiable. Il faudrait alors conserver (V1), (V3) et (V4). Pour le motif en revanche, nous estimons une valeur d'IT de 1,26 bits, autorisant entre 2 et 3 motifs par position. M2 et M5 sont toujours très bien identifiés (91% et 82%). En revanche, nous observons une bien meilleure identification de M3 et M4. Au vu des matrices de confusion (Fig. 4.21, Fig. 4.22 et Fig. 4.23) pour ce groupe, il est possible de conserver un minimum de 3 motifs sur 5 (M2, M5 et M4). Un 4ème motif pourrait être ajouté en combinant M1 et M3.

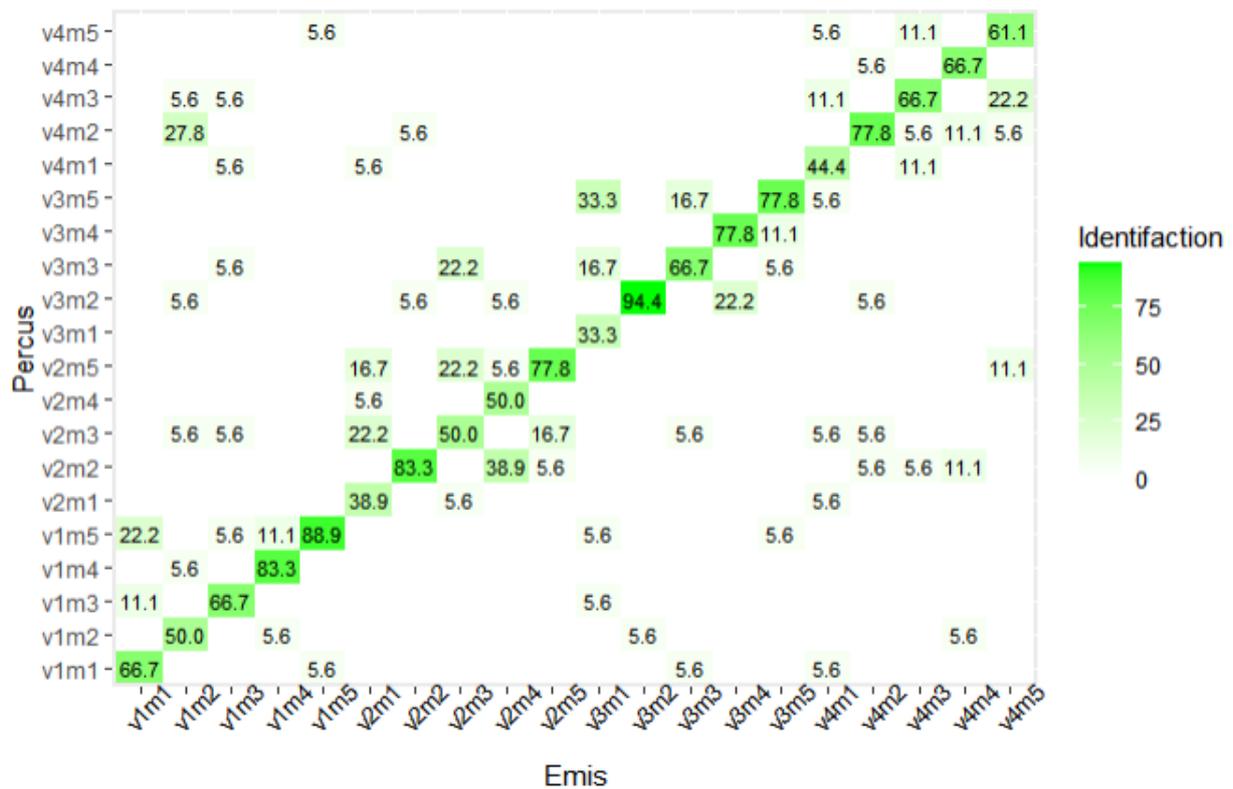


FIGURE 4.21 – Matrice de confusion pour la reconnaissance des items pour les musiciens.

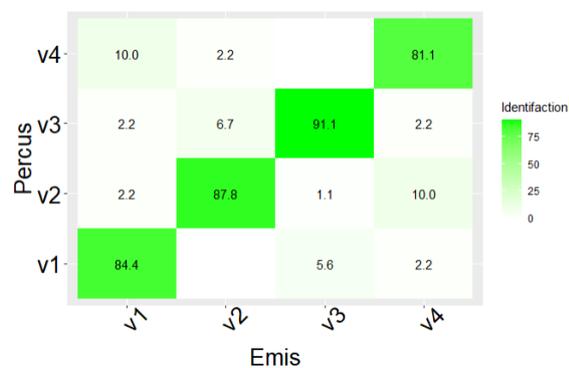


FIGURE 4.22 – Matrice de confusion pour la reconnaissance de la position pour les musiciens.



FIGURE 4.23 – Matrice de confusion pour la reconnaissance du motif pour les musiciens.

4.2.4.3 Conclusion partielle

L'analyse des performances couplée aux retours subjectifs des utilisateurs suggère qu'il est préférable de réduire à 3 le nombre de positions autour du poignet pour une présentation de l'item X suivant le paradigme AXB avec une durée totale de 1 s. Il est alors judicieux de conserver V1 (dessus), V3 (dessous) et V4 (extérieur). Avec 3 vibreurs au lieu de 4, il devient possible d'augmenter l'espacement entre les vibreurs autour du poignet. Un plus grand espacement devrait ainsi faciliter l'identification des items vibrotactiles.

Seulement 2 motifs sur les 5, $M2$ et $M5$, sont facilement distinguables par l'ensemble des utilisateurs. De plus, pour une population peu entraînée, il est préférable de se limiter à ces deux seuls motifs différents sur les côtés du poignet. Pour le dessus ou le dessous, il semble en revanche plus facile pour les utilisateurs de distinguer différents niveaux d'intensité ou de durée. La performance des musiciens suggère qu'une progression de l'ensemble des utilisateurs est possible avec suffisamment d'entraînement et de temps pour consolider la reconnaissance.

4.3 ViMAAM : ViMA pour la fabrication additive

Nous devons maintenant créer un ensemble de symboles pour communiquer les informations associées à chaque critère, c'est-à-dire que nous devons définir quels items vibrotactiles choisir pour représenter les états des différents critères liés à la fabrication.

4.3.1 Le suivi des procédés de fabrication par dépôt de matière

4.3.1.1 Les critères de fabrication

Nous nous intéressons aux procédés de fabrication additive béton et métallique. Pour ces procédés additifs industriels, il existe deux types de critères : des critères qualifiant le dépôt de matière et des critères qualifiant la pièce fabriquée. Ces critères sont liés aux phénomènes engendrés par le procédé. Ces phénomènes sont induits par trois paramètres de fabrication : la vitesse de déplacement du robot, la quantité de matière apportée et la quantité d'énergie apportée. Nous avons sélectionné cinq critères qui permettent d'évaluer le déroulement de la fabrication (voir Fig. 4.22).

Les deux premiers critères sont les dimensions caractéristiques du dépôt de matière (appelé aussi cordon) : la hauteur (C1) et la largeur (C2). Ces deux dimensions sont directement liées à l'interaction entre matière-procédé-pièce et sont définies comme suit :

- la hauteur est la distance entre la couche précédente et le sommet du cordon ;
- la largeur correspond à la longueur de l'interface (zone de contact) entre le dépôt de matière et la couche précédente ;

En fonction du procédé, la forme du dépôt de matière peut changer. Par exemple pour les procédés métalliques, la section est une demi-ellipse avec un contour lisse et dont le ratio entre la hauteur et la largeur rend compte de la qualité du dépôt de matière déposée [191] :

- il est « collé » si la hauteur est supérieure à la largeur ;
- il est « effondré » si la largeur est supérieure à la hauteur ;
- il est « idéal » si la largeur et la hauteur sont équivalentes.

Le troisième critère (C3) est la température du dépôt de matière, aussi appelé température du bain de fusion pour les procédés métalliques. Il a une importance particulière pour les procédés métalliques, car il influe sur la pénétration du dépôt de matière avec les couches inférieures, mais également sur la forme du dépôt de matière. Le quatrième critère évalue la hauteur de la pièce (C4) au cours de la fabrication résultant de l'empilement des couches de matière. Ce critère permet de contrôler que l'outil est maintenu en permanence à la bonne distance et que le procédé n'affecte pas la géométrie des couches précédentes. Le dernier critère est la température moyenne de la pièce au cours de la fabrication (C5). Par ce critère, on vérifie finalement que l'apport d'énergie est maintenu dans une plage de fonctionnement qui assure les propriétés mécaniques de la pièce fabriquée. De plus, pour

les procédés métalliques, une élévation trop importante de la pièce peut faire s'écraser les couches inférieures impliquant une déformation de la géométrie.

Pour chacun de ces critères, il existe une plage de fonctionnement normal. Nous avons donc défini des seuils permettant d'établir trois états ordonnés pour chaque critère : un dépassement négatif quand le seuil inférieur est dépassé (noté $-$), un état normal (noté 0) quand la valeur est entre les deux seuils, et un dépassement positif quand le seuil supérieur est dépassé (noté $+$).

Nous traitons alors un total de 15 informations pouvant être exprimées sous la forme d'une expression littérale (Équ. 4.1), avec l'état du critère $e \in \{-, 0, +\}$, ϕ la nature de la dimension physique évaluée (hauteur h , largeur l ou température T) et α ce que caractérise le critère (pièce p) ou le dépôt de matière (dm).

$$\Delta_{\phi|\alpha}^e \quad (4.1)$$

Ces informations sont alors communiquées sous la forme d'un message constitué de 5 composantes retournant l'état de chacun des 5 critères. Par exemple, la situation normale est exprimée par le message :

$$[\Delta_{h|p}^0, \Delta_{h|dm}^0, \Delta_{l|dm}^0, \Delta_{T|dm}^0, \Delta_{T|p}^0] \quad (4.2)$$

4.3.1.2 Un grand nombre de situations de fabrication

La combinaison de ces cinq critères de fabrication permet l'expression de différentes situations de fabrication. Ces situations décrivent l'évolution géométrique et physique du dépôt de matière et de la pièce en fabrication.

Cette combinaison s'exprime comme 5 fois la répétition d'un tirage d'un état parmi 3 états possibles, c'est-à-dire $(C_1^3)^5$.

Il en résulte un ensemble de 243 situations de fabrication, dont 242 constituent des situations de dysfonctionnement, et une seule situation correspondant à un état normal de fabrication (Équ. 4.2).

4.3.2 La création d'un ensemble de symboles pour la fabrication additive

4.3.2.1 La création de sens

La création de fonctions de transfert entre les propriétés des stimuli vibrotactiles et l'information doit répondre à plusieurs problématiques de conception afin de faciliter leur adoption par l'utilisateur. Sanders et McCormick [201] expliquent que pour qu'une interface puisse être adoptée, il faut aussi bien considérer les aspects perceptuels que les aspects liés à l'apprentissage des relations qui connectent les stimuli sensoriels à l'information. La difficulté est alors pour l'utilisateur de s'approprier l'interface et d'y investir suffisamment de temps pour développer ses capacités perceptuelles et en maîtriser le langage.

Par le terme sens, on désigne « l'ensemble d'idées que représente un signe, un symbole ». Le sens, c'est aussi « l'aptitude à connaître, à apprécier quelque chose de façon immédiate et intuitive ». La création de sens est alors le processus d'attribution de signification aux stimuli, signaux ou symboles. Le sens d'un symbole peut reposer sur les codes culturels de l'utilisateur (pictogramme, logo...), mais peut être aussi le fruit d'un apprentissage (apprentissage d'un système d'écriture étranger).

Critères	Nom de la variable associée au critère	Description	Valeur de consigne	Domaine de validité
C1	$h_p(t)$	La hauteur de la pièce le long de la trajectoire outil. Unité : millimètre	$h_{p con} = n * h_{dm con}$ Ex : Métallique : 3 mm Béton : 4 mm	$ h_p(t) - h_{p con} < \Delta_{h dm}$ $\Delta_{h p} = + - \frac{h_{dm con}}{20}$
C2	$h_{dm}(t)$	La hauteur de la section du dépôt de matière. Unité : millimètre	$h_{dm con}$ Ex : Métallique : 3 mm Béton : 40 mm	$ h_{dm}(t) - h_{dm con} < \Delta_{h dm}$ Ex de Δ : Métallique : 0.3 mm Béton : 4 mm
C3	$l_{dm}(t)$	La largeur de la section du dépôt de matière. Unité : millimètre	$l_{dm con}$ Ex : Métallique : 4 mm Béton : 60 mm	$ l_{dm}(t) - l_{dm con} < \Delta_{l dm}$ Ex de Δ : Métallique : 0.4 mm Béton : 6 mm
C4	$T_{dm}(t)$	La température du dépôt de matière. Unité : degrés Celcius	$T_{dm con}$ Ex : Métallique : 1800°C Béton : 25°C	$ T_{dm}(t) - T_{dm con} < \Delta_{T dm}$ Ex de Δ : Métallique : 200°C Béton : 10°C
C5	$T_p(t)$	La température moyenne de la pièce en dehors du dépôt de matière. Unité : degrés Celcius	$T_{p con}$ Ex : Métallique : 600°C Béton : 25°C	$ T_{pmoy}(t) - T_{p con} < \Delta_{T p}$ Ex de Δ : Métallique : 600°C Béton : 10°C

TABLE 4.22: Tableau des critères de fabrication additive.

Pour la création d'items vibrotactile, l'exploitation de connaissances issues de la culture par un groupe d'utilisateurs permet une réduction significative du temps d'entraînement. Cela est mis en évidence par la facilité qu'ont les utilisateurs à s'approprier la représentation de l'alphabet romain implémentée par EdgeVib [123] comparée à la version codée reposant sur la méthode OST proposée par Luzhnica *et al.* [139].

Quant à la création de symboles vibrotactile, par l'association d'un item avec une information, elle est fréquemment arbitraire du fait de la difficulté de trouver des associations qui font sens entre l'univers tactile et celui de l'information communiquée [66]. Malgré ce manque, il est toujours possible de créer une représentation efficace. Pour de plus petits groupes de symboles (une dizaine environ), l'attribution arbitraire des items et de l'information n'est pas significativement différente d'une attribution privilégiant des associations qui font sens [66]. Elle ne facilite pas forcément l'apprentissage ni le rappel sur le long terme des symboles. La conclusion proposée est que les utilisateurs, même en l'absence de sens explicite, créent eux-mêmes du sens pour mémoriser l'information véhiculée par ces symboles. La création de symboles explicites peut donc n'être que partielle, laissant libre l'utilisateur de créer ses propres règles mémotechniques. Zhao *et al.* [278] corroborent l'absence de bénéfice pour l'apprentissage des symboles pour un petit nombre de symboles, mais observent qu'une association basée sur le sens facilite la restitution de l'information lorsque les items sont combinés pour former des mots. Cette dernière remarque est cependant discutable, car elle est conditionnée par l'identification d'un mot qui peut être deviné en identifiant que partiellement les symboles qui le forment.

Le sens est principalement véhiculé par le rythme et par l'intensité ressentie [246], bien qu'il puisse l'être aussi par une association écologique reposant sur une métaphore spatiale [67, 278]. Ainsi, les phonèmes produits par les lèvres sont proches du poignet et ceux produits dans la gorge sont situés près du coude. Pour le dispositif proposé, il est possible d'exploiter deux caractéristiques spatiales de notre interface vibrotactile. La première est la possibilité d'utiliser l'opposition entre main gauche et main droite qui constitue des surfaces de stimulation physiquement distinctes. De plus, cette architecture pourrait avoir l'avantage de faciliter l'identification des motifs spatio-temporels. La seconde est d'exploiter la forme de bracelet du dispositif vibrotactile, car il a l'avantage de rappeler la géométrie du dépôt de matière et de proposer des symétries.

La position étant la dimension la plus facilement identifiée par les utilisateurs, nous avons voulu l'exploiter afin de trouver une représentation qui fasse sens pour les utilisateurs. Pour trouver une représentation spatiale explicite, grâce à une enquête Google Form (Annexe D) nous avons interrogé plusieurs utilisateurs sur la représentation de données géométriques et thermiques ainsi que sur la manière dont ils représentent un dépassement d'un seuil au tour du poignet.

Cette enquête a été menée auprès d'utilisateurs ayant une expertise de la fabrication additive afin de déterminer une représentation de l'information qui fasse consensus. Un total de 27 utilisateurs (23 hommes et 4 femmes) ont répondu à l'enquête, âgés entre 18 et 65 ans (11,1% de 18-24 ans, 44,4% de 25-34 ans, 18,5% de 35-44 ans, 18,5% de 45-54 ans et 7,4% de 55-64 ans). Parmi eux, 90% étaient droitiers. Ces utilisateurs sont en majorité des chercheurs (12 utilisateurs) et des ingénieurs (13 utilisateurs), et 75% ont fabriqué au moins une pièce au cours de l'année. Parmi ces utilisateurs, 11 peuvent être qualifiés d'utilisateurs expérimentés, ayant fabriqué plus de 10 pièces au cours de l'année précédente. Ces utilisateurs ont principalement recours à des procédés de fabrication métallique (SLM, LMD, WAAM, p.22) ou plastique (FFF, p.21).

La première question qui se pose est la suivante :

« *Comment représenter des informations de nature géométrique et thermique autour du poignet de l'utilisateur ?* »

La forme du bracelet ViMA permet de représenter deux aspects de l'information communiquée à l'utilisateur. La première représentation repose sur la symétrie du poignet, permettant ainsi de représenter l'opposition des états de chaque critère. La forme du bracelet permet de créer deux axes sur lesquels représenter l'information : l'axe vertical (dessus/dessous) et l'axe horizontal (intérieur/extérieur) ont été retenus. Pour ces deux axes, nous avons demandé aux utilisateurs de choisir quelle représentation spatiale est selon eux la plus adaptée pour représenter les variations d'une hauteur, d'une largeur et d'une température. Sur les 21 utilisateurs qui se sont exprimés sur la représentation de la hauteur, 71% (dont 11 experts sur 15 utilisateurs) ont retenu l'axe vertical. Sur les 22 utilisateurs qui se sont exprimés sur la représentation de la largeur, 60% (dont 9 experts sur 13 utilisateurs) ont choisi l'axe horizontal. Concernant la représentation de la température, 21 utilisateurs ont répondu et 71,1% (dont 11 experts sur 15 utilisateurs) ont fait le choix d'une représentation verticale. Il est cependant à noter que la représentation suivant l'axe vertical semble être largement préférée à la représentation sur l'axe horizontal quand il s'agit de représenter une augmentation ou diminution d'une dimension physique, et cela même lorsque la dimension étudiée est une largeur.

Justement, pour ce type de représentation, il est nécessaire de définir ce que l'on appelle « la polarité », c'est-à-dire de définir la direction de la représentation. La seconde question qui se pose est la suivante :

« *Comment représenter un dépassement positif ou négatif d'un seuil ?* »

Concernant l'axe vertical, ceci a déjà été envisagé par Ng *et al.* [163] qui ont fait le choix d'associer un incrément positif sur le dessus. Dans notre contexte, on remarque qu'une augmentation positive est systématiquement associée au-dessus du poignet, quelle que soit la nature du critère, et une diminution est associée au-dessous du poignet. Les valeurs positives doivent donc être associées au-dessus du poignet et les valeurs négatives au-dessous du poignet. Concernant la polarité sur l'axe horizontal, le choix est plus complexe. Pour se rendre compte du problème, nous avons dans un premier temps demandé aux utilisateurs de s'imaginer la représentation des valeurs négatives et positives en regardant le dos de leur main. Puis dans un second temps, de répondre à la même question, mais en retournant leur main pour en regarder la paume. Lorsque les utilisateurs regardent le dos de leur main, 13 utilisateurs associent les valeurs positives au côté extérieur de la main droite contre 6 sur le côté intérieur. Lorsque les utilisateurs regardent la paume de leur main, 11 associent les valeurs positives au côté extérieur de la main droite contre 10 sur le côté intérieur. Nous distinguons alors deux catégories d'utilisateurs lorsque nous demandons aux utilisateurs de retourner leur main. Parmi les utilisateurs qui ont répondu, nous observons que 9 utilisateurs maintiennent leur choix de représentation, quelle que soit l'orientation de la main, alors que 6 utilisateurs inversent l'association lorsqu'ils inversent leur main. De fait, le choix d'une représentation de la polarité pour le côté de la main devient inconsistant.

En résumé, la représentation d'un dépassement positif est associée au-dessus du poignet et un dépassement négatif au-dessous du poignet. Pour le côté du poignet, il est en revanche impossible de trancher sans imposer aux utilisateurs une représentation. La

dernière question qui se pose est la suivante : « *Est-ce que les utilisateurs émettent une préférence sur la répartition des critères entre les deux poignets ?* »

Nous avons d’abord cherché à déterminer s’il est possible de répartir les critères équitablement sur les deux poignets. Pour cela, nous avons vérifié que les utilisateurs sont familiers avec l’ensemble des critères de fabrication. Il en ressort que 77,8% sont familiers avec les 5 critères de fabrication proposés, et ils le sont à plus de 92% pour les trois critères géométriques. Ensuite, nous avons proposé aux utilisateurs deux classifications des critères afin de distribuer les 5 critères sur les deux mains de l’utilisateur. La première classification consiste à séparer les critères par nature en mettant d’un côté les critères associés à la géométrie, et de l’autre les critères thermiques. La seconde classification consiste à séparer les critères par l’objet qualifié par le critère en mettant d’un côté les critères associés à la pièce, et de l’autre ceux associés au dépôt de matière.

Parmi ces deux classifications, celle qui classe par nature les phénomènes physiques est retenue par la majorité des utilisateurs (à 66,7%, et à 65% par les utilisateurs experts). Cette classification est jugée comme la plus pertinente, car elle donne la priorité aux phénomènes physiques produits par le procédé de fabrication. Si elle est retenue par les utilisateurs, c’est à cause des contraintes mécaniques à l’origine des défauts de fabrication. Ces utilisateurs classent la température du dépôt de matière (C4) en priorité haute, suivi de la hauteur du dépôt de matière (C2), de la hauteur de la pièce (C1), de la largeur du dépôt de matière (C3), et finalement de la température de la pièce (C5) (Tab. 4.23).

Critères	1 ^{er}	2 ^e	3 ^e	4 ^e	5 ^e
C1	3 (3 experts)	6 (4 experts)	12 (8 experts)	2 (2 experts)	3 (3 experts)
C2	9 (8 experts)	9 (6 experts)	3 (2 experts)	4 (3 experts)	1 (0 expert)
C3	5 (4 experts)	5 (4 experts)	8 (6 experts)	3 (2 experts)	5 (3 experts)
C4	13 (10 experts)	5 (4 experts)	1 (1 expert)	2 (1 expert)	3 (2 experts)
C5	3 (0 expert)	5 (5 experts)	5 (3 experts)	6 (6 expert)	5 (4 experts)

TABLE 4.23: Classement des critères de fabrication par les utilisateurs. Entre parenthèses, le nombre d’experts qui ont fait ce choix de classement.

Il est alors possible d’associer de manière indistincte les critères géométriques sur une main, et les critères thermiques sur l’autre main. En effet, aucune préférence n’a été identifiée quant aux côtés où devrait être affichée chaque nature de critère. Cette distribution permet aussi de donner la priorité à l’identification de la hauteur et la température du dépôt de matière.

4.3.2.2 Une représentation spatialisée

Compte tenu des métaphores qui ont été identifiées, quels items choisir pour optimiser les performances de communication ? Pour rappel, un ensemble de 20 items vibrotactiles a été proposé et évalué dans un mode de présentation séquentielle. Ils ont été définis par l’association d’une position autour du poignet et d’un motif temporel. Les résultats de cette expérimentation perceptuelle sont utilisés pour appuyer la sélection d’items qui serviront à la création d’un ensemble de symboles pour la fabrication additive.

Ces symboles seront combinés en courtes séquences de longueur maximale comprise entre 3 et 5 items pour une durée totale de 1s. En effet, nous envisageons de superposer

au moins deux critères. Cette séquence constitue alors un message vibrotactile qui exprime les différentes situations de fabrication résultant de la combinaison des différents critères de fabrication. Pour permettre la création de ces séquences, il est nécessaire d'inclure un temps mort entre deux items vibrotactiles successifs. Ce temps mort varie d'une technique à une autre, et il dépend des dimensions utilisées pour coder l'information ainsi que de la durée des stimuli composant les items vibrotactiles. Pour définir ce temps mort, il est possible de s'appuyer sur les travaux de Zhao *et al.* [278] et Luzhnica *et al.* [138]. Tous deux implémentent une technique de communication spatio-temporelle basée sur des items d'une durée comprise entre 80 ms et 200 ms. Ils ont évalué qu'une durée de temps mort comprise entre 100 - 200 ms était suffisante pour distinguer deux lettres. Pour ViMAAM, la durée du stimulus le plus long est de 210 ms. Dans le cas le plus défavorable (un message contenant 5 informations), la durée de temps mort sera au minimum de 80 ms. Afin de ne pas réduire les chances de reconnaissance du message, le choix est fait de ne pas créer de messages dans lesquels deux items se succèdent sur le même vibreur. Cela a également l'avantage de réduire les risques de masquage [139], phénomène qui, rappelons-le, empêche la bonne perception des stimuli et nécessite d'augmenter les temps morts entre stimuli pour en limiter l'apparition.

De plus, un temps mort, est aussi nécessaire entre deux messages. Pour la lecture tactile, ce temps mort est généralement plus long que celui entre deux items afin qu'il ne soit pas confondu avec celui présent entre deux lettres. Par exemple, Ranjbar *et al.* [195] font le choix d'une durée de 700 ms contre 300 ms entre deux lettres pour leur version vibrotactile de Morse. Cette durée étant deux fois plus longue, elle est suffisante pour être distinguée du temps mort pris entre deux lettres.

Cependant, la fabrication impose une contrainte temps réel qui ne permet pas d'appliquer un temps mort constant entre deux messages perceptiblement différents du temps mort entre deux items. Pour les messages courts n'exprimant que 1 à 3 critères, l'insertion d'un temps mort suffisamment long ne pose pas de problèmes, car plus de la moitié du temps de présentation total reste disponible, ce qui est au moins 2 fois supérieur au temps mort présent entre deux items. Au-delà de 3 critères, 1 seconde totale de présentation n'est plus suffisante pour créer un temps mort permettant de distinguer deux messages consécutifs. Nous proposons alors de fixer l'ordre de présentation des critères afin de permettre l'identification du début et de la fin d'un message.

Ce choix de conception pourrait aussi avoir pour conséquence d'améliorer la restitution de l'information. Elle permet de réduire considérablement le nombre de combinaisons possibles permettant ainsi à l'utilisateur de mieux anticiper le contenu et la fin du message. Cette remarque s'appuie sur les travaux de Zhao *et al.* [278] qui conseillent de préparer mentalement l'utilisateur en lui montrant la liste des combinaisons possibles d'items qu'il est susceptible de percevoir.

C'est pourquoi nous proposons une attribution spatiale de l'information qui permet d'abord d'imposer spatialement l'ordre de présentation des critères. Ensuite, l'attribution spatialisée permet une représentation symétrique de l'information sur chaque main en s'appuyant sur un découpage de l'information par la nature des critères (géométrique ou thermique). Ce choix de conception doit faciliter l'identification des items vibrotactiles en s'appuyant sur la capacité des utilisateurs à transférer les connaissances perceptuelles d'un item sur une autre partie du corps pour laquelle il ne s'est pas entraîné [139]. En créant cette symétrie, il est alors possible d'imaginer que l'utilisateur pourra capitaliser sur son

entraînement plus rapidement. Finalement, cette spatialisation permet d'implémenter des représentations sélectionnées par les experts de la fabrication additive.

4.3.2.3 La sélection des items vibrotactiles

L'évaluation de la reconnaissance des items vibrotactiles de ViMA a montré que les utilisateurs peuvent identifier facilement au moins 3 positions autour du poignet. Le dessus V_h , le dessous V_b et le côté extérieur V_e sont les trois emplacements pour lesquels les motifs sont les mieux perçus. Pour ces positions, nous utiliserons en priorité les motifs $M5$ ou $M2$ qui sont les motifs les mieux identifiés par les utilisateurs.

Nous proposons de sélectionner les items en fonction de la priorité donnée aux critères de fabrication additive. Les critères C4 et C2 étant respectivement des critères associés à une température et une hauteur, nous proposons de choisir les emplacements V_h et V_b sur chaque main et d'utiliser le motif $M5$. Nous associons alors au-dessus du poignet de la main dominante une augmentation anormale de la hauteur du dépôt de matière et au-dessous du poignet d'y associer une diminution anormale. Nous proposons de manière similaire d'associer la température du dépôt de matière au-dessus et au-dessous du poignet de la main non dominante de l'utilisateur (Tab. 4.24).

Concernant la représentation de la largeur du dépôt de matière (C3), comme il a été observé qu'il était plus difficile pour les utilisateurs d'identifier le côté intérieur (60% de réussite en moyenne), nous avons envisagé d'utiliser les deux mains pour représenter ce critère. Cela permet aussi d'éliminer les risques de confusion lorsque l'utilisateur regarde sa main. Nous décidons donc d'associer une diminution anormale de la largeur du dépôt de matière au côté extérieur du poignet gauche et d'associer à celui du poignet droit une augmentation anormale de la largeur du dépôt de matière. Ces deux états seront aussi représentés en utilisant le motif $M5$ (Tab. 4.24).

Les deux critères (C1) et (C5), respectivement la hauteur et la température de la pièce, sont jugés moins importants que les critères associés au dépôt de matière par les utilisateurs. Pour ces critères, comme le dessus et le dessous du poignet sont déjà utilisés pour représenter la hauteur et la température du dépôt de matière, il nous faut donc recourir à un motif différent pour que l'utilisateur puisse en distinguer l'information.

À partir de cette sélection, nous obtenons un premier ensemble de 10 symboles vibrotactiles, répertoriés dans le tableau 4.24.

Cependant, pour conserver de bonnes performances de communication, il est préférable de limiter à trois le nombre maximum d'items vibrotactiles délivrés en 1 seconde [237]. C'est pourquoi il est nécessaire de superposer deux items lorsque les critères de hauteur de la pièce et du dépôt de matière indiquent un dysfonctionnement simultanément. Pour cela, nous devons recourir à au moins deux motifs supplémentaires pour représenter les 2 états des 2 critères (4 items) et les 8 situations conjuguées.

Nous proposons pour cela d'utiliser des morphes afin de combiner les motifs spatiaux des deux items en un seul. Pour rappel, un morphe résulte de la superposition des caractéristiques perceptuelles de deux items vibrotactiles parents. Le résultat de cette superposition est un nouvel item fils qui est distinguable des deux items parents, mais qui partageant certaines de leurs caractéristiques perceptuelles. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser au moins deux motifs supplémentaires.

L'évaluation perceptuelle des motifs a montré qu'il est difficile pour les utilisateurs de distinguer $M1$, $M3$ et $M5$ dans le mode présentation imposé de 3 items/s. En effet, la

Critères	Etats	Écriture littérale	Items vibrotactiles	Visuels
C1 Hauteur de la pièce	-	$\Delta_{h p}^-$	$(V_b^d; M6)$	
	0	$\Delta_{h p}^0$	\emptyset	
	+	$\Delta_{h p}^+$	$(V_h^d; M6)$	
C2 Hauteur du dépôt de matière	-	$\Delta_{h dm}^-$	$(V_b^d; M5)$	
	0	$\Delta_{h dm}^0$	\emptyset	
	+	$\Delta_{h dm}^+$	$(V_h^d; M6)$	
C3 Largeur du dépôt de matière	-	$\Delta_{l dm}^-$	$(V_e^g; M5)$	
	0	$\Delta_{l dm}^0$	\emptyset	
	+	$\Delta_{l dm}^+$	$(V_e^d; M5)$	
C4 Température du dépôt de matière	-	$\Delta_{T dm}^-$	$(V_b^g; M5)$	
	0	$\Delta_{T dm}^0$	\emptyset	
	+	$\Delta_{T dm}^+$	$(V_h^g; M5)$	
C5 Température de la pièce	-	$\Delta_{T p}^-$	$(V_b^g; M6)$	
	0	$\Delta_{T p}^0$	\emptyset	
	+	$\Delta_{T p}^+$	$(V_h^g; M6)$	

TABLE 4.24: Propositions de 10 symboles vibrotactiles pour la fabrication additive.

durée et l'intensité sont deux dimensions vibrotactiles qui ne sont pas indépendantes et influent toutes deux sur l'intensité ressentie par l'utilisateur. Ainsi à intensité égale, un stimulus plus long est perçu comme plus intense qu'un stimulus plus court. Comme $M1$ et $M3$ partagent tous les deux un niveau d'intensité ou de durée en commun avec $M5$, nous proposons de les remplacer par un nouveau motif $M6$ afin de réduire le risque de confusion pour l'utilisateur. $M6$ est alors un motif composé d'un stimulus simple de durée égale à la moitié de $M5$ et d'intensité faible (la même que $M3$) (Fig. 4.24).

De plus, nous avons observé que les utilisateurs sous-estiment l'intensité des stimuli en confondant $M4$ avec $M2$. Cette erreur est cependant moins fréquente pour des utilisateurs dits experts. Cette confusion peut être alors corrigée en entraînant suffisamment l'utilisateur. C'est pourquoi nous proposons d'associer la hauteur de la pièce avec l'axe vertical du poignet de la main dominante en utilisant le motif $M6$, et la température de la pièce avec l'axe vertical de la main non dominante en utilisant le motif $M6$.

Pour les situations conjuguées, nous proposons d'utiliser le motif $M2$ et $M4$ pour permettre la superposition des motifs $M5$ et $M6$. Ce choix résulte des observations faites

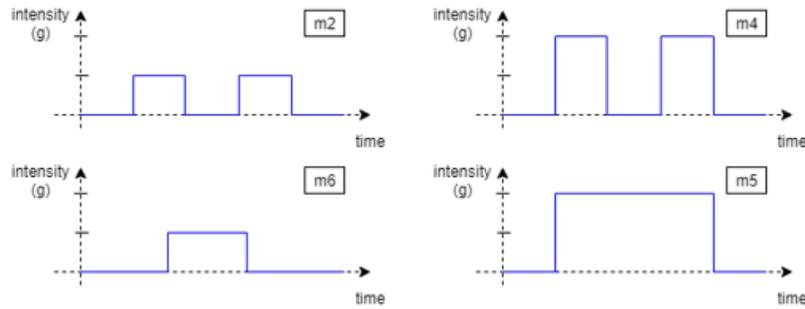


FIGURE 4.24 – Les 4 motifs retenus pour la création des symboles vibrotactiles de ViMAAM.

durant l'évaluation perceptuelle qui a révélé qu'il est plus évident pour les utilisateurs de procéder à une concaténation des stimuli :

- Pour le choix du vibreur ; si les deux symboles partagent le même vibreur, alors ce vibreur est conservé, sinon le vibreur du symbole ayant la priorité est choisi.
- Pour le choix du motif ; si les deux symboles expriment une information de même signe, alors le motif choisi est *M4*, sinon le motif choisi est *M2*.

Ceci nous permet d'obtenir 8 nouveaux symboles décrits dans le tableau 4.25.

4.3.3 Vers une seconde expérimentation

Cette section présente une seconde expérimentation que nous avons préparée, mais que nous n'avons pas eu le temps de réaliser. Nous présentons alors ici les réflexions et hypothèses que nous souhaitons démontrer afin de valider certains choix de conception.

4.3.3.1 Une nouvelle version étendue du prototype de bracelet

La création de cet ensemble de 18 symboles (Tab. 4.24 et Tab. 4.25) pour la fabrication additive a donné lieu à la création d'une nouvelle version du prototype. Ce prototype intègre deux bracelets ViMA pouvant être pilotés par le Raspberry PI3 en séquentiel ou en simultané depuis deux fils d'exécutions séparés. Afin de proposer une version nomade des interfaces de contrôle et de test, nous avons intégré à cette architecture l'utilitaire VNC¹¹ qui permet d'interagir depuis une tablette ou un smartphone, avec les interfaces graphiques proposées par le Raspberry PI3. Cette nouvelle extension nous permet alors de mettre en place un cadre d'évaluation compatible avec le métier d'opérateur et d'évaluer la communication des symboles vibrotactiles, d'abord sous la forme de messages individuels, puis sous la forme d'une ambiance vibrotactile.

Pour cette étude, nous devons implémenter deux techniques de construction des messages vibrotactiles afin de valider les différents concepts dérivés de la lecture tactile.

La première technique est un mode de lecture séquentiel pour lequel les symboles sont présentés un à un. Pour ce mode de présentation, aucun temps mort additionnel ne sera ajouté au temps mort déjà intégré à chaque item.

La seconde technique est un mode de lecture séquentiel compressé. Les symboles sont présentés un à un. Mais ceux qui sont consécutifs et qui partagent de l'information sont fusionnés en un seul symbole.

11. <https://www.realvnc.com/fr/connect/download/viewer/>

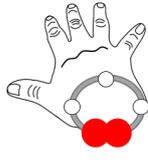
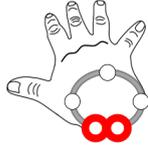
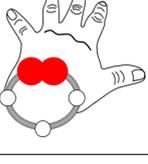
Regroupements des états de critères	Items vibrotactiles (Morphes)	Visuels
$[\Delta_{h dm}^- \Delta_{h p}^-]$	$(V_b^d; M4)$	
$[\Delta_{h dm}^- \Delta_{h p}^+]$	$(V_b^d; M2)$	
$[\Delta_{h dm}^+ \Delta_{h p}^-]$	$(V_h^d; M2)$	
$[\Delta_{h dm}^+ \Delta_{h p}^+]$	$(V_h^d; M4)$	
$[\Delta_{T dm}^- \Delta_{T p}^-]$	$(V_b^g; M4)$	
$[\Delta_{T dm}^- \Delta_{T p}^+]$	$(V_b^g; M2)$	
$[\Delta_{T dm}^+ \Delta_{T p}^-]$	$(V_b^g; M2)$	
$[\Delta_{T dm}^+ \Delta_{T p}^+]$	$(V_h^g; M4)$	

TABLE 4.25: 8 symboles représentant par des morphes le regroupement des états des critères liés à la hauteur et des deux critères liés à la température.

4.3.3.2 Une réflexion sur la validation des messages

En comparant ces deux techniques de présentation, nous souhaitons évaluer le gain d'informations qu'apporte la superposition d'information. C'est-à-dire si les performances

de communication sont différentes lorsque, dans un message, 2 informations sont représentées par un unique item au lieu de deux. Nous faisons alors les hypothèses suivantes :

- L'hypothèse nulle H_{0_1} : il n'existe pas de différence de restitution de l'information entre la méthode de présentation séquentielle et séquentielle compressée.
- L'hypothèse alternative H_1 : il existe une différence de restitutions de l'information pour les messages contenant l'information de plus de 3 critères qui dysfonctionnent.

Pour vérifier cette hypothèse, nous comparerons la reconnaissance d'un ensemble de messages présentés selon des deux techniques de communication. Nous utiliserons un test de Friedman pour comparer l'indice de reconnaissance, noté $\sigma(msg, asw)$, de chaque message. Cet indice est calculé grâce à l'équation 4.3, où d_L représente la distance de Levenshtein entre le message msg émit de longueur $\|msg\|$, et asw la réponse donnée.

$$\sigma(msg, asw) = 1 - \frac{d_L(msg, asw)}{\|msg\|} \quad (4.3)$$

Nous souhaitons ensuite vérifier que l'ordre de présentation des items vibrotactiles facilite la restitution de l'information. Pour cela, nous posons les hypothèses suivantes ;

- L'hypothèse nulle H_{0_2} : il n'existe pas de différence de restitution de l'information entre des messages dont l'ordre est préétabli et des messages dont les items sont présentés dans un ordre aléatoire.
- L'hypothèse alternative H_2 , l'établissement d'un ordre de présentation des items facilite la restitution des messages.

Pour vérifier cette hypothèse, il est nécessaire de créer deux jeux de messages équivalents d'une longueur supérieure à 3 items. Le premier jeu sera constitué de messages utilisant l'ordre préétabli comme défini précédemment. Le second jeu sera composé des mêmes messages, mais en prenant une anagramme de chaque message du premier jeu. Nous comparerons l'indice de reconnaissance des messages pour ces deux jeux comme précédemment.

Ensuite, nous souhaitons nous assurer que le découpage des différents éléments constituant l'information transmise (nature du critère, objet qualifié, et direction du dépassement) est indifféremment reçu par l'utilisateur. Nous posons alors les hypothèses suivantes :

- L'hypothèse nulle H_{0_3} : il n'existe pas de différence de restitution entre les éléments d'information associés à la position et ceux associés au motif.
- L'hypothèse alternative H_3 : les éléments d'information associés à la position sont mieux restitués que ceux associés au motif.

Cette hypothèse peut être vérifiée en comparant, pour chaque information mal identifiée, l'origine de l'erreur. Un test de Friedman permettra de mettre en évidence quels éléments composant l'information de chaque critère sont les moins bien perçus.

Finalement, nous souhaitons vérifier que la communication de l'information entre les deux mains de l'utilisateur est similaire. Dans le cas contraire, il sera nécessaire de reconsidérer la priorité donnée aux différentes informations. Nous posons les hypothèses suivantes :

- L'hypothèse nulle H_{0_4} : il n'existe pas de différence de restitution de l'information entre la main dominante et non-dominante de l'utilisateur.
- L'hypothèse alternative H_4 : il existe une différence entre la main dominante et non dominante de l'utilisateur.

Pour vérifier cette hypothèse, nous proposons de comparer la reconnaissance des items composant les messages en fonction de la main dominante et non-dominante de chaque utilisateur en utilisant un test de Friedman.

Comme pour l'évaluation précédente, nous souhaitons mettre en place une phase d'entraînement pour laisser le temps à l'utilisateur de se familiariser et de mémoriser les différents symboles vibrotactiles. Pour cela, nous souhaitons choisir une méthode d'apprentissage descendante comme celle utilisée par Zhao *et al.* [278]. Elle permet aux utilisateurs d'apprendre les différents symboles indirectement grâce à différentes séquences. Pour faciliter le démarrage de l'entraînement, nous mettons au départ de l'évaluation une description graphique des différents symboles vibrotactiles représentés autour des deux poignets (Fig. 4.25 et Fig. 4.26).

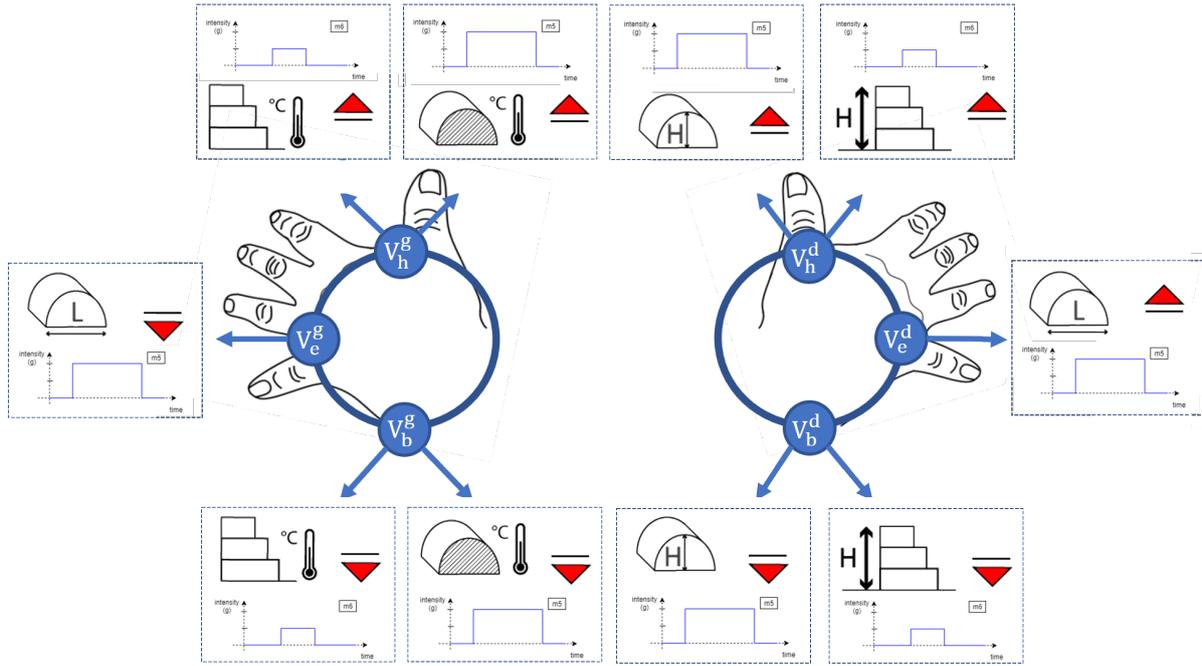


FIGURE 4.25 – Description graphique des symboles représentant les différents états de dysfonctionnement des critères.

Ces diverses hypothèses devront alors être comparées pour des messages préalablement appris par l'utilisateur, mais aussi pour de nouveaux messages qui nous permettront d'évaluer la capacité de l'utilisateur à généraliser les connaissances acquises pour reconnaître ces nouveaux messages [138, 278]. Nous devons donc établir une banque de messages vibrotactiles. Nous proposons alors de créer une banque pour chaque utilisateur qui contient des messages communs à tous les utilisateurs et des messages tirés aléatoirement. Pour les messages communs à l'ensemble des utilisateurs, nous avons défini un ensemble de 9 messages contenant l'information de 3 à 5 critères n'étant plus vérifiés, qui serviront lors de l'apprentissage (Tab. 4.26). À ces messages, il s'ajoute 12 messages tirés aléatoirement dont seuls les messages différents de ces 9 messages seront conservés. Ces messages seront répartis équitablement pour former 3 groupes dont le nombre de critères dysfonctionnant sera respectivement de taille 3, 4 et 5.

Calibration : Le placement des vibreurs de chaque bracelet sera calibré avec une méthode similaire à l'évaluation 1. Cette phase participe à la familiarisation de l'utilisateur avec les différents motifs vibrotactiles utilisés par la suite.

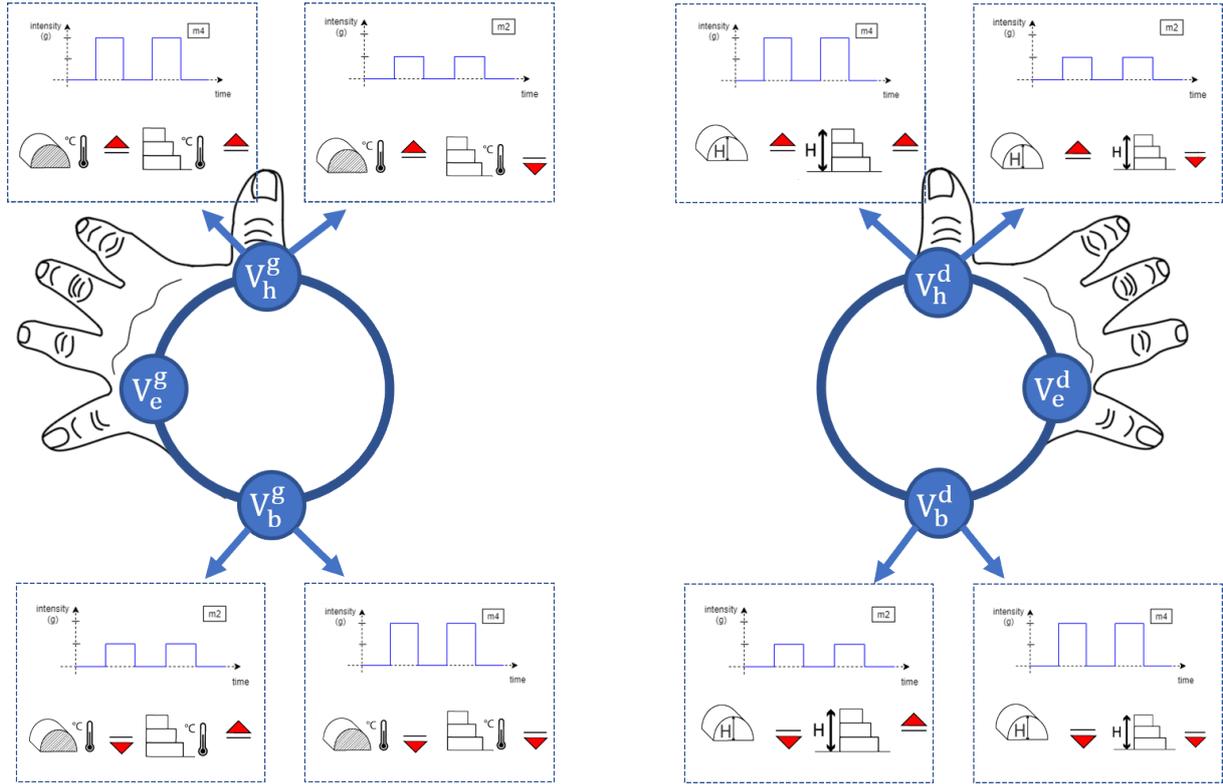


FIGURE 4.26 – Description graphique des symboles représentant les différents regroupements de critères.

	Nombre de critères dysfonctionnant	Messages
Groupe 1	3	$[\Delta_{h p}^0 \Delta_{h dm}^+ \Delta_{l dm}^+ \Delta_{T dm}^+ \Delta_{T p}^0]$ $[\Delta_{h p}^0 \Delta_{h dm}^- \Delta_{l dm}^- \Delta_{T dm}^- \Delta_{T p}^0]$ $[\Delta_{h p}^0 \Delta_{h dm}^+ \Delta_{l dm}^- \Delta_{T dm}^- \Delta_{T p}^0]$
Groupe 2	4	$[\Delta_{h p}^- \Delta_{h dm}^+ \Delta_{l dm}^+ \Delta_{T dm}^- \Delta_{T p}^0]$ $[\Delta_{h p}^+ \Delta_{h dm}^- \Delta_{l dm}^+ \Delta_{T dm}^+ \Delta_{T p}^0]$ $[\Delta_{h p}^+ \Delta_{h dm}^+ \Delta_{l dm}^+ \Delta_{T dm}^+ \Delta_{T p}^0]$
Groupe 3	5	$[\Delta_{h p}^- \Delta_{h dm}^- \Delta_{l dm}^+ \Delta_{T dm}^+ \Delta_{T p}^+]$ $[\Delta_{h p}^- \Delta_{h dm}^- \Delta_{l dm}^+ \Delta_{T dm}^- \Delta_{T p}^+]$ $[\Delta_{h p}^- \Delta_{h dm}^- \Delta_{l dm}^- \Delta_{T dm}^- \Delta_{T p}^+]$

TABLE 4.26: Proposition de 9 messages de fabrication communs à l'ensemble des utilisateurs (en gras, les critères en situation normale). Pour rappel, l'expression symbolique des états de chaque critère est expliquée p.148.

Entraînement : La phase d'entraînement peut alors commencer. Elle est constituée de 3 sous-phases. Pour se familiariser avec les symboles, l'utilisateur démarre par la 1^{re} sous-phase; la découverte, avec l'aide de la représentation graphique. L'utilisateur poursuit avec la 2^e sous-phase : l'apprentissage. Elle se répète au total 3 fois (durée totale de 30 min). Chaque itération débute avec une étape de mémorisation durant laquelle l'utilisateur fait l'apprentissage des 9 messages communs. Ces messages sont envoyés dans un ordre aléatoire dans les deux techniques de présentation, soit au total 15 reconnaissances.

Durant cette première phase, l'utilisateur reçoit une correction après chaque reconnaissance. Enfin, nous terminons par la 3^e sous-phase ; la révision, durant laquelle l'utilisateur peut rejouer les messages qu'il n'a pas réussi à identifier correctement.

Évaluation : Avant de démarrer, l'utilisateur passe un entretien permettant d'avoir son retour sur les deux modes de présentations (minimum 10 min). Cet entretien permet également de faire une pause. Nous commençons ensuite par une évaluation de la reconnaissance des messages vibrotactiles. L'utilisateur doit d'abord reconnaître les 9 messages communs dans les deux modalités de présentation, comme il fait durant l'entraînement. Ensuite, nous proposons d'évaluer la reconnaissance de ces mêmes messages en mélangeant l'ordre des items. Finalement, les utilisateurs devront reconnaître les 12 nouveaux messages dans la modalité séquentielle compressée.

4.3.3.3 Une réflexion sur la validation de l'ambiance tactile

Une fois l'évaluation individuelle des messages vibrotactiles réalisée, il nous faut évaluer la restitution de l'information lorsque ces messages sont présentés sous forme d'une ambiance. Pour cela, nous souhaitons placer l'utilisateur dans un contexte de fabrication additive plastique. Cela pourrait se faire au travers de l'utilisation d'une imprimante industrielle 3D Lynxter¹², machine choisie pour son coût de mise en œuvre et sa répétabilité. L'utilisateur aurait alors à observer la fabrication de différentes éprouvettes (pièce mécanique standardisée pour les essais mécaniques).

Ces éprouvettes seront générées à partir d'un G-Code dans lequel les paramètres sont liés à nos 5 critères de fabrication. Ainsi, la température d'extrusion, la hauteur d'impression ou le débit de matière serviront à simuler des dysfonctionnements de fabrication.

Ce cadre d'expérimentation permettra, au travers de courtes séquences de fabrication répétées, d'évaluer le temps de réaction de l'opérateur suite à la détection d'un dysfonctionnement. Il sera aussi possible d'évaluer la représentation mentale que se construit l'utilisateur du dysfonctionnement. Pour cela, il faudra confronter les messages vibrotactiles avec une analyse visuelle de l'éprouvette.

4.4 Conclusion et perspectives

La première évaluation de ViMA met en évidence une facilité pour les nouveaux utilisateurs à distinguer la position plutôt que le motif de la stimulation émise. Cette différence montre ainsi l'avantage qu'a une technique de représentation basée sur la spatialisation de l'information plutôt que reposant sur la création de motifs vibrotactiles complexes. Néanmoins, ces deux techniques doivent être utilisées de manière complémentaire au vu des problématiques de masquages dont souffre aussi bien la perception des stimuli spatiaux que temporels. Ainsi, pour augmenter les chances que l'information soit reçue par l'utilisateur, il semble pertinent d'organiser spatialement l'information. Ceci permet de réduire les effets de masquage temporel et d'utiliser des morphes pour réduire au maximum la quantité de stimuli émis en un court laps de temps. Cela permet alors d'espacer dans le temps les stimuli pour réduire les phénomènes de masquage spatial.

Le transfert d'information estimé permet d'annoncer qu'un individu, sans entraînement, est capable d'évaluer à minima 5 items sur les 20 proposés. Plus précisément, nous observons que pour la création de ces items, 3 positions sur les 4 proposées par ViMA

12. <https://lynxter.fr/>

peuvent être retenues et de préférence entre 1 et 2 motifs parmi les motifs proposés. Ce transfert d'information peut être amélioré en opérant quelques changements de conception. Tout d'abord, il est nécessaire de limiter le nombre de dimensions par motifs et leur complexité si la durée de présentation des items vibrotactiles n'est pas suffisamment longue. Il s'agira ensuite de mieux préparer l'utilisateur à la complexité de ce nouvel exercice qu'est la reconnaissance de messages vibrotactiles. Pour cela, une méthode d'entraînement doit être implémentée durant l'intégration de ce type d'interface. Le travail de Luzhnica *et al.* [140] sur les techniques d'entraînement ludique et une augmentation progressive de la complexité des messages.

Nous avons en effet observé beaucoup de confusion pour identifier l'intensité des stimuli. Notamment, le choix d'utiliser séparément la durée et l'intensité pour constituer des motifs n'est pas pertinent pour ce cadre d'application, car la durée de présentation n'est pas suffisante pour permettre aux utilisateurs de faire facilement la différence. Ce choix n'est d'autant pas adéquat s'il se fait pour des actionneurs ne permettant pas de produire facilement des stimuli dont la fréquence se trouve dans une bande de fréquence produisant le même ressenti tactile. Il serait donc pertinent, pour des applications exigeant une temporalité similaire, d'opter pour une approche qui permet la production de motifs basés sur la concaténation d'un ensemble de stimuli distinguables par leur durée, intensité et fréquence. Cette approche permettrait de diminuer le risque de confusion. Ce risque de confusion doit aussi être pris en compte durant l'entraînement. En effet, pour l'ensemble des utilisateurs, l'évaluation n°1 constituait pour eux la première expérience d'utilisation d'un dispositif de communication vibrotactile. La tâche d'identification peut alors devenir rapidement fatigante, entraînant une limite mentale à leur progression. Cette limite s'est d'ailleurs matérialisée par une baisse de la reconnaissance moyenne des motifs et des items aux 5 entraînements. Ainsi, il n'est pas étonnant que certains utilisateurs montrent des difficultés à retenir sur un intervalle de temps de l'ordre inférieur à 100 ms, les différences perceptuelles des dimensions constituant les motifs pour 4 emplacements distincts.

C'est pourquoi, dans un cadre de tests plus avancés, il pourrait être intéressant d'augmenter la complexité du dispositif vibrotactile progressivement afin de faciliter le travail de mémorisation de l'utilisateur des différences perceptuelles qui existent entre les items. Pour cela, il faudrait réduire le nombre d'items de départ et en rajouter lorsque l'utilisateur ne fait plus d'erreurs. Une seconde approche pour compléter la première est de passer par un processus de personnalisation pour chaque individu des différents niveaux de chaque dimension, et ce à chaque position. Cette approche nécessite alors une étape de calibration du dispositif que chaque utilisateur doit réaliser la première fois qu'il utilise le dispositif. Cette approche systématique est cependant contraignante.

Chapitre 5

Conclusion

Nous avons montré que la fabrication industrielle entame depuis quelques années un changement dans sa manière de produire. Motivé par des enjeux économiques et écologiques, le développement de nouvelles techniques de fabrication permet d'envisager la production de produits pouvant répondre aux besoins spécifiques des clients. Ceci marque l'abandon progressif d'une fabrication standardisée de produits pour la fabrication de produits personnalisés à la demande. Ce changement est soutenu par l'essor de la fabrication additive qui séduit de nombreux secteurs d'activité en proposant une grande liberté de formes et de matériaux. Ce procédé, dont l'utilisation a longtemps servi à des fins de conception, est maintenant utilisé pour la fabrication de pièces de service. Malgré une mise en œuvre automatisée de ces procédés par une Chaîne Numérique spécifique au procédé utilisé, il est impossible de garantir une fabrication sans erreurs. Or, la mise en œuvre actuelle ne facilite pas la modification de la fabrication sans une réexécution complète de la fabrication. Ce cadre de fabrication est en contradiction avec le souhait de proposer une fabrication à la demande, car faute de pouvoir répondre in-situ à l'apparition d'un aléa, il est nécessaire de réitérer le processus de fabrication.

L'évolution des techniques d'interaction proposées en Interaction Humain-Machine, nous a permis de faire évoluer la Chaîne Numérique en intégrant l'humain dans le processus de fabrication. Il en résulte notre proposition d'une Chaîne Numérique Interactive.

Les premiers travaux rapportés dans ce mémoire ont porté sur une analyse des contributions de la Fabrication Interactive. Nous avons constaté que les interactions proposées participent principalement à une amélioration du processus de conception et non du processus de fabrication. En effet l'impression 3D combinée à la réalité augmentée et à l'imagerie 3D, sert principalement à assurer une continuité entre le réel et le virtuel. Elle sert en effet à la production d'un artefact de conception (géométrie intermédiaire) qui supporte une interaction physique. Cet artefact est systématiquement abandonné pour une fabrication conventionnelle de la géométrie produite. Dans les rares cas où l'objet produit constitue l'objet final, nous constatons que l'interaction ne permet d'agir que sur la géométrie alors que les procédés de fabrication additive architecturent aussi un matériau. Les erreurs de mise en œuvre produites par l'utilisateur ou par le procédé sont dans les exemples de la littérature associés à l'acte de création et prennent une dimension artistique.

Afin de proposer un cadre compatible à nos travaux, nous proposons une boucle d'interaction humaine en trois étapes venant s'imbriquer durant la fabrication. Cette boucle prévoit deux mises en œuvre différentes du procédé pour une modification localisée de la stratégie de fabrication automatisée (pp 56-58). La première approche consiste en une mise en œuvre de l'outil sous assistance robotisée pour réaliser des reprises de la géométrie

en cas d'erreurs ou lors du placement d'inserts dans la géométrie. La seconde approche consiste à modifier localement la stratégie de fabrication par la modification du programme machine. Cette approche est envisagée pour des modifications géométriques plus complexes comme la modification d'une surface fonctionnelle ou la correction de défauts couvrant une région importante. Mais, pour que ces deux méthodes puissent être mises en place, il est nécessaire que l'opérateur ait connaissance en temps réel de la nature du défaut apparu et soit capable de proposer une correction qui produise un dépôt de matière qualitativement meilleure.

La création d'indices sensoriels pour le suivi des procédés de fabrication

Les opérateurs de machines-outils constituent traditionnellement le premier acteur de contrôle et de suivi de la fabrication. Ceux-ci ont développé une expertise sensorielle avec la pratique, qui leur permet, par exemple, grâce aux sons et à la vue de détecter le dysfonctionnement de leurs machines (Fig. 2.28). Nous proposons alors d'émuler une expérience de perception sensorielle comparable, pour permettre la détection des dysfonctionnements du procédé en temps réel et en mobilité. Alors que l'environnement de l'utilisateur est déjà saturé de stimuli visuels et sonores, nous nous sommes intéressés aux interfaces vibrotactiles qui permettent une communication saillante de l'information (Chapitre 3, Section 3.1.3).

Nous nous sommes plus intéressés à la création d'un outil pour aider à la conception de dispositifs de communication vibrotactile. L'exploration des différentes techniques de communication vibrotactile a conduit à la conception et implémentation d'un outil d'aide à la conception appelé TacTool. Cet outil est une application web qui permet l'exploration dynamique de 181 recommandations (Annexe A) au travers de la combinaison de 21 caractéristiques (Tab. 3.1.4, p.102) décrivant tous les aspects de ce type d'interface. La formalisation de cet outil met en évidence une diversité de techniques vibrotactiles permettant de communiquer une information basée sur la reconnaissance des propriétés vibratoires, temporelles et spatiales des stimuli vibrotactiles. Cependant leurs performances sont très inégales comme le met par exemple en évidence l'estimation du transfert d'informations pour quelques-unes d'entre elles.

Une perspective intéressante pour TacTool est d'étendre son fonctionnement à différentes modalités tactiles passives comme la thermoception. L'extension de TacTool à d'autres modalités serait bénéfique en permettant de proposer des interfaces tactiles avec un plus large spectre de sensations tactiles. En effet, Shim *et al.* parlent de « sensations tactiles colorées » pour décrire le nuancier de sensation que permet l'hybridation des sensations tactiles. Il serait alors possible sur le modèle des stimuli vibratoires d'étendre TacTool aux autres stimuli tactiles ce qui serait facilité par le partage avec les stimuli vibratoires de propriétés analogues. L'ouverture à d'autres modalités offre de nouvelles perspectives pouvant faciliter la communication [61], mais qui apportent aussi de nouvelles problématiques liées à leurs interactions perceptuelles [221].

L'apprentissage est néanmoins un aspect problématique du déploiement des techniques de tactilisation vibrotactile. En effet, c'est une technique de représentation de l'information qui est souvent abstraite reposant souvent sur un système codé ou un langage. Ces techniques requièrent alors que les utilisateurs se familiarisent avec la reconnaissance des stimuli, mais aussi de mémoriser les associations d'information. Cet apprentissage, qui parfois est intensif, devient alors une partie importante dans la maîtrise de ce type d'interfaces de communication. Cependant, la mise en place d'un processus d'apprentissage

n'est pas toujours compatible avec la tâche dans laquelle ces interfaces sont déployées. Pour en évaluer la pertinence, il est donc nécessaire d'évaluer le rapport coût-bénéfice pour l'utilisateur. Malgré tout, certaines mesures peuvent être prises pour faciliter la maîtrise des interfaces vibrotactiles. D'abord, il est possible de rendre ces interfaces plus intuitives en donnant du sens aux stimuli vibrotactiles en s'inspirant par exemple des stéréotypes de l'utilisateur, ensuite, en intégrant quand cela est possible des mécanismes d'apprentissage pouvant s'intégrer sur la durée. Dans ce dernier cas, il s'agit de développer des techniques d'apprentissage passif, par exemple sous la forme de mini jeux, qui peuvent être utilisés pour augmenter progressivement par la pratique la complexité des interfaces vibrotactiles.

ViMAAM : une ambiance vibrotactile pour le suivi de la fabrication additive

Finalement, TacTool a supporté notre processus de conception pour la création d'un dispositif vibrotactile permettant la création d'une ambiance pour le suivi d'un procédé de fabrication automatisée. Les recommandations émises par TacTool ont conduit à la définition de cette ambiance pour la modalité vibrotactile qui se caractérise par la distinction de deux types de situations de fonctionnement pour les procédés automatisés : une situation de fonctionnement normal prévu par l'automatisation et plusieurs situations de dysfonctionnement échappant au contrôle de l'automatisation. Durant la situation normale, nous considérons l'emploi de mode de communication vibrotactile périphérique pour limiter au maximum la prise d'attention de l'utilisateur. Ce mode de communication recourt à des stimuli de faible intensité et très espacés dans le temps afin de limiter la durée totale de stimulation. Ce mode de communication permet ainsi une meilleure gestion de confort de l'utilisateur. En revanche, nous avons fait le choix d'un mode de communication plus intrusif avec des niveaux d'intensité facilement perceptible et une vitesse de présentation de l'information beaucoup plus rapide. Ce changement de mode de communication est la première caractéristique de cette ambiance vibrotactile et permet d'alerter l'utilisateur sur l'apparition d'un dysfonctionnement. Afin de ne pas simplement alerter l'utilisateur, mais aussi de le notifier de la nature du dysfonctionnement, le second mode de communication se caractérise par la présentation répétée d'un message vibrotactile formé par une courte séquence d'items vibrotactiles. Ce message qui constitue la seconde caractéristique de notre ambiance code alors l'information de plusieurs critères de fabrication pour décrire la nature du dysfonctionnement à l'utilisateur. La répétition périodique du message devant alors permettre une meilleure prise de l'information.

L'implémentation de cette ambiance vibrotactile a donné lieu à la création d'un bracelet vibrotactile appelé ViMA (Vibrotactile Monitoring Armband) permettant de générer un ensemble de 20 items vibrotactiles. Ces items sont construits à partir d'un motif temporel combinant différents niveaux d'intensité, de durée ou de rythme, ainsi qu'une position parmi les 4 proposées autour du poignet. La conception de ce bracelet a permis d'évaluer la capacité de ces items à être reconnus lorsqu'ils sont présentés au sein d'une séquence 1 s en suivant un paradigme de présentation AXB. Cette évaluation montre qu'un utilisateur néophyte est capable de distinguer facilement au minimum 5 des 20 items proposés. Elle met aussi en évidence l'avantage dont bénéficient les utilisateurs pratiquant un instrument de musique pour la reconnaissance des motifs temporels. La nette différence de performance de certains individus est encourageante et permet d'envisager une progression de l'ensemble des utilisateurs avec suffisamment de pratique. Nous recommandons alors pour de futures itérations de ce ViMA de limiter à 3 le nombre de positions autour du poignet

et de favoriser l'utilisation de motifs temporels basés sur le rythme. Nous conseillons de plus de combiner les différents niveaux de durée et d'intensité afin de limiter l'interaction entre ces deux dimensions qui sont la cause principale des erreurs de reconnaissance de ces items vibrotactiles.

À partir de ViMA, nous nous sommes intéressés à la conception d'une interface pour le suivi des procédés de fabrication additive. Cette interface appelée ViMAAM est conçue pour communiquer à son utilisateur 5 critères de fabrication nécessaires à la compréhension des phénomènes mis en jeu par les procédés de fabrication additive métallique béton et plastique, dont la dérive se traduit par l'apparition de défauts de fabrication. La conception de ViMAAM s'est concentrée sur la création d'un ensemble de symboles vibrotactiles permettant une représentation explicite d'un état haut et bas pour chacun de ces 5 critères afin de faciliter la communication. C'est-à-dire que nous avons cherché à établir des associations entre les items vibrotactiles évalués et les 10 informations devant être communiquées qui soient un compromis entre le sens et la reconnaissance des items. En combinant l'évaluation de ViMA et une enquête réalisée auprès de 27 experts de la fabrication additive cherchant à déterminer un placement des critères autour du poignet qui fasse sens pour les utilisateurs, nous avons défini un total de 18 symboles vibrotactiles nécessitant l'utilisation d'une paire de ViMA pour informer l'utilisateur sur les dysfonctionnements du procédé de fabrication additive. Ces 18 symboles reposent sur la création d'un nouveau motif temporel combinant deux motifs temporels précédemment évalués et sur la superposition de deux items par un morphe afin de faciliter la communication.

Les limitations et les perspectives

Il reste à valider la conception de ViMAAM en laboratoire et in-situ. Pour cela, il est nécessaire de vérifier individuellement l'identification de ces symboles lorsqu'ils sont présentés à l'utilisateur pour former les messages décrivant les dysfonctionnements. Cette vérification doit tenir compte des hypothèses formulées sur l'impact de la superposition de deux items consécutifs partageant de l'information et sur l'ordre établi de présentation des critères dans les messages vibrotactiles. Il sera ensuite nécessaire de vérifier que l'utilisateur est toujours capable de récupérer l'information lorsque ces messages sont combinés pour créer une ambiance tactile. L'évaluation de cette ambiance devra à terme être réalisée in-situ en plaçant l'utilisateur face à face avec la réalisation d'éprouvettes en fabrication additive. La confrontation de l'utilisateur avec chaque éprouvette permettra de recueillir le ressenti de l'utilisateur et d'envisager des pistes d'amélioration pour ViMAAM.

La finalisation de ViMAAM peut alors permettre d'étudier les apports d'un tel dispositif de communication lors d'une mise en œuvre interactive du procédé suivant les principes de la Fabrication Interactive. Cette évaluation demande néanmoins le développement par exemple d'une technique de fabrication par action indirecte (p.57) rapportée dans ce mémoire. L'utilité de ViMAAM pourrait être démontrée dans ce contexte en positionnant l'utilisateur dans un cadre de fabrication où la vitesse du procédé est maîtrisée permettant d'anticiper l'apparition des défauts durant une opération de reprise de la pièce mécanique en fabrication. Ce cadre de fabrication permet de s'assurer de la compatibilité de ce type de communication couplé à un dispositif de réalité augmentée visuelle qui assure aujourd'hui la continuité entre virtuel et réel au sein de la cellule de fabrication robotisée. Par ailleurs, c'est dans ce cadre que la multimodalité est intéressante. Une comparaison de la sonification proposée, par exemple, par Poret *et al.* [188] avec la tactilisation permettrait de déterminer les avantages et inconvénients des deux techniques.

La validation expérimentale en laboratoire pourrait alors permettre une étude pilote en milieu industriel. Par ailleurs, il conviendrait d'étudier la généralisation de ce dispositif au contrôle d'autres procédés automatisés. L'utilisation de systèmes vibrotactiles simples et aisés à porter peut devenir une nouvelle opportunité de démocratisation des concepts de la réalité augmentée, alors que les autres médias peinent à s'implanter.

Annexe A

La liste des recommandations de TacTool

- (R1) Without training, an average user can absolutely discriminate up to 4 levels of intensity. [Brewster et al, 2004] [Noticeable] [intensity level :Multi] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [finger]
- (R2) Using of multiple tactors equally spaced around the wrist and forearm, an average user can accurately localize :
 - 3 tactors with 94.9% success rate ;
 - 4 tactors with 88.9% success rate ;
 - 5 tactors with 81.9% success rate ;
 - 6 tactors with 69.9% success rate.[Carcedo et al, 2016] [radial/longitudinal] [spatial patterns] [Noticeable] [forearm]
- (R3) Using multiple tactors equally spaced around the belt area, an average user can accurately localize :
 - 6 tactors with 97% success rate ;
 - 8 tactors with 93% success rate ;
 - 12 tactors with 76% success rate.[Cholewiak et al, 2004] [radial/longitudinal] [spatial patterns]
- (R4) Localization of a stimulus is significantly better on referent body sites : such as joints and proprioceptive body locations (e.g. navel). It is advised to choose in priority these sites to transmit tactile cues. Spatial localization of stimuli improves when tactors are placed close to these sites. [Cholewiak et al, 2004] [spatial patterns] [Noticeable]
- (R5) At least an increase or a decrease of around 20% to 40% in intensity is needed between two levels. It is advised to make a pairwise evaluation of the chosen levels to verify that users can reliably feel a difference. [Israr et al, 2006] [radial/longitudinal] [Noticeable] [intensity level :Multi] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [finger]
- (R6) Training and familiarization with a set of vibrotactile items can increase identification success rate. Training effects can remain after a long duration of inactivity. (For example : an improvement from 80% to 86% have been observed two weeks later.) [Enriquez et al, 2008] [Noticeable]

- (R7) It is often difficult to create meaningful association between vibrotactile items and information. Associations that share meanings acknowledged from the majority may improve the learnability of a vibrotactile language. Yet, random association can also perform well for small set of vibrotactile items since users seem to also make their own meaningful associations. It can then be advised to allow users to compose their own associations. [Enriquez et al, 2008] [Symbolic] [Noticeable]
- (R8) While designing a set of vibrotactile items, designers must pay attention to interactions between coding dimensions. Example : Rugosity/Intensity, Rhythm and Frequency, Frequency and Perceived Intensity... It is advised to eliminate vibrotactile items that procure similar tactile sensations. Items must be filtered to provide a set with enough perceptual distance between items. [Ternes et al, 2008] [ordinal set :Over 4] [Noticeable]
- (R9) While designing a large set of vibrotactile items, rhythm is an efficient coding dimension. To improve identification rate, patterns used to produce rhythm should be repeated to compose longer unique items. Designers must also analyze perceptual similarity between patterns. For example : pattern based on rotational permutation can be confused once repeated. Rhythm-based patterns can be improved by using stimuli with various intensity, duration and frequency. However, it requires for the designer to evaluate the perceptual distance between the different patterns (e.g. using MDS technique). [Ternes et al, 2008] [temporal patterns] [rhythm :Multi] [Symbolic] [symbolic set] [spatial patterns] [Noticeable]
- (R10) Rhythm is an efficient dimension to produce metaphors that can express the rise or decrease in magnitude or to express the urgency. [Gomes et al, 2018] [rhythm :Multi] [discrete] [Noticeable] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]
- (R11) Intensity is an efficient dimension to produce metaphors that express rise and decrease in magnitude or to express urgency. [Gomes et al, 2018] [Ordinal] [ordinal set :2-4] [Noticeable] [intensity level :Multi] [waveform :Mono]
- (R12) Duration is an efficient coding dimension to produce metaphors that express rise and decrease in magnitude or to express urgency. [Gomes et al, 2018] [duration :Multi] [Ordinal] [ordinal set :2-4] [Noticeable] [waveform :Mono]
- (R13) When several coding dimensions are combined to generate large set of vibrotactile items, it is advised to use up to 2 levels of duration. [Oakley et al, 2006] [duration :Multi] [Symbolic] [symbolic set] [Noticeable] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]
- (R14) Creating artificial anchor points can improve absolute localization of stimuli especially at locations where identification rate is poorer. For example : on the waist side. Such artificial anchors can be designed using a stimulus with unique sensations at these locations. [Brill et al, 2007] [spatial patterns] [Noticeable]
- (R15) Meaningful association of vibrotactile items can improve communication while the user is concurrently carrying tasks. [Chan et al, 2005] [radial/longitudinal] [Symbolic] [sequential] [discrete] [Noticeable]

- (R16) Using a matrix of tactors with a spacing distance that is closed to the user spatial acuity, it is preferable to use spatiotemporal motifs (such as apparent motion) than asking users to accurately locate a stimulus. [Novich et al, 2015] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal] [Symbolic] [spatial patterns] [Noticeable] [intensity level :Mono] [80-300Hz]
- (R17) To successfully perceive two distinct vibrotactile stimuli, it is advised to use a distance larger than 6 cm between each tactor on the back. [Novich et al, 2015] [radial/longitudinal,matrix] [spatial patterns] [Noticeable] [back]
- (R18) Stimuli delivered at multiple location can be used to communicate two information at the time. However, user usually show difficulties to decode more than two vibrotactile patterns or stimuli delivered simultanely. Yet it can be efficiently done by using two tactile illusions with enough space in between (At least 6 cm on the back). [Novich et al, 2015] [temporal patterns] [radial/longitudinal] [Symbolic] [spatial patterns] [apparent location x motion] [Noticeable]
- (R19) Identification of apparent motion strokes or swaps vary depending of their direction. Radial apparent motion on the forearm for example are easier to detect than longitudinal or diagonal motions. By consequence, it is easier to identify swap's locations on the radial direction than in the longitudinal direction. [Liao et al, 2015] [temporal patterns] [duration :Mono] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal] [Symbolic] [spatial patterns] [apparent location x motion] [Noticeable] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [forearm]
- (R20) To perceive two apparent motions swap in opposite direction distinctively, spacing between the two groups of tactors used to render the illusion must be larger than the user's spatial acuity. For example, with spacing of 6 cm on the back the success rate is over 80%. [Novich et al, 2015] [temporal patterns] [duration :Mono] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal] [Symbolic] [spatial patterns] [apparent location x motion] [Noticeable] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [back]
- (R21) To successfully distinguish two stimuli on the back of the hand (over 80% success rate), a spacing of at least 5 to 6 cm is needed. [Cipriani et al, 2012] [radial/longitudinal,matrix] [spatial patterns] [Noticeable] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [hand]
- (R22) Training has a significant effect on reducing intensity difference thresholds (or JND) for low and high frequencies. It might be possible to increase the number of intensity levels overtime for trained users. [Gescheider et al , 2009] [Noticeable] [intensity level :Multi] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]
- (R23) Combining several levels of frequency and intensity allows to augment the number of levels users can discriminate (around 8 levels). This is possible to achieve with technologies of tactors that allow to separately control of amplitude and frequency. [Sherrick et al, 1985] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal] [Ordinal] [ordinal set :Over 4] [Noticeable] [intensity level :Multi] [frequency level :Multi] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]

- (R24) Stimuli with an intensity higher than 55 dB over the detection threshold grow rapidly uncomfortable and produce painful sensations such itching or biting sensations. [Verillo et al, 1992] [Uncomfortable]
- (R25) Using multiple levels of frequency and intensity to design an ordinal scale, designer should be careful of subjective perception of each level. In effect, subjective intensity depends on amplitude and frequency. Smaller amplitudes are needed at higher intensities to equal same subjective intensity at lower frequencies. The use of perceptual intensity contour plots or pairwise comparisons must be used to design different levels. [Verillo et al, 1992] [Ordinal] [ordinal set :Over 4] [Noticeable] [intensity level :Multi] [frequency level :Multi] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]
- (R26) When combining levels of frequency and intensity makes, it is difficult for users to separately identify levels of frequency and intensity. Resulting stimuli should be either designed for users to identify the intensity level of the frequency level of the signal. [Cipriani et al, 2012] [Noticeable] [intensity level :Multi] [frequency level :Multi] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]
- (R27) Using multiple levels of frequency, untrained users can absolutely identify between 3 to 5 levels of frequency should be used at a maximum over the range of 0-300 Hz. The average IT that has been compute for frequency discrimination ranges from 1.9 to 2.4bits. Average estimate IT using absolute identification frequency levels for trained users reach 2.2 to 3.7 bits with trained users. [Sherrick et al, 1985] [Noticeable] [frequency level :Multi] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]
- (R28) A larger area of contact increases the subjective intensity of a stimulus and it can improve the number of levels of intensity a user can relatively perceive. This statement holds for frequency at least higher than 80Hz. For lower frequency (below 40Hz), no significant effects are observed. Tactors contact area with the skin should be kept constant during stimuli presentation to limit undesired changes in perception. [Verillo et al, 1992] [Noticeable]
- (R29) The longer a stimulus is kept on, the strong its perceived due to temporal summation. Only apply to stimuli of frequency higher than 40 Hz and the effect is perceptible for stimuli up to 300 ms after what the energy integration reaches its maximum. User may rapidly feels discomfort or pain if vibrations are applied for a long duration. [Verillo et al, 1992] [duration :Multi] [Noticeable] [intensity level :Multi]
- (R30) Warning : User may perceive a difference in intensity for a same stimulus at different locations of the body due to differences in skin structure and sensitivity. It is then advised to reduce the number of intensity and frequency levels when you want to use multiple body parts. [Geldard et al, 1960] [multi bodypart] [spatial patterns] [Noticeable]
- (R31) Warning : Simultaneous activation of multiple factors close to each other results in an augmentation of the perceived intensity of the resulting stimulation. [Oakley et al, 2006] [temporal patterns] [radial/longitudinal,matrix] [spatial patterns] [spatial amplification] [Noticeable]

- (R32) Untrained users can perceive around 10 to 15 relative change in frequency in the range of 0 to 300 Hz. [Sherrick et al, 1985] [Ordinal] [Noticeable] [frequency level :Multi] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]
- (R33) Instead to perceive absolute levels of intensity or frequency, users are also sensitive to the direction of the change in intensity or frequency of a stimulus. More studies must be done to determinate if users are able to identify the amplitude of the change. Users show a good recognition rate for vibrotactile items using simultaneous rise and fall in intensity and frequency, for a signal going from 50-200 Hz with change in intensity higher than 10 dB SL. [Summers et al, 1994] [temporal patterns] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal] [Ordinal] [sequential] [Noticeable] [waveform :Mono]
- (R34) To improve spatial patterns identification, a delay should be added between the activation of factors involved in spatial patterns using more than 3 factors simultaneously. [Geldard et al, 1960] [spatial patterns] [Noticeable] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]
- (R35) Users are able to distinguish up to 15 different levels of intensity when relatively perceived. But it remains difficult for users to have an absolute identification of more than 4 levels of intensity. [Geldard et al, 1960] [Ordinal] [Noticeable] [intensity level :Multi] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]
- (R36) Warning : Designers must be cautious with maintaining optimal skin contact. Body motions (breathing, muscle contractions) can provoke change in factor's contact with the user's skin. It results in poorer perception of stimuli making it more difficult for users to identify complex vibrotactile items design from multiple coding dimensions. [Geldard et al, 1960] [Noticeable]
- (R37) For vibrotactile items with duration varying between 0.1 s and 2.0 s, an average user can distinguish at a maximum about 25 changes in duration level with a difference threshold going from 0.05s to 0.15s. But it gets difficult for users to have an absolute identification of these 25 levels. [Geldard et al, 1960] [duration :Multi] [Ordinal] [Noticeable] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]
- (R38) At least an increase or a decrease of around 20% to 40% is needed between two levels of frequency. It is advised to make a pairwise comparison of the chosen levels to verify that users are able to reliably feel a difference[Goff et al, 1967] [Noticeable] [frequency level :Multi] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]
- (R39) For lower subjective intensities, frequency differences threshold is usually smaller. Identification of a several levels of frequency is then easier for smaller intensity. [Goff et al, 1967] [Noticeable] [frequency level :Multi] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]
- (R40) Using pulsated stimulation, an increase or a decrease of 15 to 30% of the gap duration between stimuli burst is needed for users to perceive a change in rhythm, for stimuli with a vibration frequency in the range of 100-300Hz. While it can be lower than 10% for frequency lower than 20 Hz. [Rotenberg et al, 1977] [temporal patterns] [rhythm :Multi] [Noticeable] [waveform :Mono] [hand]

- (R41) Warning : Vibration rugosity, intensity and frequency are dependent dimensions. When rugosity is produced by modulating the amplitude by lower frequency signals, users cannot identify different levels of frequency or intensity. It is then difficult to code information simultaneously with both dimensions. [Brown et al, 2006] [Noticeable] [intensity level :Mono] [frequency level :Mono] [waveform :Multi] [rugosity :Multi]
- (R42) Multiple levels of roughness can be generated by using different waveforms. Square waves feel for example rougher than sine waves. [Jones et al,2018] [Noticeable] [intensity level :Mono] [frequency level :Mono] [waveform :Multi] [rugosity :Multi] [finger] [palm]
- (R43) Different levels of roughness can be achieved by modulating in amplitude a sine wave vibration signal. The larger is the difference in frequency between the main and modulating signal the rougher feels the resulting signal. [Weisenberger, 1986] [Noticeable] [intensity level :Mono] [frequency level :Mono] [waveform :Multi] [rugosity :Multi]
- (R44) Untrained users are expected to identify absolutely between 3 to 5 levels of duration reliably. Ideally, the different levels of duration should be equally spaced other the chosen range. [Güçlü et al, 2011] [duration :Multi] [ordinal set :2-4] [Noticeable] [rugosity :Mono]
- (R45) Warning : spatial discrimination describes the capacity to distinguish two spatially close stimuli. Spatial discrimination varies from one body part to another. However, it is usually larger than the estimation made by two-points esthesiometer measurements due to conduction of vibration that trigger nerves endings on the outbound area of the tactor. [Geldard et al, 1960] [radial/longitudinal,matrix] [spatial patterns] [Noticeable]
- (R46) Gap or break between two vibrotactile stimuli can be as small as 5 ms. However, designers must consider the rising and falling time of their tactors. ERM tactors have for example slow rising time (over 25 ms). [Gescheider et al , 2009] [temporal patterns] [rhythm :Multi] [Noticeable] [waveform :Mono]
- (R47) On the thenar eminence, a gap or break of 10 ms between two sine wave stimuli has a detection rate of approximately 75% at 25 dB SL. Meanwhile a 100 ms gap allows for systematic identification. [Van Doren et al, 1990] [temporal patterns] [rhythm :Multi] [sequential] [Noticeable] [palm]
- (R48) Users can precisely count the number of pulses that are presented to them in a short interval of time smaller than 1 sec if it does not exceed 5 pulses. [Sherrick et al, 1982] [temporal patterns] [radial/longitudinal] [sequential] [discrete] [Noticeable] [intensity level :Mono] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]
- (R49) When translating melody into a vibrotactile signal, two aspects of the melody are particularly perceived by users : rhythm and roughness of the vibration (e.g. some melodies feel sharper than others). [van Erp et al, 2003] [temporal patterns] [radial/longitudinal] [Noticeable] [intensity level :Mono]

- (R50) Using a longitudinal line of tactors on the forearm, the localization of a stimulus is more accurate close to joints (wrist and elbow). [Cholewiak et al, 2003] [radial/longitudinal] [spatial patterns] [Noticeable] [forearm]
- (R51) Warning : Using multiple tactors on the same body site with enough spacing to be distinguished, it is not wise to use every possible combination of tactors, relying only on the binary state of each tactor (i.e. ON or OFF). [Geldard et al, 1960] [radial/longitudinal,matrix] [spatial patterns] [Noticeable]
- (R52) Warning : Combining multiple dimensions to create vibrotactile items (for example a combination of intensity, frequency), the number of pieces of information that are communicable is smaller than the product of the quantity of information that each dimension is able to transmit separately. [Rotenberg et al, 1977] [intensity level :Multi] [frequency level :Multi] [rhythm :Multi] [duration :Multi] [Noticeable]
- (R53) Stimulations are expected to remain comfortable in between 0 to 25 dB above the intensity detection threshold. Using stimulation above 40 to 55 dB above the intensity detection threshold can move from uncomfortable to painful. [Miwa et al, 1974] [Noticeable]
- (R54) Warning : Vibrations with an intensity higher than 2.5 m/s² at a specific body site must be limited in time. Exposure should not exceed for this intensity 8h a day. The exposure duration is smaller for higher intensity. Long exposure to vibration can provoke traumatic consequence (for example chronic pain, loss of sensations ...). [ISO 10816, 2018] [Noticeable]
- (R55) Using a longitudinal line of tactors on the arm, spatial identification of stimulation is the more accurate close to joints (shoulder and elbow). [Cholewiak et al, 2003] [radial/longitudinal] [spatial patterns] [Noticeable] [arm]
- (R56) Warning : Simultaneous activation of tactors on multiple body sites brings difficulty for the user to identify stimulations. His attention will be divided between the different body sites which reduce his ability to accurately identify stimuli. It is advised to limit the complexity of the coding strategy when using multiple body sites simultaneously. However, training can improve user's performances. [Craig, 1985] [multi bodypart] [spatial patterns] [spatial allocation] [Noticeable]
- (R57) Warning : Spatial masking appears when two simultaneous stimuli at different locations are felt like one. It may disturb significantly spatial pattern recognition. Spatial masking is a perception bias that can interfere with spatial identification of a stimulus. [Verrillo et al, 1983] [radial/longitudinal,matrix] [spatial patterns] [Noticeable]
- (R58) To prevent spatial masking, you may use different perception channels i.e. a stimulation with a frequency below 80Hz and a stimulation with a frequency above 100Hz. [Verrillo et al, 1983] [radial/longitudinal,matrix] [spatial patterns] [Noticeable]
- (R59) To prevent spatial masking, it is advised to add a delay between two stimuli.

[Geldard et al, 1960] [radial/longitudinal,matrix] [spatial patterns] [Noticeable]

- (R60) Warning : If two factors are activated simultaneously, a bias of perception, called apparent location, can occur. Apparent location results in the production of a unique stimulus located somewhere between the two stimulations. The location is at the barycenter of the two factors center. [Sherrick et al, 1990] [spatial patterns] [Noticeable]
- (R61) Apparent location can be useful to create a continuous display using a discrete set of factors. [Luzhnica et al, 2017] [temporal patterns] [spatial patterns] [radial/longitudinal,matrix] [apparent location x motion] [Noticeable] [80-300Hz] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]
- (R62) Warning : The presentation of two stimuli in a short interval of time can produce a phenomenon named temporal enhancement where a first stimuli enhance the perception of a second stimuli. It can appear when two stimuli are presented in a short interval of time (100 to 500ms) based on intensity level of the stimuli. [Verrillo et al, 1975] [temporal patterns] [rhythm :Multi] [Noticeable] [waveform :Mono]
- (R63) Warning : If two stimuli are transmitted at the same location within a short difference of time, the perception of the second stimulus can be masked by the first stimulus. This bias of perception is named temporal masking and it can impact accurate identification of spatial patterns. [Craig et al , 1987] [temporal patterns] [rhythm :Multi] [Noticeable] [waveform :Mono]
- (R64) Temporal masking can be prevented by using stimulations in different perception channels, i.e. by using a stimulation with a frequency under 80Hz and one above 100Hz. [Craig et al , 1987] [temporal patterns] [rhythm :Multi] [Noticeable] [waveform :Mono]
- (R65) Warning : Prolonged vibration stimulation on the same location provokes a perception phenomenon named adaptation. Adaptation is characterized by a change in the perception of vibrations. Adaptation occurs faster with increasing intensity and duration of stimulation. It can take up to 25 minutes for users to recover from adaptation. Adaptation has a negative effect on vibration thresholds : it increases the absolute threshold and reduces perceived intensity of vibration. [Hahn, 1966] [continuous] [Noticeable]
- (R66) Adaptation can be prevented by switching stimulus frequency band. It is advised to alternate stimulus frequency between the frequency band below 80 Hz and the one above 100 Hz. [Puts et al, 2019] [discrete] [Noticeable]
- (R67) Adaptation improves frequency discrimination at frequencies similar to the adapting stimulus, but impairs discrimination at frequencies different (i.e., frequencies that evoke a qualitatively distinct sensory experience) than the frequency of the adapting stimulus [Tommerdahl et al , 2005] [continuous] [Noticeable] [Frequency :Multi]
- (R68) Apparent location/motion can achieve to create continuous representation of a variable with a mean location error rate lower than 5% (especially efficient with

a radial display on the wrist). However, this is only possible by a specific rendering technique that differs from usual linear, logarithmic, or power functions. This technique makes use of a model personalization adjusting to idiosyncratic and spatial variations in perceptual sensitivity of the user. [Luzhnica et al, 2017] [temporal patterns] [duration :Mono] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal] [Ordinal] [ordinal set :Over 4] [continuous] [spatial patterns] [apparent location x motion] [Noticeable] [80-300Hz] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]

- (R69) To have an accurate identification rate of factors location, distance between factors must be great enough to prevent vibration interferences. The higher the intensity is at the source the larger is the stimulated area around the source. Using spatial pattern or spatial allocation of information, it is then advised to reduce intensity or to augment space between factors. [Shah et al, 2019] [radial/longitudinal,matrix] [spatial patterns] [Noticeable]
- (R70) On the head crown area, user can accurately localize equally spaced factors for :
 - 6 factors with 93% success rate;
 - 8 factors with 76% success rate;
 - 10 factors with 60% success rate;
 - 12 factors with 47% success rate.
 [Gilliland et al, 1994] [radial/longitudinal] [spatial patterns] [Noticeable] [head]
- (R71) Warning : If two vibrotactile stimuli produced from two spaced factors temporally closed, a tactile illusion can occur. This illusion is named apparent motion. The user will then feel a moving stimulus in between the factors. To occur, the initial burst duration must be higher than 20 ms and good timing have to be found between the onset of the second factors. [Kirman, 1974] [temporal patterns] [radial/longitudinal,matrix] [Symbolic] [spatial patterns] [Noticeable] [80-300Hz]
- (R72) Heartbeat like stimulation can be provided for a long duration and be perceived by users in the periphery of their attention if you want to provide a stimulus in continue over a long duration. The gap between stimuli must be wide enough (500 ms) and stimulus should be kept as short as possible. [Pielot et al, 2013] [rhythm :Multi] [Symbolic] [sequential] [continuous] [Just noticeable] [waveform :Mono] [forearm]
- (R73) Localization of factors significantly increase when spatial anchor points are included (navel or back spin). Tactor placements for which anchor points are spanned have a significant decrease in performances. [Cholewiak et al, 2004] [radial/longitudinal] [spatial patterns] [Noticeable] [torso] [belly] [back]
- (R74) As duration of a tactile stimulus increases the ability for users to identify a tactile pattern improves (evaluate on a range from 80 to 300 ms). [Summers et al, 1994] [temporal patterns] [spatial patterns] [Noticeable]
- (R75) It is advised while designing tactile patterns to activate from less sensitive body location to more sensitive one (and vice versa) to increase detection rate of these patterns. [Luzhnica et al, 2017] [radial/longitudinal,matrix] [spatial patterns] [Noticeable] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]

- (R76) Warning : When vibrotactile stimuli are kept on over an extensive period, the duration of stimuli is preferable to stay between 50 and 200 ms. The longer is the stimulation, the more it feels annoying for the user. Especially if the user is engaged into a parallel task. [Kaaresoja et al, 2005] [continuous] [Noticeable]
- (R77) Designing spatial patterns that combine multiple factors located on fingers, it is advised to limit simultaneous factors activation to less than three fingers at the time. [Hameed et al, 2006] [radial/longitudinal] [multi bodypart] [spatial patterns] [Noticeable] [finger]
- (R78) For fingers can be ordered by sensitivity of perception to increase user identification rate of tactile patterns. The index finger is the more sensitive finger, followed by the middle, ring and pinky. [Luzhnica et al, 2017] [temporal patterns] [radial/longitudinal] [multi bodypart] [spatial patterns] [Noticeable] [finger]
- (R79) Prioritizing the activation of factors based on highest sensitive place towards lowest can significantly increase the accuracy recognition of spatio-temporal patterns. [Luzhnica et al, 2017] [temporal patterns] [radial/longitudinal] [multi bodypart] [spatial patterns] [Noticeable] [finger]
- (R80) On the forearm, with an intensity of 1.8g at 240 Hz, the measured intensity on the skin is still higher than 0.3 g at 4 cm from the source. This level of intensity is still above the perception threshold. A distance of 6 to 8 cm from the source is needed for the level of intensity to be close of 0g. This is pointing out that vibration can travel far from its source. It can prevent a display using spatial patterns or allocation to achieve a good information transfer. It is advised to limit the intensity of stimuli to reduce the distance traveled by vibration in the surroundings of the factor. [Shah et al, 2019] [radial/longitudinal,matrix] [spatial patterns] [Noticeable] [forearm]
- (R81) Designing vibrotactile melodies, rhythm dominates amplitude and frequency of vibrations. Moreover, the number of notes played in the melody is used to discriminate melodies. [Swerdfeger et al, 2009] [temporal patterns] [rhythm :Multi] [radial/longitudinal] [Symbolic] [symbolic set] [Noticeable] [waveform :Mono] [hand]
- (R82) Tactile melodies should remain simple i.e. the number of notes used should be limited. Users have shown difficulties to discriminated melodies using 8 distinctive notes on a fast tempo. Melodies with regular spacing between notes is usually identified by their number of notes. It is advised to design melodies that have variation of rhythm (tempo) and rugosity. [Swerdfeger et al, 2009] [temporal patterns] [rhythm :Multi] [radial/longitudinal] [Symbolic] [symbolic set] [Noticeable] [waveform :Mono] [hand]
- (R83) Sine, Square, Triangular and Sabertooth have different tactile sensations and can be used to create meaningful associations. [Schneider et al, 2014] [Symbolic] [Noticeable] [intensity level :Mono] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Multi] [rugosity :Multi] [finger] [palm]
- (R84) Spatial patterns allow to efficiently code a large set of vibrotactile items using multiple combination of 2 factors. [Luzhnica et al, 2017] [radial/longitudinal] [Sym-

bolic] [symbolic set] [discrete] [spatial patterns] [Noticeable] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]

- (R85) Using OST to generate a set of tactile items and perception optimization technics to reduce masking effects and by only using combinations of 2 tactors, it is possible to encode with good recognition rate on :
 - (fingers + hand) 8 tactors : 36 symbols.
 - (fingers + hand)12 tactors : 72 symbols.
 - (2 hands) 8 tactors : 136 symbols.[Luzhnica et al, 2019] [temporal patterns] [duration :Mono] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal] [Symbolic] [symbolic set] [sequential] [multi bodypart] [spatial patterns] [Noticeable] [intensity level :Mono] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [forearm] [palm] [finger]
- (R86) Using overlapped spatiotemporal or OST methods coupled with perception-based optimization methods, it is possible to generate large set an roman alphabet (letters + digits). This alphabet can then be used to spell short words with good recognition rate. [Luzhnica et al, 2019] [temporal patterns] [duration :Mono] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal] [Symbolic] [symbolic set] [sequential] [continuous] [spatial patterns] [Noticeable] [intensity level :Mono] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [forearm] [finger] [palm]
- (R87) Using tactors on the head, the crown area is more sensitive than the central and parietal areas. Frontal, temporal, occipital and the top of the head are spatial reference areas for tactors on the head. [Oliveira et al, 2016] [spatial patterns] [Noticeable] [head]
- (R88) Warning : On the head stimulation of frequencies higher than 150 Hz and of high intensity are reported uncomfortable, even painful (risk of headache). Temporal areas close to ears are also sensible areas with potential conflict between earing and vibration stimulation. [Oliveira et al, 2016] [Noticeable] [80-300Hz] [head]
- (R89) Using tactile patterns presented by a 3 by 3 matrix mounted on the forearm, identification has a higher accuracy rate if patterns are made by sequential activating tactors. Furthermore, patterns prioritizing transversal direction than longitudinal one has a better identification rate. [John et al, 2009] [radial/longitudinal] [discrete] [spatial patterns] [Noticeable] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [forearm]
- (R90) From 20 to 80 Hz, vibrations feel like rough motion or fluttering. [Tan et al, 1999] [Noticeable] [0-80Hz]
- (R91) From 100 to 300 Hz, vibrations feel like smooth vibrations. [Tan et al, 1999] [Noticeable] [80-300Hz]
- (R92) Two distinct perceptual axes for vibration can be defined. They are respectively composed of frequencies in the range of 20-80 Hz and 100-300 Hz. [Tan et al, 1999] [Noticeable] [finger]
- (R93) Vibrotactile information transfer rate peak typically is in the range of 10

to 13 bits/s but can reach up to 18 bits/s (observed for a set of 28 stimuli of 125 ms). Presentation rate tends to increase from 1.9 to 4.9 items/s as the quantity of information by stimuli decreases from 6.49 to 2.81 bits. Which suggests that the increase of the information transfer rate is a trade-off between quantity of information in a stimulus and the presentation rate of this stimulus. User are thus encouraged to test different presentation rate and combination of dimension when designing their display. [Tan et al, 2010] [ordinal set :Over 4] [symbolic set] [simultaneous] [finger]

- (R94) A combination of spatial and temporal patterns allows to build larger sets of tactile symbols. [Tan et al, 1999] [temporal patterns] [Symbolic] [symbolic set] [spatial patterns] [Noticeable]
- (R95) Warning : Identification of spatial patterns reduces exponentially with a growing number of stimulated locations even using several body parts. It is then advised to limit the number of factors simultaneously activated. To get a higher identification rates when designing a set of vibrotactile items using spatial pattern, combination with small differences should be avoided. [Geldard et al, 1965] [Symbolic] [spatial patterns] [Noticeable]
- (R96) Identification rate of vibrotactile items can be significantly increased by using longer presentation duration. However longer presentation times (150 to 500ms) seem to as a real benefit only for complex vibrotactile items (that is to say item using multiple coding dimensions) but is less beneficial for monotonal pulsations (100 to 200ms). [Tan et al, 1999] [Noticeable]
- (R97) The absolute duration detection threshold of a stimulus is at least of 25 ms pulse width for an average user. Furthermore, the absolute detection threshold for an inter-pulse gap between two vibrotactile stimuli is about 15ms. Then of at least 25 ms pulse width in addition to a 20 ms inter-pulse gap. Hence, a single vibrotactile message should at least require a total of 45 ms. In addition to this observation, physical properties of factors should also be taken into account, especially rising and falling time that can be higher than 40 ms for ERM vibration motors while acoustic vibrators have rising time that can be lower than 10 ms. [Gtat et al, 2019] [Noticeable] [forearm]
- (R98) Warning : Mixing multiple coding dimensions to create complex vibrotactile items or providing multiple tactile information simultaneously can be a source of tactile clutter. Tactile clutter describes a situation where the superposition of various tactile stimuli leads to tactile cacophony. Although the skin can process large amounts of tactile perceptions, complex vibrotactile items can be less intuitive due to various spatiotemporal interactions between factors. Tactile clutters show that the vibrotactile modality as a maximal information rate that can improve with smarter encoding of the transmitted information. [Van Erp et al, 2003] [ordinal set :Over 4] [symbolic set] [simultaneous] [Noticeable]
- (R99) Meaningful associations based on knowledge shared by users may improve the learning rate of items used in vibrotactile communications. Using meaningful associations make it easier to generalize tactile knowledge to vibrotactile symbols that share information. For example, between vibrotactile messages created from a

sequence of items, such as words made from tactile phonemes. [Zhao et al, 2018] [sequential] [Noticeable]

- (R100) Spatio-temporal patterns can be an efficient way to encode ordinate set of vibrotactile items. By using spatial location to polarize the transmitted value and temporal patterns to indicate the amplitude of the transmitted value. [Ng et al, 2005] [temporal patterns] [radial/longitudinal] [Ordinal] [sequential] [spatial patterns] [Noticeable] [intensity level :Mono] [waveform :Mono]
- (R101) Large matrices can be used to draw pictograms such as letters, and symbols. Dynamics presentation (i.e. tracing the pictogram by sequentially triggering tactors) instead of a static presentation improves the recognition rate of pictograms. A trade-off between duration of stimulus and rendering time of the pictogram must be found. [Kim et al, 2006] [temporal patterns] [duration :Mono] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal] [Symbolic] [sequential] [discrete] [spatial patterns] [Noticeable] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [foot]
- (R102) Compared to static rendering of tactile pictograms, apparent motion allows a significant improvement of the recognition rate. [Kim et al, 2006] [temporal patterns] [duration :Mono] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal,matrix] [Symbolic] [sequential] [discrete] [spatial patterns] [Noticeable] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [foot]
- (R103) When more than two complex temporal patterns are presented simultaneously at different locations, users usually cannot catch the information. To achieve simultaneous communication, it is thus preferable to keep stimuli as simple as possible. [Dosani et al, 2012] [simultaneous] [spatial patterns] [spatial allocation] [Noticeable] [belly] [back]
- (R104) To render continuous apparent motions between multiple tactors, a piecewise linear function of increase and decrease intensity can be used between two consecutive tactors. It is an easy and efficient way to pilot tactors into displaying continuous apparent motion over a line made of multiple tactors. The speed of the motion can be controlled from the slope of the function. A spacing of 5 cm with activation time of 110 ms is a good set of parameters to render apparent motion cues on the longitudinal and radial direction on the arm and forearm. [Rahal et al, 2009] [temporal patterns] [duration :Mono] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal] [spatial patterns] [apparent location x motion] [Noticeable] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [arm] [forearm]
- (R105) Radial displays perform better than longitudinal displays for intensity levels and location identification. For radial displays and longitudinal displays, the coverage of all the available space with equidistant spacing shows better identification rate than partial coverage. [Guémann et al, 2019] [radial/longitudinal] [discrete] [spatial patterns] [Noticeable] [arm]
- (R106) Warning : Intensity is the less efficient dimension to encode information. [Geldard et al, 1960] [Noticeable] [intensity level :Multi] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]

- (R107) A matrix display of 3*3 is not optimal solution to present information encoded by tactors positions. Users have great difficulties to identify accurately absolute location of tactors (estimate IT is lower than 2 bits). Thus, the optimal shape is a triangular configuration of 3 tactors on the back and volar side of the forearm. [Chen et al, 2008] [radial/longitudinal] [spatial patterns] [Noticeable] [intensity level :Mono] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [forearm]
- (R108) Volar area of the forearm has slightly better sensitivity than the dorsal area for location identification. Location identification is better closer to the wrist and should be limited to two tactors on each side. Identification of location has a higher success rate for columns of the matrix than for its rows. Suggesting that spatial acuity is better on the radial direction than on the longitudinal direction. [Chen et al, 2008] [radial/longitudinal] [Noticeable] [forearm]
- (R109) Using spatiotemporal patterns, users can easily identify the starting point, the ending point and direction of a sequence of burst composing spatiotemporal patterns. On the forearm, patterns identification of such patterns is higher for radial (bracelet) displays than for circular matrix displays on top of the forearm. The estimate IT for the bracelet display is 2.44 bits against 1.72 bits for the matrix one. [Matscheko et al, 2010] [temporal patterns] [duration :Mono] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal] [sequential] [continuous] [spatial patterns] [Noticeable] [intensity level :Mono] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [forearm]
- (R110) Users were able to achieve up to 99% recognition rate for 24 tactile patterns, using a 3 tactors circular matrix display. This success rate is achieved after 40 minutes of training. Among the four parameters (intensity, starting point, temporal pattern, and direction) that vary to form 24 patterns, intensity is the most difficult parameter to distinguish and temporal pattern is the easiest. An estimate IT of 4.28 bits has been computed for this display. [Lee et al, 2010] [temporal patterns] [duration :Mono] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal] [symbolic set] [sequential] [discrete] [spatial patterns] [Noticeable] [intensity level :Multi] [forearm]
- (R111) Ideally, it is advised to present a maximum of 2 to 3 vibrotactile items per second and to maximize the quantity of information carried by each item. However, the duration of items, the degree of training and familiarity of the user with the set of items can increase the optimal item presentation. [Tan et al, 2010] [continuous] [Noticeable]
- (R112) Using a radial display around the wrist with 4 tactors, users have a better location identification rate for 45° positions around the vertical axis than for tactors located on the apex of vertical and horizontal axes. [Gupta et al, 2016] [temporal patterns] [radial/longitudinal] [spatial patterns] [Noticeable] [forearm]
- (R113) Using apparent location, users can also discriminate to some points different frequency and intensity levels. [Gupta et al, 2016] [temporal patterns] [radial/longitudinal] [apparent location x motion] [Noticeable] [80-300Hz] [rugosity :Mono] [waveform :Mono] [forearm]

- (R114) Between 4 to 8 different positions can be made perceived using apparent location. Users have shown an identification rate moving from 95% to 87% as the number of locations increased. [Gupta et al, 2016] [temporal patterns] [radial/longitudinal] [ordinal set :Over 4] [sequential] [continuous] [spatial patterns] [apparent location x motion] [Noticeable] [80-300Hz] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [forearm]
- (R115) It is possible to create an ordinal set of stimuli with good identification rate using spatial patterns on a longitudinal line of tactors. Each level is made as follow : first tactor, then first and second tactors, then third tactor, then fourth and fifth tactors, then fifth tactor ... [McLanders et al , 2014] [radial/longitudinal] [Ordinal] [ordinal set :Over 4] [continuous] [spatial patterns] [Noticeable] [intensity level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [arm]
- (R116) 2D ordinal sets of vibrotactile items that combine a spatial ordinal scale with a temporal ordinal scale (e.g. spatial position with rhythm) allows to communicate simultaneously two dimensions of an information. Such simultaneous communication can reduce identification times but can increase user mental load. [McLanders et al , 2014] [temporal patterns] [radial/longitudinal] [Ordinal] [ordinal set :Over 4] [simultaneous] [continuous] [spatial patterns] [Noticeable] [waveform :Mono] [arm]
- (R117) Tactile messages of a length from 1 to 1.5 s based on a grammar can efficiently be used as a discret communication device or as a secondary display. These patterns are mixing lexical and ordinal scale cues to serialized information. Identification success rate for these tactile messages was other 80% with music playing in the background and fall to 65% with the visual and auditory distracting task, over a period of 10 mn. [Pescara et al, 2019] [temporal patterns] [radial/longitudinal] [ordinal set :2-4] [sequential] [discrete] [Noticeable] [forearm]
- (R118) Short and long pulses can be combined in a practical way to encode ordinal scale, using a look alike Roman number coding system. [Cauchard et al, 2016] [temporal patterns] [duration :Multi] [radial/longitudinal] [Ordinal] [ordinal set :Over 4] [sequential] [discrete] [Noticeable] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [forearm]
- (R119) Pre-stimulus can enhance identification rate by grabbing user attention on incoming tactile cues after a long tactile inactivity. It reduces the surprise effect that can reduce tactile acuity of the user. [Cauchard et al, 2016] [radial/longitudinal] [discrete] [Noticeable]
- (R120) On the neck, users can accurately locate up to 8 sites with a success rate of 95%. [Schaack et al, 2019] [radial/longitudinal] [spatial patterns] [Noticeable] [80-300Hz] [neck]
- (R121) For better spatial identification, it is advised to use mechanical insulation on the fixation point of tactors. However, this insulation might have a damping effect on vibration, and it is advised to conduct trials. With silicon insulation strong damping effect is noticed for frequency higher than 200 Hz. [Park et al, 2018] [radial/longitudinal,matrix] [spatial patterns] [Noticeable]

- (R122) A 2 by 2 matrix performs better than a 3 by 3 matrix for short patterns made of 2 to 3 strokes using apparent motion on the wrist. Even if using a grid with smaller resolution prevents to make a larger variety of more complex patterns, users have less difficulty to recognize patterns and their learning rate is faster. [Liao et al, 2015] [temporal patterns] [radial/longitudinal] [Symbolic] [sequential] [spatial patterns] [apparent location x motion] [Noticeable] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [forearm]
- (R123) To increase presentation rate of vibrotactile items, it is advised to use smaller matrix displays that allow for faster rendering of spatial patterns and apparent motion. [Liao et al, 2015] [temporal patterns] [radial/longitudinal] [Symbolic] [sequential] [spatial patterns] [apparent location x motion] [Noticeable] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [forearm]
- (R124) Using apparent motion with matrix displays, 3 strokes patterns have a significant better identification rate than longer patterns. The length of stroke patterns should be limited. In addition, three strokes are preferable than two due to difficulties for users to discriminate between diagonal and horizontal strokes. [Liao et al, 2015] [temporal patterns] [radial/longitudinal] [Symbolic] [sequential] [spatial patterns] [apparent location x motion] [Noticeable] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [forearm]
- (R125) Mechanical insulation can improve spatial acuity. With appropriate insulation spatial acuity, smaller than 3 to 4 cm can be reached on the torso and back. It is then advised to insulate tactors to enhance spatial location. [Jóhannesson et al, 2017] [temporal patterns] [radial/longitudinal,matrix] [spatial patterns] [Noticeable] [80-300Hz] [torso] [back]
- (R126) For applications that use spatial acuity, it is highly recommended to tune spacing between tactors. In effect, spatial acuity seems to be strongly connected to the technology of tactors used with vibration propagation on the skin also playing a role. [Jóhannesson et al, 2017] [radial/longitudinal,matrix] [spatial patterns] [Noticeable]
- (R127) For optimal apparent motion or apparent location, distance between tactors must be larger than 2 to 4 cm. [Hoffmann et al, 2018] [temporal patterns] [radial/longitudinal,matrix] [spatial patterns] [apparent location x motion] [Noticeable] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]
- (R128) Using apparent motion between two distant tactors, high intensity activation followed by lower intensity will result in an illusory downward movement and vice versa. [Hoffmann et al, 2018] [temporal patterns] [radial/longitudinal,matrix] [spatial patterns] [apparent location x motion] [Noticeable] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]
- (R129) Trying to create apparent motion, if the duration between the start of the two distant stimuli is closed to 0 ms, then subjects are likely to feel that the stimulus set came simultaneously. As the duration between the start of each stimulus is getting longer, the probability of feeling a moving stimulus in between the tactors rise rapidly to a pike until the probability to feel separate stimuli meets the proba-

bility to feel one. Then the two stimuli rapidly start to be felt separate. For stimuli of a duration of 200 ms, the optimal duration between the starts of each stimulus is about 100 ms. For 200 ms the probability is less than 40% and at 400 ms both stimuli are distinct. In addition, designers should be careful to response time of their factors if they want to achieve apparent motion for short intervals of time. For example, ERMs have slow response time which leads to less evident sensation. [Niwa et al, 2004] [radial/longitudinal,matrix] [spatial patterns] [apparent location x motion] [Noticeable] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]

- (R130) To augment the rate at which information is transmitted, a semi-parallel approach can be a good compromise that does not reduce too much the identification rate. At least with monotonal bursts of vibration, a significant improvement in recognition rate of spatiotemporal patterns can be perceived. Vibrotactile items should be presented in a sequence of small packets that present a maximum of two items simultaneously. [Schätzle et al, 2017] [temporal patterns] [sequential] [spatial patterns] [Noticeable]
- (R131) Ecological association between factors placements and information can be useful to create meaningful association or encode information. [Van Erp et al, 2003] [radial/longitudinal,matrix] [Symbolic] [sequential] [discrete] [spatial patterns] [spatial allocation] [Noticeable] [80-300Hz] [finger]
- (R132) For ordinal values representation, designers must select the appropriate polarity of the mapping between the information and stimuli. The polarity describes if the direction of a change in the coding dimension matches the direction of a change in the encoded information. Thus, the polarity is positive when an increase in the encoding signal is perceived by the user as an increase of the encoded information, and negative when it is understood as a decrease of the encoded information. For example, an increase in rhythm is perceived as an increase of urgency. The polarity of this mapping is then positive. [Gomes et al, 2018] [Ordinal] [Noticeable]
- (R133) Identification rate of information is higher presenting items in sequentially than simultaneously. However, if the presentation rate is too high (i.e. if too many items are presented in a short interval of time) the identification rate will drop. [Schätzle et al, 2017] [simultaneous] [continuous] [Noticeable]
- (R134) For ordinal values representation, designers must tune the ratio of the mapping between information and stimuli. In effect it is necessary to scale the coding dimension increment with the quantity of the information it represents. For example, if we map a distance of an obstacle on the gap duration between two consecutive bursts of vibration, an exponential decrease as the obstacle gets closer might be more representative of the closing distance than a linear decrease. [Ferguson et al, 2018] [Ordinal] [Noticeable]
- (R135) Warning : The use of multiple rhythm and intensity levels should be tuned with user perceptions. It is advised to limit the number of rhythm levels while using multiple levels of intensity and to adjust levels based on users' perceived magnitude for each vibrotactile item. [Ferguson et al, 2018] [rhythm :Multi] [Noticeable] [intensity level :Multi] [waveform :Mono]

- (R136) Warning : The use of multiple duration and intensity levels should be tuned based on users' perceptions. It is advised to limit the number of duration levels while using multiple levels of intensity and to adjust intensity levels based on users' perceived magnitude for each vibrotactile item. [Ferguson et al, 2018] [duration :Multi] [Noticeable] [intensity level :Multi] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]
- (R137) To improve identification rate of tactile items for continuous feedback, passive haptic learning methods is a practical training method that allows to keep users focus. [Luzhnica et al, 2018] [ordinal set :Over 4] [symbolic set] [Noticeable]
- (R138) Locomotion (walk and run) and active motion have a negative effect on user perception, thus longer vibration and reduced complexity of tactile items are strongly advised. Fixation of vibrotactile should be designed to ensure continuous contact. [Demircan et al, 2019] [Noticeable]
- (R139) Locomotion (walk and run) and active motion have a negative effect on user perception and identification of vibrotactile items. It is also advised to present stimulus in a sequential way. [Demircan et al, 2019] [sequential] [Noticeable]
- (R140) Combining short pulsations of weak intensity or longer pulsations with strong intensity make it possible to enhance expressiveness of the apparent motion. [Ogrinc et al, 2017] [temporal patterns] [radial/longitudinal] [Symbolic] [sequential] [spatial patterns] [apparent location x motion] [Noticeable] [intensity level :Multi] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]
- (R141) Dermatomes are areas of the skin that are supplied mainly by afferent nerve fibers from a single dorsal root of spinal nerve. There can be significant difference in vibrotactile discrimination performances between dermatomes on the same body part. However, dermatomes with similar performances can be suitable to transfer multivariate information through vibrotactile cues. Using multiple dermatomes does not improve simultaneous stimulation for untrained users. [Shah et al, 2019] [simultaneous] [multi bodypart] [spatial patterns] [Noticeable]
- (R142) Warning : Untrained users have a better identification rate for sequential presentation than for simultaneous presentation of vibrotactile cues. [Shah et al, 2019] [sequential] [Noticeable]
- (R143) Warning : Below 2 cm spacing between tactors, stimuli from two distant tactors has a higher chance to be felt as one on stimulus on most hairy skin areas. [Hoffmann et al, 2018] [radial/longitudinal,matrix] [apparent location x motion] [Noticeable] [80-300Hz] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]
- (R144) An average Information Transfer of 1.5 - 3.25 bits on the finger has been measured using multiple levels of amplitude and frequency :
 - 1.5 bits amplitude and frequency alone.
 - 2.55-3.25 bits : by combining both dimensions.
 [Rabinowitz et al, 1987] [duration :Mono] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal] [Ordinal] [ordinal set :Over 4] [sequential] [discrete] [Noticeable] [intensity level :Multi] [frequency level :Multi] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [finger]

- (R145) An average Information Transfer of 2.5 bits on the palm has been measured using multiple levels of amplitude, frequency and number of vibration bursts. [Chen et al, 2011] [temporal patterns] [duration :Mono] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal] [Symbolic] [ordinal set :2-4] [sequential] [Noticeable] [intensity level :Multi] [frequency level :Multi] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [palm]
- (R146) An average Information Transfer of 5.4 to 6.5 bits is measured for spatial patterns using one to three fingers of a duration of 125 to 500 ms combining multiple frequency signals (single, double, or triple) of different intensities. This IT has been measured after 6 hours of trainings. [Tan et al, 2010] [duration :Mono] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal] [multi bodypart] [spatial patterns] [Noticeable] [intensity level :Multi] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Multi] [finger]
- (R147) An average Information Transfer of 1,72 bits on the forearm has been measured using multiple levels of amplitude, frequency, and pulse duration. [Brown et al, 2006] [duration :Multi] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal] [Ordinal] [ordinal set :2-4] [sequential] [Noticeable] [intensity level :Multi] [frequency level :Multi] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [forearm]
- (R148) An average Information Transfert of 3.5 bits on the back of the foot can be estimated from users' performances achieved with spatiotemporal rendered meaningful symbols. [Kim et al, 2006] [temporal patterns] [duration :Mono] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal] [Symbolic] [symbolic set] [sequential] [discrete] [spatial patterns] [Noticeable] [intensity level :Mono] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [foot]
- (R149) An average Information Transfer of 1.65 bits on the back has been measured using multiple levels of spatio-temporal strokes on a 3*3 matrix. [Novich et al, 2015] [temporal patterns] [duration :Mono] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal] [Symbolic] [sequential] [discrete] [spatial patterns] [Noticeable] [intensity level :Mono] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [back]
- (R150) An average Information Transfer of 2 bits on the dorsal area of the forearm can be reached using spatial location with a 3 factors in a triangular set up. [Chen et al, 2011] [duration :Mono] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal] [Symbolic] [sequential] [discrete] [spatial patterns] [Noticeable] [intensity level :Mono] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [forearm]
- (R151) An average Information Transfer of 3.4 bits on the forearm has been measured using multiple levels of rhythm, roughness, and spatial location. [Brown et al, 2006] [duration :Mono] [rhythm :Multi] [radial/longitudinal] [Symbolic] [symbolic set] [sequential] [discrete] [spatial patterns] [Noticeable] [intensity level :Mono] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Multi] [rugosity :Multi] [forearm]
- (R152) An average Information Transfer of 4.28 bits on the back of the hand has been measured using multiple levels of intensity, spatiotemporal pattern (starting point, movement direction) on a 3 factors circular matrix. [Lee et al, 2010] [temporal patterns] [duration :Mono] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal] [Symbolic] [symbolic set] [sequential] [discrete] [spatial patterns] [Noticeable] [intensity

level :Multi] [80-300Hz] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [hand]

- (R153) An average Information Transfer of 4.55-7.02 bits with 2, 3 and 4 factors on the fingers and hand of the user, has been measured using spatiotemporal patterns. [Park et al, 2018] [temporal patterns] [duration :Mono] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal] [Symbolic] [symbolic set] [sequential] [discrete] [multi body-part] [spatial patterns] [Noticeable] [intensity level :Mono] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Multi] [finger] [hand]
- (R154) An average Information Transfer of 6-6.9 bits can be estimated from user performance on multiple fingers displays using overlapped spatiotemporal patterns. [Luzhnica et al, 2019] [temporal patterns] [duration :Mono] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal] [Symbolic] [symbolic set] [sequential] [continuous] [multi body-part] [spatial patterns] [Noticeable] [intensity level :Mono] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [finger]
- (R155) An average Information Transfer of 5 bits on the dorsal side of the forearm has been measured using combination of apparent motions. [Liao et al, 2015] [temporal patterns] [duration :Mono] [rhythm :Mono] [radial/longitudinal] [Symbolic] [symbolic set] [sequential] [continuous] [spatial patterns] [apparent location x motion] [Noticeable] [intensity level :Mono] [80-300Hz] [frequency level :Mono] [waveform :Mono] [rugosity :Mono] [forearm]
- (R156) Without training, an average user can approximately distinguish between 15-20 changes in intensity levels. All these levels intensity can't be absolutely identified. [Brewster et al, 2004] [Noticeable] [intensity level :Multi] [waveform :Mono] [rugosity :Mono]
- (R157) Factors with a larger surface can improve tactile absolute identification of the intensity of vibrotactile stimuli. [Stronk et al, 2015] [intensity level :Multi]
- (R158) Warning : Discrimination of the intensity and frequency levels of a stimulus is affected by age. [Cholewiak et al, 2003] [intensity level :Multi] [frequency level :Multi]
- (R159) Warning : Discrimination of the intensity and frequency levels of a stimulus is affected by hair density. [Oliveira et al, 2016] [intensity level :Multi] [frequency level :Multi]
- (R160) Warning : Discrimination of the intensity and frequency levels of a stimulus is affected by the temperature of the skin. [Bolanowski et al, 1982] [intensity level :Multi] [frequency level :Multi]
- (R161) Warning : Discrimination of the intensity and frequency levels of a stimulus is affected by fat level. [Bikah et al, 2008] [intensity level :Multi] [frequency level :Multi]
- (R162) Warning : Discrimination of the intensity and frequency levels of a stimulus is affected by the skin structure. In hairy skin, the absolute identification threshold can be more than 10 times higher than for glabrous skin at a given frequency.

However, difference thresholds remain comparable. This difference is also explained by the heterogeneous distribution of mechanoreceptors for which the density varies from a location to another one. [Mahns et al, 2006] [intensity level :Multi] [frequency level :Multi]

- (R163) Temporal pattern can be created by changing the shape of the envelope of vibrotactile signals. This shape can be controlled by varying the intensity or frequency of stimuli over time to create perceptual changes. Using such technique, it is possible to create perceptual morphs. These morphes merge two identifiable temporal shapes (temporal profile of the vibration stimulus) into a more complex vibrotactile pattern that share their perceptual properties. This concept creates parentage between vibrotactile patterns which can ease the creation of more meaningful patterns. [Clarck et al, 2017] [temporal patterns] [Noticeable]
- (R164) Compared to patterns create from the concatenation of distinguishable stimuli, users need longer training to memorized patterns produced by converting the voice into vibration. The generalization of known words tactile structures to a new set of words is also rather difficult. [Luzhnica et al, 2017] [temporal patterns] [Symbolic]
- (R165) If users have to evaluate the distance between two factors, the users perception is better on the radial direction than on the longitudinal [Plaisier et al, 2020] [radial/longitudinal] [spatial patterns] [Noticeable] [back]
- (R166) Two factors influence the duration of a gap between two stimuli to be perceived by users. First, the complexity of the signal as the gap between two vibrotactile noise stimuli needs to be longer to be perceived by user in comparison of two sinusoidal stimuli. Secondly, young people usually need a shorter duration than older one. [Van Doren et al, 1990] [temporal patterns] [rhythm :Multi] [simultaneous] [Noticeable]
- (R167) If users must evaluate the distance between two factors, the user's perception is distorted by the simultaneity of factors activation. When factors were activated simultaneously, the distance is perceived shorter than when factors are activated in sequence. Furthermore, perception of distance is completely biased by simultaneous activation making users unable to evaluate the space between factors. [Plaisier et al, 2020] [simultaneous] [spatial patterns] [Noticeable] [back]
- (R168) Users can transfer tactile (temporal and spatial) perceptual knowledge from a location to another which can lead to a reduction of the user's training. [Luzhnica et al, 2019] [Noticeable]
- (R169) The use of displays on multiple body areas has shown to be beneficial for the improvement of spatial patterns. [Wang et al, 2018] [multi bodypart] [spatial patterns]
- (R170) Spatial patterns using factors on both arms tend to be easier to identify than similar patterns using factors on the same arm. [Wang et al, 2018] [multi bodypart] [spatial patterns] [arm] [forearm]

- (R171) For example on the back, to create apparent motion between two factors, the SOA between two stimuli of duration D can be approximated by : $SOA = 0.32 * D + 47.3$ [Israr et al, 2011] [apparent location x motion] [Noticeable] [80-300Hz] [back]
- (R172) For a given spacing, the speed of apparent motion sensation is mainly controlled by duration of each burst and the direction by the order of the burst activation and their intensity. [Hoffmann et al, 2018] [apparent location x motion] [Noticeable] [80-300Hz]
- (R173) Apparent motion can also be combined to produce more complex shapes such as curvy lines by interpolating the motion between nodes of a grid factors. [Schneider et al, 2015] [apparent location x motion] [Noticeable] [80-300Hz]
- (R174) Israr et al provide equations to compute the intensity and location of an apparent location stimulus. [Israr et al, 2011] [apparent location x motion] [Noticeable] [80-300Hz]
- (R175) A similar integration as for the intensity appears with the frequency even across different mechanoreceptors channels. Apparent location results in the perception of a single frequency stimulus which frequency is an intensity weighted approximation. This phenomenon remains even across body parts but diminishes when stimuli are presented asynchronously. [Kuroki et al, 2017] [apparent location x motion] [Noticeable]
- (R176) The conception of a stimulus-based communication display should follow three principles detectability, discriminability, and learnability. To respect the principle of detectability, makers must ensure that users are able to perceive a stimulus in any circumstances. The discriminability principle requires to ensure that every selected stimulus, that are used to create distinguishable cues, can be discriminated from each other, whenever they are perceived separately or combined. Finally, the learnability principle requires to find a representation of the information that eases the memorization and provides tools to support the learning process. But sometimes, the easiest perceivable stimuli are not the easiest to learn. [Sanders et al, 1993] [Noticeable]
- (R177) To further improve discrimination, customization of vibrotactile stimuli can be mandatory since perception varies between users making it difficult to design complex vibrotactile cues distinguishable by many users. A tedious approach, but probably more efficient, is to allow users to personally customize vibrotactile cues. [Janidarmian et al, 2019] [Noticeable]
- (R178) Training can reduce detection and discrimination threshold. A total of 30 minutes of computer-assisted training can be enough to reduce the intensity detection threshold by an average of 36%, and discrimination threshold by around 44%. Musicians are perceived for vibrotactile perception as expert users and generally performed better than normal users. [Stronk et al, 2017] [Noticeable] [intensity level :Multi]
- (R179) Most commonly used learning technique seems to be the flashcard technique

(a type of reinforced learning) where users get the correct answers as soon as they answer. This method is often used to learn vibrotactile items and their associated information. [Zhao et al, 2018] [Noticeable]

- (R180) For technique based on the presentation of items in a sequence, a top-down training method, that focuses on directly learning sequence of vibrotactile items instead of individual items, can quicken generalization of tactile knowledges to new sequence and thus can improve the learning rate. [Zhao et al, 2018] [simultaneous] [discrete] [Noticeable]
- (R181) A continuous vibrotactile signal may be used to directly encode the variations of the information transmitted to a user. Still since the user's sensitivity is poor, it will be difficult for him or her to accurately evaluate the quantity of information. Still continuous vibrotactile feedback can be used to create guiding feedback where one of the extrema of the tactile feedback function is associated with the target value. When designing this type of representation, it is advised to designing non-linear mapping functions to compensate with the poor sensitivity of human skins[de Jesus Oliveira, 2017] [Ordinal] [continuous]

Annexe B

Formulaire de consentement libre et éclairé

- Je certifie donner mon accord pour participer à une recherche en ergonomie et Ingénierie Facteurs Humains.
- J'accepte volontairement de participer à cette étude et je comprends que ma participation n'est pas obligatoire et que je peux stopper ma participation à tout moment sans avoir à me justifier ni encourir aucune responsabilité.
- Mon consentement ne décharge pas les organisateurs de la recherche de leurs responsabilités et je conserve tous mes droits garantis par la loi.
- Au cours de cette expérience, j'accepte que soient recueillies des données sur mes réponses. Je comprends que les informations recueillies sont strictement confidentielles et à usage exclusif des investigateurs concernés.
- J'ai été informé que mon identité n'apparaîtra dans aucun rapport ou publication et que toute information me concernant sera traitée de façon confidentielle.
- J'accepte que les données enregistrées à l'occasion de cette étude puissent être conservées dans une base de données et faire l'objet d'un traitement informatisé non nominatif par les chercheurs, ingénieurs de recherche et stagiaires de l'ESTIA dans le cadre de leur recherche.
- J'ai bien noté que le droit d'accès prévu par la loi « informatique et libertés » s'exerce à tout moment auprès de ces personnes.

Date :

Nom et signature du volontaire :
(Précédée de la mention « lu et approuvé »)

Nom et signature de l'expérimentateur :

Annexe C

Évaluation des motifs produits par un bracelet vibrotactile

1 - Présentation du dispositif

Vous allez évaluer un bracelet de communication vibrotactile. Ce bracelet est équipé de 4 vibreurs qui vous délivreront différentes vibrations au cours de l'expérimentation. Ces vibrations sont dimensionnées pour rester agréables. Tout au long de cette expérimentation vous serez assis de manière confortable avec votre bras non-dominant au repos sur l'accoudoir du fauteuil et serez équipé du bracelet (Fig. C.1).

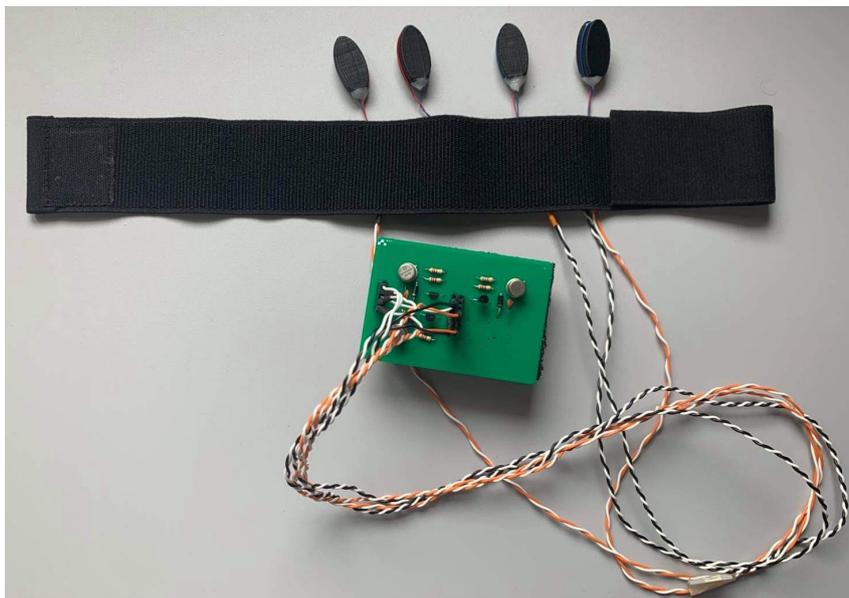


FIGURE C.1 – Prototype du bracelet vibrotactile évalué.

2 - Présentation de l'expérimentation

Au cours de cette évaluation, ce n'est pas vous que nous évaluons mais le dispositif et sa capacité à produire différents motifs vibratoires. Pour cela il vous sera demandé de réaliser deux tâches :

- Tâche 1 : Identifier les relations qui existent entre les différents motifs vibratoires.
- Tâche 2 : Reconnaître ces motifs à différentes positions autour du poignet ;

2.1 - Tâche 1 : Évaluation des relations perceptuelles entre items (Équiper le bracelet au poignet de l'utilisateur et positionner le casque sur ces oreilles)

Pour ce premier exercice, vous avez 5 minutes pour essayer les 5 différents motifs depuis l'interface Fig. C.2 et créer autant de combinaisons que vous souhaitez. Puis vous pourrez répondre aux questions posées.

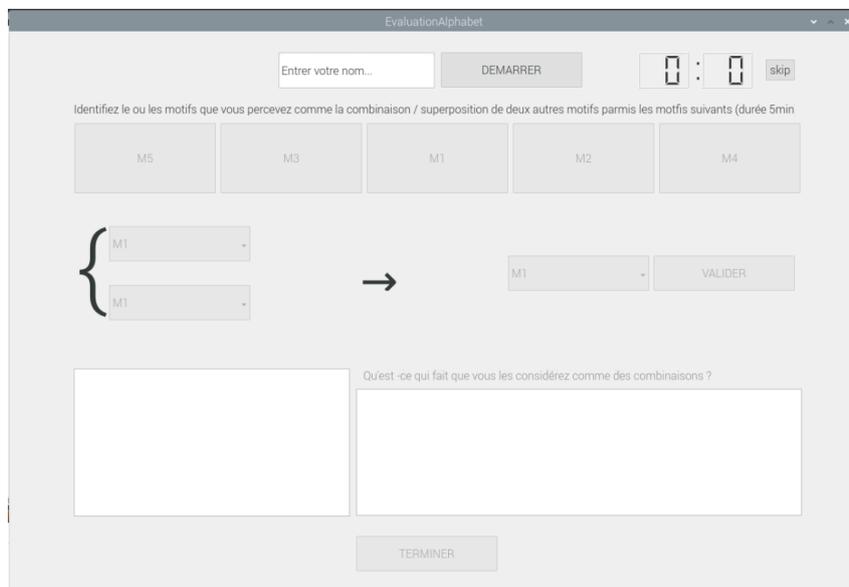


FIGURE C.2 – Interface pour l'évaluation perceptuelle des motifs.

Question(s) :

- Que pensez-vous de M4 comme la combinaison de deux M1 ?
- Que pensez-vous de M4 comme la combinaison de M1 et M2 ?
- Que pensez-vous de M5 comme la combinaison de M1 et M3 ?

2.2 - Calibration du bracelet Vous allez réaliser un exercice de calibration, pour lequel vous devez identifier avec la position des 4 vibreurs. L'exercice s'arrête dès lors que vous réalisez une série de 12 reconnaissances sans faute

2.3 - Entraînement Nos items vibrotactiles sont la combinaison d'une position parmi 4 et d'un motif vibrotactile faisant varier l'intensité d'un stimulus (faible ou fort), la durée de ce stimulus (court ou long) et le rythme (simple ou double stimuli).

La seconde étape est une phase d'entraînement. Durant cet entraînement, il vous sera demandé de reconnaître 20 items vibrotactiles en sélectionnant depuis l'interface et dans l'ordre que vous voulez :

- La position autour du poignet ;
- Le niveau d'intensité ;
- Le niveau de rythme ;
- Le niveau de durée.

Chacun de ces 20 items sera présenté suivant un schéma AXB (Fig. C.4) et vous devrez reconnaître l'item X.

Après chaque identification, la réponse attendue vous sera retournée en vous montrant en rouge vos erreurs et en vert les bonnes réponses. Vous devez réaliser un total de 5 itérations avant de démarrer l'évaluation.

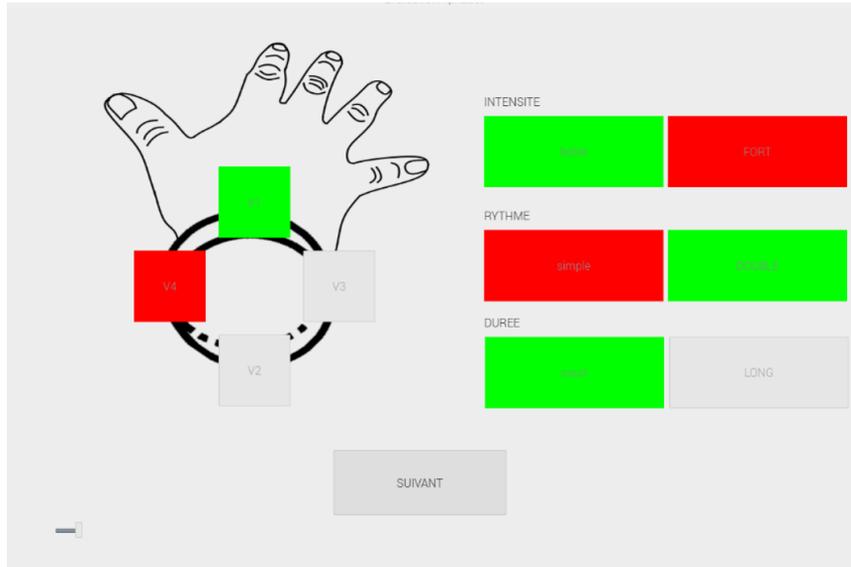


FIGURE C.3 – Interface utilisée lors de la phase d’entraînement.

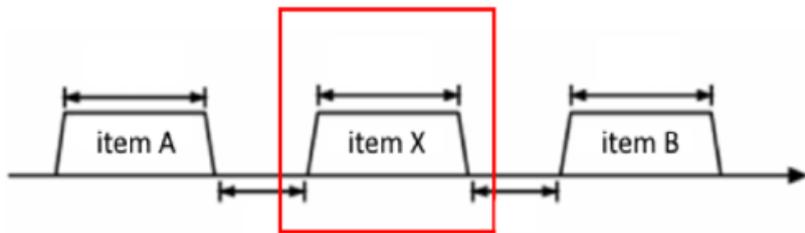


FIGURE C.4 – Illustration du mode de présentation AXB

2.4 - Évaluation L’évaluation consiste à réaliser le même exercice que pour l’entraînement mais sans retour sur votre performance. Il vous sera demandé de réaliser cette évaluation suivant deux modalités différentes. La première consiste à utiliser la même interface que l’interface précédente (Fig. C.3).

2.5 - NASA TLX L’utilisateur complétera ensuite quatre NASA-TLX qui sont utilisées pour évaluer subjectivement la charge mentale de l’utilisateur pour l’identification de la position, du rythme, de la durée et de l’intensité. Répondez aux questions en considérant la tâche d’identification de la position ? Puis de l’intensité, du rythme et de la durée.

2.6 - Deuxième évaluation Pour cette évaluation la tâche est la même cependant vous devez directement sélectionner la position et le motif que vous pensez avoir perçu (Fig. C.5).

2.7 - Entretien

- Quelle(s) dimension(s) tactile(s) trouvez-vous la ou les plus simples à identifier ?
La ou lesquelles trouvez-vous la ou les plus difficiles à identifier ?
- Pouvez-vous les classer par ordre de préférence ?
- Jouez-vous d’un instrument de musique ?

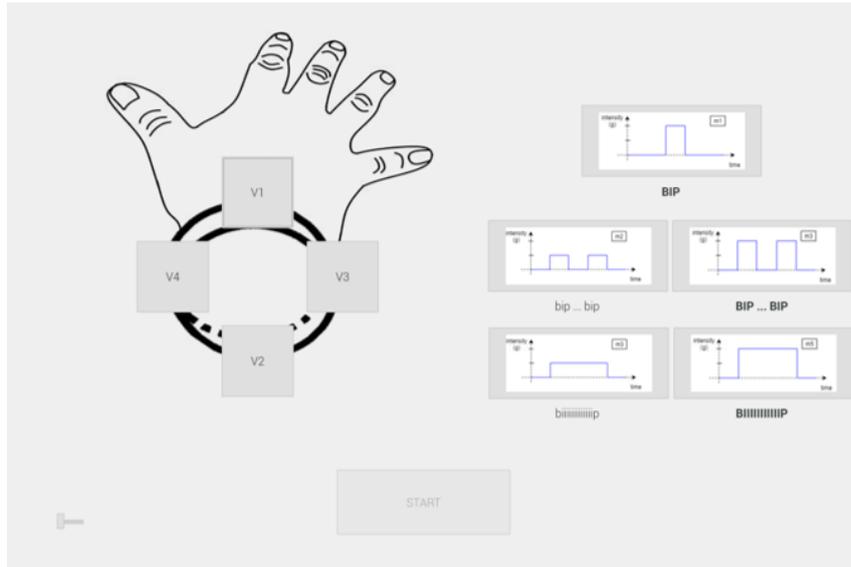


FIGURE C.5 – Interface utilisée pour la seconde phase de l'évaluation permettant la sélection d'un motif parmi 5.

- Quelle(s) combinaisons(s) de dimensions tactile(s) trouvez-vous la ou les plus simples à identifier ?
- Que pensez-vous du bracelet ? Le trouvez-vous agréable, confortable ? Avez-vous déjà eu à réaliser ce genre d'exercice ? Pensez-vous pouvoir l'utiliser pour recevoir des messages ou notifications ?

Bibliographie

- [1] 3dreshaper, 2015. Surveillance, contrôle & inspection. URL : <https://www.3dreshaper.com/fr/software-fr/3dreshaper-fr/controle-inspection>.
- [2] Adjiman, R., 2015. Qualifier et catégoriser les sons d’ambiance pour les indexer dans une sonothèque : axes de réflexion, in : CiDE - 18e Colloque International sur le Document Electronique, Europa. pp. 171–179. URL : <https://doi.org/10.1115/detc2017-68446>, doi :10.1115/detc2017-68446.
- [3] AFM, 2015. Livre blanc de la recherche en mécanique - Enjeux industriels et sociétaux.
- [4] Arisandi, R., Takami, Y., Otsuki, M., Kimura, A., Shibata, F., Tamura, H., 2012. Enjoying virtual handcrafting with tooldevice, in : Adjunct Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 17–18. URL : <https://doi.org/10.1145/2380296.2380306>, doi :10.1145/2380296.2380306.
- [5] ASTM, 2012. Terminology for Additive Manufacturing Technologies. ASTM International. URL : <https://doi.org/10.1520/f2792-12a>, doi :10.1520/f2792-12a.
- [6] Auvray, M., Gallace, A., Spence, C., 2011. Tactile short-term memory for stimuli presented on the fingertips and across the rest of the body surface. *Attention, Perception, and Psychophysics* 73, 1227–1241. URL : <https://doi.org/10.3758/s13414-011-0098-6>, doi :10.3758/s13414-011-0098-6.
- [7] Azuma, R.T., 1997. A survey of augmented reality. *Presence : Teleoper. Virtual Environ.* 6, 355–385. URL : <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>, doi :10.1162/pres.1997.6.4.355.
- [8] Barralon, P., Ng, G., Dumont, G., Schwarz, S., Ansermino, J., 2009. Design of rhythm-based vibrotactile stimuli around the waist : Evaluation of two encoding parameters. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A : Systems and Humans* 39, 1062–1073. URL : <https://doi.org/10.1109/tsmca.2009.2025026>, doi :10.1109/tsmca.2009.2025026.
- [9] de Barros, P.G., Lindeman, R.W., 2013. Performance effects of multi-sensory displays in virtual teleoperation environments, in : Proceedings of the 1st Symposium on Spatial User Interaction, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 41–48. URL : <https://doi.org/10.1145/2491367.2491371>, doi :10.1145/2491367.2491371.

- [10] Bayart, B., Drif, A., Kheddar, A., Didier, J.Y., 2007. Visuo-haptic blending applied to a tele-touch-diagnosis application, in : Shumaker, R. (Ed.), *Virtual Reality*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. pp. 617–626.
- [11] Benko, H., Holz, C., Sinclair, M., Ofek, E., 2016. Normaltouch and texturetouch : High-fidelity 3d haptic shape rendering on handheld virtual reality controllers, in : *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 717–728. URL : <https://doi.org/10.1145/2984511.2984526>, doi :10.1145/2984511.2984526.
- [12] Bergman, L.D., Rogowitz, B.E., Treinish, L.A., 1995. A rule-based tool for assisting colormap selection, in : *Proceedings of the 6th Conference on Visualization '95*, IEEE Computer Society, USA. p. 118.
- [13] Bikah, M., Hallbeck, M.S., Flowers, J.H., 2008. Supracutaneous vibrotactile perception threshold at various non-glabrous body loci. *Ergonomics* 51, 920–934. URL : <https://doi.org/10.1080/00140130701809341>, doi :10.1080/00140130701809341.
- [14] Blum, G., de Blois, M., Tadjine, N., 2017. L'impression 3D : de l'émerveillement technique aux enjeux organisationnels, économiques et sociétaux.
- [15] Bolanowski, S.J., Gescheider, G.A., Verrillo, R.T., Checkosky, C.M., 1988. Four channels mediate the mechanical aspects of touch. *The Journal of the Acoustical Society of America* 84 5, 1680–1694.
- [16] Bolanowski, S.J., Verrillo, R.T., 1982. Temperature and criterion effects in a somatosensory subsystem : a neurophysiological and psychophysical study. *Journal of Neurophysiology* 48, 836–855. URL : <https://doi.org/10.1152/jn.1982.48.3.836>, doi :10.1152/jn.1982.48.3.836.
- [17] Bonnard, R., 2010. Proposition de chaîne numérique pour la fabrication additive. Ph.D. thesis. Ecole Centrale de Nantes. France.
- [18] Bonnard, R., Hascoët, J.Y., Mognol, P., Stroud, I., 2018. STEP-NC digital thread for additive manufacturing : data model, implementation and validation. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 31, 1141–1160. URL : <https://doi.org/10.1080/0951192x.2018.1509130>, doi :10.1080/0951192x.2018.1509130.
- [19] Bottecchia, S., 2010. Système T.A.C. : Télé-Assistance Collaborative. Réalité augmentée et NTIC au service des opérateurs et des experts dans le cadre d'une tâche de maintenance industrielle supervisée. Theses. Université Paul Sabatier - Toulouse III. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00656918>.
- [20] Brewster, S., Brown, L.M., 2004. Tactons : Structured tactile messages for non-visual information display, in : Cockburn, A. (Ed.), *Fifth Australasian User Interface Conference (AUIC2004)*, ACS, Dunedin, New Zealand. pp. 15–23.
- [21] Brill, C., Terrence, P., 2007. Discrete tactile versus auditory target cueing. Technical Report. UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA ORLANDO.

- [22] Brown, L., Brewster, S., Purchase, H., 2005. A first investigation into the effectiveness of tactons, in : First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics Conference, pp. 167–176. doi :10.1109/WHC.2005.6.
- [23] Brown, L.M., Brewster, S.A., Purchase, H.C., 2006. 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, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 231–238. URL : <https://doi.org/10.1145/1152215.1152265>, doi :10.1145/1152215.1152265.
- [24] Bukkapatnam, A.T., Depalle, P., Wanderley, M.M., 2020. Defining a vibrotactile toolkit for digital musical instruments : characterizing voice coil actuators, effects of loading, and equalization of the frequency response. *Journal on Multimodal User Interfaces* 14, 285–301. URL : <https://doi.org/10.1007/s12193-020-00340-0>, doi :10.1007/s12193-020-00340-0.
- [25] Buswell, R., de Silva, W.L., Jones, S., Dirrenberger, J., 2018. 3d printing using concrete extrusion : A roadmap for research. *Cement and Concrete Research* 112, 37–49. URL : <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>, doi :10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
- [26] Carcedo, M.G., Chua, S.H., Perrault, S., Wozniak, P., Joshi, R., Obaid, M., Fjeld, M., Zhao, S., 2016. Hapticolor : Interpolating color information as haptic feedback to assist the colorblind, in : Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 3572–3583. URL : <https://doi.org/10.1145/2858036.2858220>, doi :10.1145/2858036.2858220.
- [27] Card, S., 2008. *Information Visualization*. L. Erlbaum Associates Inc., USA.
- [28] Card, S.K., Mackinlay, J.D., Shneiderman, B. (Eds.), 1999. *Readings in Information Visualization : Using Vision to Think*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.
- [29] Card, S.K., Moran, T.P., Newell, A., 1980. The keystroke-level model for user performance time with interactive systems. *Communications of the ACM* 23, 396–410. URL : <https://doi.org/10.1145/358886.358895>, doi :10.1145/358886.358895.
- [30] Cauchard, J.R., Cheng, J.L., Pietrzak, T., Landay, J.A., 2016. Activibe : Design and evaluation of vibrations for progress monitoring, in : Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 3261–3271. URL : <https://doi.org/10.1145/2858036.2858046>, doi :10.1145/2858036.2858046.
- [31] Ceruti, A., Liverani, A., Bombardi, T., 2017. Augmented vision and interactive monitoring in 3d printing process, in : *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, p. 385–395. doi :10.1007/s12008-016-0347-y.
- [32] Chan, A., MacLean, K., McGrenere, J., 2005. Learning and identifying haptic icons under workload, in : First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on

Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics Conference, pp. 432–439. doi :10.1109/WHC.2005.86.

- [33] Chen, H.Y., Park, J., Dai, S., Tan, H.Z., 2011. Design and evaluation of identifiable key-click signals for mobile devices. *IEEE Transactions on Haptics* 4, 229–241. URL : <https://doi.org/10.1109/toh.2011.21>, doi :10.1109/toh.2011.21.
- [34] Chen, H.Y., Santos, J., Graves, M., Kim, K., Tan, H.Z., 2012. Tactor localization at the wrist, in : *Haptics : Perception, Devices and Scenarios*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 209–218. URL : https://doi.org/10.1007/978-3-540-69057-3_25, doi :10.1007/978-3-540-69057-3_25.
- [35] Chen, J., Turcott, R., Castillo, P., Setiawan, W., Lau, F., Israr, A., 2018. Learning to feel words : A comparison of learning approaches to acquire haptic words, in : *Proceedings of the 15th ACM Symposium on Applied Perception*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. pp. 1–7. URL : <https://doi.org/10.1145/3225153.3225174>, doi :10.1145/3225153.3225174.
- [36] Chinazzo, G., Chamilothoni, K., Wienold, J., Andersen, M., 2017. The effect of short exposure to coloured light on thermal perception : a study using virtual reality, in : *Proceedings of the Lux Europa 2017*, pp. 273–279.
- [37] Chiu, Y.K., Chang, H.Y., Yang, W.L., Huang, Y.H., Ming, O., 2016. A novel real time monitor system of 3d printing layers for better slicing parameter setting, in : *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 209–210. URL : <https://doi.org/10.1145/2984751.2984773>, doi :10.1145/2984751.2984773.
- [38] Chohan, J.S., Singh, R., 2017. Pre and post processing techniques to improve surface characteristics of FDM parts : a state of art review and future applications. *Rapid Prototyping Journal* 23, 495–513. URL : <https://doi.org/10.1108/rpj-05-2015-0059>, doi :10.1108/rpj-05-2015-0059.
- [39] Choi, I., Hawkes, E.W., Christensen, D.L., Ploch, C.J., Follmer, S., 2016. Wolverine : A wearable haptic interface for grasping in virtual reality, in : *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 986–993. doi :10.1109/IROS.2016.7759169.
- [40] Choi, S., Kuchenbecker, K.J., 2013. Vibrotactile display : Perception, technology, and applications. *Proceedings of the IEEE* 101, 2093–2104. URL : <https://doi.org/10.1109/jproc.2012.2221071>, doi :10.1109/jproc.2012.2221071.
- [41] Choi, S., Walker, L., Tan, H.Z., Crittenden, S., Reifemberger, R., 2005. Force constancy and its effect on haptic perception of virtual surfaces. *ACM Trans. Appl. Percept.* 2, 89–105. URL : <https://doi.org/10.1145/1060581.1060584>, doi :10.1145/1060581.1060584.
- [42] Cholewiak, R.W., Brill, J.C., Schwab, A., 2004. Vibrotactile localization on the abdomen : Effects of place and space. *Perception and Psychophysics* 66, 970–987. URL : <https://doi.org/10.3758/bf03194989>, doi :10.3758/bf03194989.

- [43] Cholewiak, R.W., Collins, A.A., 1995. Vibrotactile pattern discrimination and communality at several body sites. *Perception and Psychophysics* 57, 724–737. URL : <https://doi.org/10.3758/bf03213276>, doi :10.3758/bf03213276.
- [44] Cholewiak, R.W., Collins, A.A., 2003. Vibrotactile localization on the arm : Effects of place, space, and age. *Perception and Psychophysics* 65, 1058–1077. URL : <https://doi.org/10.3758/bf03194834>, doi :10.3758/bf03194834.
- [45] Chouvardas, V., Miliou, A., Hatalis, M., 2008. Tactile displays : Overview and recent advances. *Displays* 29, 185–194. URL : <https://doi.org/10.1016/j.displa.2007.07.003>, doi :10.1016/j.displa.2007.07.003.
- [46] Cipriani, C., Alonzo, M.D., Carrozza, M.C., 2012. A miniature vibrotactile sensory substitution device for multifingered hand prosthetics. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 59, 400–408. URL : <https://doi.org/10.1109/tbme.2011.2173342>, doi :10.1109/tbme.2011.2173342.
- [47] Clark, B., Schneider, O.S., MacLean, K.E., Tan, H.Z., 2017. Predictable and distinguishable morphing of vibrotactile rhythm, in : 2017 IEEE World Haptics Conference (WHC), pp. 84–89. doi :10.1109/WHC.2017.7989881.
- [48] Cobus, V., Heuten, W., 2019. To beep or not to beep? evaluating modalities for multimodal ICU alarms. *Multimodal Technologies and Interaction* 3, 15. URL : <https://doi.org/10.3390/mti3010015>, doi :10.3390/mti3010015.
- [49] Controle3D, 2019. Contrôle de mesure 3d - industrie : Écart 3d entre le modèle mesuré et le modèle théorique. URL : <http://www.numerisation3d.com/controle-3d-precision-scannerlaser.html>.
- [50] Craig, J.C., 1985. Tactile pattern perception and its perturbations. *The Journal of the Acoustical Society of America* 77, 238–246. URL : <https://doi.org/10.1121/1.392265>, doi :10.1121/1.392265.
- [51] Craig, J.C., Evans, P.M., 1987. Vibrotactile masking and the persistence of tactual features. *Perception and Psychophysics* 42, 309–317. URL : <https://doi.org/10.3758/bf03203085>, doi :10.3758/bf03203085.
- [52] Cristie, V., Berger, M., Bus, P., Kumar, A., Klein, B., 2015. Cityheat : Visualizing cellular automata-based traffic heat in unity3d, in : SIGGRAPH Asia 2015 Visualization in High Performance Computing, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. pp. 1–4. URL : <https://doi.org/10.1145/2818517.2818527>, doi :10.1145/2818517.2818527.
- [53] Dailly, A.I., Sigrist, R., Kim, Y., Wolf, P., Erckens, H., Cerny, J., Luft, A., Gassert, R., Sulzer, J., 2012. Can simple error sonification in combination with music help improve accuracy in upper limb movements?, in : 2012 4th IEEE RAS EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), pp. 1423–1427. doi :10.1109/BioRob.2012.6290908.
- [54] Darian-Smith, I., Johnson, K.O., 1977. Thermal sensibility and thermoreceptors. *Journal of Investigative Dermatology* 69, 146–153. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022202X15450778>, doi :<https://doi.org/10.1111/1523-1747.ep12497936>.

- [55] Demircan, E., Recinos, E., Abella, J.R., Khoo, I.H., Teng, S., Wu, W., 2019. Perception accuracy of vibrotactile feedback during locomotion, in : 2019 16th International Conference on Ubiquitous Robots (UR), pp. 673–677. doi :10.1109/URAI.2019.8768771.
- [56] Deroy, O., Auvray, M., 2013. A new molyneux’s problem : Sounds, shapes and arbitrary crossmodal correspondences, in : Kutz, O., Bhatt, M., Borgo, S., Santos, P.E. (Eds.), Proceedings of the Second Interdisciplinary Workshop The Shape of Things, Rio de Janeiro, Brazil, April 3-4, 2013, CEUR-WS.org. pp. 61–70. URL : <http://ceur-ws.org/Vol-1007/paper3.pdf>.
- [57] Dilberoglu, U.M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., Dolen, M., 2017. The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Procedia Manufacturing* 11, 545–554. URL : <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>, doi :10.1016/j.promfg.2017.07.148.
- [58] Doren, C.L.V., Gescheider, G.A., Verrillo, R.T., 1990. Vibrotactile temporal gap detection as a function of age. *The Journal of the Acoustical Society of America* 87, 2201–2206. URL : <https://doi.org/10.1121/1.399187>, doi :10.1121/1.399187.
- [59] Dosani, M., Hunc, K., Dumont, G.A., Dunsmuir, D., Barralon, P., Schwarz, S.K.W., Lim, J., Ansermino, J.M., 2012. A vibro-tactile display for clinical monitoring. *Anesthesia and Analgesia* , 1 URL : <https://doi.org/10.1213/ane.0b013e31825d638c>, doi :10.1213/ane.0b013e31825d638c.
- [60] Drewing, K., Ernst, M.O., 2006. Integration of force and position cues for shape perception through active touch. *Brain Research* 1078, 92–100. URL : <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2005.12.026>, doi :10.1016/j.brainres.2005.12.026.
- [61] Dunkelberger, N., Sullivan, J., Bradley, J., Walling, N.P., Manickam, I., Dasarathy, G., Israr, A., Lau, F.W.Y., Klumb, K., Knott, B., Abnoui, F., Baraniuk, R., O’Malley, M.K., 2018. Conveying language through haptics : A multi-sensory approach, in : Proceedings of the 2018 ACM International Symposium on Wearable Computers, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 25–32. URL : <https://doi.org/10.1145/3267242.3267244>, doi :10.1145/3267242.3267244.
- [62] Eiriksson, E., Pedersen, D., Frisvad, J., Skovmand, L., Heun, V., Maes, P., Aanaes, H., 2017. Augmented reality interfaces for additive manufacturing, in : Lecture Notes in Computer Science, pp. 515–525. doi :10.1007/978-3-319-59126-1_43.
- [63] Elliott, A.M., Love, L.J., 2016. Operator burden in metal additive manufacturing. *International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference* URL : <https://www.osti.gov/biblio/1333085>.
- [64] Elsayed, H., Weigel, M., Müller, F., Schmitz, M., Marky, K., Günther, S., Riemann, J., Mühlhäuser, M., 2020. Vibromap : Understanding the spacing of vibrotactile actuators across the body. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.* 4. URL : <https://doi.org/10.1145/3432189>, doi :10.1145/3432189.
- [65] Elvitigala, D.S., Matthies, D.J.C., Dissanayaka, V., Weerasinghe, C., Nanayakkara, S., 2019. 2bit-tactilehand : Evaluating tactons for on-body vibrotactile displays on

- the hand and wrist, in : Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 2019, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. pp. 1–8. URL : <https://doi.org/10.1145/3311823.3311832>, doi :10.1145/3311823.3311832.
- [66] Enriquez, M., MacLean, K., 2008. The role of choice in longitudinal recall of meaningful tactile signals, in : 2008 Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 49–56. doi :10.1109/HAPTICS.2008.4479913.
- [67] Erp, J., Veltman, J., Veen, H.J., Oving, A., 2002. Tactile torso display as countermeasure to reduce night vision goggles induced drift. NATO RTO Conference on Spatial Disorientation .
- [68] Erp, J.V., 2002. Guidelines for the use of vibro-tactile displays in human computer interaction. Proceedings of Eurohaptics , pp.18–22.
- [69] Everton, S.K., Hirsch, M., Stravroulakis, P., Leach, R.K., Clare, A.T., 2016. Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. Materials and Design 95, 431–445. URL : <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.099>, doi :10.1016/j.matdes.2016.01.099.
- [70] Ferguson, J., Brewster, S.A., 2018. Investigating perceptual congruence between data and display dimensions in sonification, in : Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 1–9. URL : <https://doi.org/10.1145/3173574.3174185>, doi :10.1145/3173574.3174185.
- [71] Ferraguti, F., Pini, F., Gale, T., Messmer, F., Storchi, C., Leali, F., Fantuzzi, C., 2019. Augmented reality based approach for on-line quality assessment of polished surfaces. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 59, 158–167. URL : <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.04.007>, doi :10.1016/j.rcim.2019.04.007.
- [72] Frisoli, A., Solazzi, M., Salsedo, F., Bergamasco, M., 2008. A fingertip haptic display for improving curvature discrimination. Presence : Teleoperators and Virtual Environments 17, 550–561. URL : <https://doi.org/10.1162/pres.17.6.550>, doi :10.1162/pres.17.6.550.
- [73] Frost, R., Armstrong, B.C., Siegelman, N., Christiansen, M.H., 2015. Domain generality versus modality specificity : the paradox of statistical learning. Trends in Cognitive Sciences 19, 117–125. URL : <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.12.010>, doi :10.1016/j.tics.2014.12.010.
- [74] Fukuda, T., Yokoi, K., Yabuki, N., Motamedi, A., 2018. An indoor thermal environment design system for renovation using augmented reality. Journal of Computational Design and Engineering 6, 179–188. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2018.05.007>, doi :10.1016/j.jcde.2018.05.007.
- [75] Gallace, A., Ngo, M.K., Sulaitis, J., Spence, C., 2012. Multisensory presence in virtual reality : Possibilities & limitations, in : Multiple Sensorial Media Advances and Applications. IGI Global, pp. 1–38. URL : <https://doi.org/10.4018/978-1-60960-821-7.ch001>, doi :10.4018/978-1-60960-821-7.ch001.

- [76] Garfo, S., Muktadir, M., Yi, S., 2020. Defect detection on 3d print products and in concrete structures using image processing and convolution neural network. *Journal of Mechatronics and Robotics* 4, 74–84. URL : <https://doi.org/10.3844/jmrsp.2020.74.84>, doi :10.3844/jmrsp.2020.74.84.
- [77] Geldard, F.A., 1960. Some neglected possibilities of communication. *Science* 131, 1583–1588. URL : <https://doi.org/10.1126/science.131.3413.1583>, doi :10.1126/science.131.3413.1583.
- [78] Geldard, F.A., Sherrick, C.E., 1965. Multiple cutaneous stimulation : The discrimination of vibratory patterns. *The Journal of the Acoustical Society of America* 37, 797–801. URL : <https://doi.org/10.1121/1.1909443>, doi :10.1121/1.1909443.
- [79] Gescheider, G.A., 2010. *Information-Processing Channels in the Tactile Sensory System*. Psychology Press. URL : <https://doi.org/10.4324/9780203890004>, doi :10.4324/9780203890004.
- [80] Gescheider, G.A., Bolanowski, S.J., Pope, J.V., Verrillo, R.T., 2002. A four-channel analysis of the tactile sensitivity of the fingertip : frequency selectivity, spatial summation, and temporal summation. *Somatosensory and Motor Research* 19, 114–124. URL : <https://doi.org/10.1080/08990220220131505>, doi :10.1080/08990220220131505.
- [81] Gilliland, K., Schlegel, R.E., 1994. Tactile stimulation of the human head for information display. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 36, 700–717. URL : <https://doi.org/10.1177/001872089403600410>, doi :10.1177/001872089403600410.
- [82] Gomes, K.M., Reeves, S.T., Riggs, S.L., 2018. The up-side and down-side” of tactile parameters : An evaluation of increases and decreases in tactile cue magnitude to support anesthesia monitoring. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 62, 622–626. URL : <https://doi.org/10.1177/1541931218621142>, doi :10.1177/1541931218621142.
- [83] Gori, M., Sciutti, A., Burr, D., Sandini, G., 2011. Direct and indirect haptic calibration of visual size judgments. *PLoS ONE* 6, e25599. URL : <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0025599>, doi :10.1371/journal.pone.0025599.
- [84] Güçlü, B., Sevinc, E., Canbeyli, R., 2011. Duration discrimination by musicians and nonmusicians. *Psychological Reports* 108, 675–687. URL : <https://doi.org/10.2466/11.22.27.pr0.108.3.675-687>, doi :10.2466/11.22.27.pr0.108.3.675-687.
- [85] Guemann, M., Bouvier, S., Halgand, C., Paclet, F., Borrini, L., Ricard, D., Lapeyre, E., Cattaert, D., Ruyg, A.d., 2019. Effect of vibration characteristics and vibrator arrangement on the tactile perception of the upper arm in healthy subjects and upper limb amputees. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 16, 138. URL : <https://doi.org/10.1186/s12984-019-0597-6>, doi :10.1186/s12984-019-0597-6.
- [86] Guido, B., Pun, B., Deville, T., 2010. Ssonification of colour and depth in a mobility aid for blind people. *The 16th International Conference on Auditory Display* , 9–13.

- [87] Gupta, A., Pietrzak, T., Roussel, N., Balakrishnan, R., 2016. Direct manipulation in tactile displays, in : Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 3683–3693. URL : <https://doi.org/10.1145/2858036.2858161>, doi :10.1145/2858036.2858161.
- [88] Haase, H., Bock, M., Hergenröther, E., Knöpfle, C., Koppert, H.J., Schröder, F., Trembilski, A., Weidenhausen, J., 2000. Meteorology meets computer graphics — a look at a wide range of weather visualisations for diverse audiences. *Computers & Graphics* 24, 391–397. URL : [https://doi.org/10.1016/s0097-8493\(00\)00035-2](https://doi.org/10.1016/s0097-8493(00)00035-2), doi :10.1016/s0097-8493(00)00035-2.
- [89] Hahn, J.F., 1966. Vibrotactile adaptation and recovery measured by two methods. *Journal of Experimental Psychology* 71, 655–658. URL : <https://doi.org/10.1037/h0023094>, doi :10.1037/h0023094.
- [90] Handa, T., Murase, K., Azuma, M., Shimizu, T., Kondo, S., Shinoda, H., 2017. A haptic three-dimensional shape display with three fingers grasping, in : 2017 IEEE Virtual Reality (VR), pp. 325–326. doi :10.1109/VR.2017.7892308.
- [91] Hanson-Vaux, G., Crisinel, A.S., Spence, C., 2012. Smelling Shapes : Crossmodal Correspondences Between Odors and Shapes. *Chemical Senses* 38, 161–166. URL : <https://doi.org/10.1093/chemse/bjs087>, doi :10.1093/chemse/bjs087.
- [92] Hanton, O., Wessely, M., Mueller, S., Fraser, M., Roudaut, A., 2020. Protospray : Combining 3d printing and spraying to create interactive displays with arbitrary shapes, in : Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 1–13. URL : <https://doi.org/10.1145/3313831.3376543>, doi :10.1145/3313831.3376543.
- [93] Harding, C., Kakadiaris, I.A., Casey, J.F., Loftin, R., 2002. A multi-sensory system for the investigation of geoscientific data. *Computers and Graphics* 26, 259–269. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0097849302000572>, doi :[https://doi.org/10.1016/S0097-8493\(02\)00057-2](https://doi.org/10.1016/S0097-8493(02)00057-2).
- [94] Haslwanter, T., 2021. Structure de la peau glabre et valeur. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=14640652>. CCBY-SA3.0 Accessed : 31-03-2021.
- [95] Hattab, A., Taubin, G., 2019. Rough carving of 3d models with spatial augmented reality, in : Proceedings of the ACM Symposium on Computational Fabrication, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. pp. 1–10. URL : <https://doi.org/10.1145/3328939.3328998>, doi :10.1145/3328939.3328998.
- [96] Heuten, W., Wichmann, D., Boll, S., 2006. Interactive 3d sonification for the exploration of city maps, in : Proceedings of the 4th Nordic Conference on Human-Computer Interaction : Changing Roles, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 155–164. URL : <https://doi.org/10.1145/1182475.1182492>, doi :10.1145/1182475.1182492.

- [97] Hewett, T.T., Baecker, R., Card, S., Carey, T., Gasen, J., Mantei, M., Perlman, G., Strong, G., Verplank, W., 1992. ACM SIGCHI Curricula for Human-Computer Interaction. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA.
- [98] Hirao, Y., Kawai, T., 2019. Augmented cross-modality : Translating the physiological responses, knowledge and impression to audio-visual information in virtual reality. *Electronic Imaging 2019*, 60402–1–60402–8. URL : <https://doi.org/10.2352/j.imagingsci.technol.2018.62.6.060402>, doi :10.2352/j.imagingsci.technol.2018.62.6.060402.
- [99] Ho, H.N., 2017. Material recognition based on thermal cues : Mechanisms and applications. *Temperature* 5, 36–55. URL : <https://doi.org/10.1080/23328940.2017.1372042>, doi :10.1080/23328940.2017.1372042.
- [100] Ho, H.N., Iwai, D., Yoshikawa, Y., Watanabe, J., Nishida, S., 2014. Combining colour and temperature : A blue object is more likely to be judged as warm than a red object. *Scientific Reports* 4, 5527. URL : <https://doi.org/10.1038/srep05527>, doi :10.1038/srep05527.
- [101] Hoffmann, M., Skibicki, S., Pankratow, P., Zieliński, A., Pajor, M., Techman, M., 2020. Automation in the construction of a 3d-printed concrete wall with the use of a lintel gripper. *Materials* 13, 1800. URL : <https://doi.org/10.3390/ma13081800>, doi :10.3390/ma13081800.
- [102] Hoffmann., R., Brinkhuis., M.A.B., Árne Kristjánsson., Unnthorsson., R., 2018. Introducing a new haptic illusion to increase the perceived resolution of tactile displays, in : *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer-Human Interaction Research and Applications - CHIRA,, INSTICC*. SciTePress. pp. 45–53. doi :10.5220/0006899700450053.
- [103] Hoffmann, R., Brinkhuis, M.A.B., Unnthorsson, R., Kristjánsson, Á., 2019. The intensity order illusion : temporal order of different vibrotactile intensity causes systematic localization errors. *Journal of Neurophysiology* 122, 1810–1820. URL : <https://doi.org/10.1152/jn.00125.2019>, doi :10.1152/jn.00125.2019.
- [104] Huang, J., Ong, S., Nee, A., 2015. Real-time finite element structural analysis in augmented reality. *Advances in Engineering Software* 87, 43–56. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997815000733>, doi :<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.04.014>.
- [105] Huber, J., Malavipathirana, H., Wang, Y., Li, X., Fu, J.C., Maes, P., Nanayakkara, S., 2015. Feel and see the globe : A thermal, interactive installation, in : *Proceedings of the 6th Augmented Human International Conference*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 215–216. URL : <https://doi.org/10.1145/2735711.2735776>, doi :10.1145/2735711.2735776.
- [106] Hudson, N., Alcock, C., Chilana, P.K., 2016. Understanding newcomers to 3d printing : Motivations, workflows, and barriers of casual makers, in : *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 384–396. URL : <https://doi.org/10.1145/2858036.2858266>.

- [107] Hyunho Kim, Changhoon Seo, Junhun Lee, Jeha Ryu, Si-bok Yu, Sooyoung Lee, 2006. Vibrotactile display for driving safety information, in : 2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, pp. 573–577. doi :10.1109/ITSC.2006.1706802.
- [108] Israr, A., Poupyrev, I., 2011. Tactile brush : Drawing on skin with a tactile grid display, in : Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 2019–2028. URL : <https://doi.org/10.1145/1978942.1979235>, doi :10.1145/1978942.1979235.
- [109] Iwamoto, T., Tatzono, M., Shinoda, H., 2008. Non-contact method for producing tactile sensation using airborne ultrasound, in : Proceedings of the 6th International Conference on Haptics : Perception, Devices and Scenarios, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. p. 504–513. URL : https://doi.org/10.1007/978-3-540-69057-3_64, doi :10.1007/978-3-540-69057-3_64.
- [110] Iwata, H., Yano, H., Nakaizumi, F., Kawamura, R., 2001. Project feelex : Adding haptic surface to graphics, in : Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 469–476. URL : <https://doi.org/10.1145/383259.383314>, doi :10.1145/383259.383314.
- [111] Jacobson, R., 2002. Representing spatial information through multimodal interfaces, in : Proceedings Sixth International Conference on Information Visualisation, pp. 730–734. doi :10.1109/IV.2002.1028858.
- [112] Jammes, Y., Guimbaud, J., Faure, R., Griffon, P., Weber, J.P., Vie, B., Guieu, R., 2016. Psychophysical estimate of plantar vibration sensitivity brings additional information to the detection threshold in young and elderly subjects. *Clinical Neurophysiology Practice* 1, 26–32. URL : <https://doi.org/10.1016/j.cnp.2016.03.002>, doi :10.1016/j.cnp.2016.03.002.
- [113] Janidarmian, M., Roshan Fekr, A., Radecka, K., Zilic, Z., 2019. Wearable vibrotactile system as an assistive technology solution. *Mobile Networks and Applications* URL : <https://doi.org/10.1007/s11036-019-01304-9>, doi :10.1007/s11036-019-01304-9.
- [114] de Jesus Oliveira, V.A., Brayda, L., Nedel, L., Maciel, A., 2017. Designing a vibrotactile head-mounted display for spatial awareness in 3d spaces. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 23, 1409–1417. URL : <https://doi.org/10.1109/tvcg.2017.2657238>, doi :10.1109/tvcg.2017.2657238.
- [115] de Jesus Oliveira, V.A., Nedel, L., Maciel, A., Brayda, L., 2016. Spatial discrimination of vibrotactile stimuli around the head, in : 2016 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), pp. 1–6. doi :10.1109/HAPTICS.2016.7463147.
- [116] Johannesson, O.I., Hoffmann, R., Valgeirsdottir, V.V., Unnthorsson, R., Moldoveanu, A., Kristjansson, A., 2017. Relative vibrotactile spatial acuity of the torso. *Experimental Brain Research* 235, 3505–3515. URL : <https://doi.org/10.1007/s00221-017-5073-6>, doi :10.1007/s00221-017-5073-6.

- [117] Jones, L.A., Sarter, N.B., 2008. Tactile displays : Guidance for their design and application. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 50, 90–111. URL : <https://doi.org/10.1518/001872008x250638>, doi :10.1518/001872008x250638.
- [118] Jones, L.A., Singhal, A., 2018. Perceptual dimensions of vibrotactile actuators, in : 2018 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), pp. 307–312. doi :10.1109/HAPTICS.2018.8357193.
- [119] Kaaresoja, T., Linjama, J., 2005. Perception of short tactile pulses generated by a vibration motor in a mobile phone, in : First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics Conference, pp. 471–472. doi :10.1109/WHC.2005.103.
- [120] Kaul, O.B., Hansing, L., Rohs, M., 2019. 3dtactiledraw : A tactile pattern design interface for complex arrangements of actuators, in : Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 1–6. URL : <https://doi.org/10.1145/3290607.3313030>, doi :10.1145/3290607.3313030.
- [121] Killi, S., Kempton, W.L., Morrison, A., 2015. Design issues and orientations in additive manufacturing. *International Journal of Rapid Manufacturing* 5, 289–293. URL : <https://doi.org/10.1504/ijrapidm.2015.074808>, doi :10.1504/ijrapidm.2015.074808.
- [122] Kim, J., Zheng, C., Takahashi, H., Gross, M.D., Ashbrook, D., Yeh, T., 2018. Compositional 3d printing : Expanding & supporting workflows towards continuous fabrication, in : Proceedings of the 2nd ACM Symposium on Computational Fabrication, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. pp. 1–10. URL : <https://doi.org/10.1145/3213512.3213518>, doi :10.1145/3213512.3213518.
- [123] Kim, Y., Harders, M., Gassert, R., 2015. Identification of vibrotactile patterns encoding obstacle distance information. *IEEE Transactions on Haptics* 8. URL : <https://doi.org/10.1109/toh.2015.2415213>, doi :10.1109/toh.2015.2415213.
- [124] Kirman, J.H., 1974. Tactile apparent movement : The effects of interstimulus onset interval and stimulus duration. *Perception & Psychophysics* 15, 1–6. URL : <https://doi.org/10.3758/BF03205819>, doi :10.3758/BF03205819.
- [125] Kuroki, S., Watanabe, J., Nishida, S., 2017. Integration of vibrotactile frequency information beyond the mechanoreceptor channel and somatotopy. *Scientific Reports* 7, 2758. URL : <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02922-7>, doi :10.1038/s41598-017-02922-7.
- [126] Landry, S.P., Champoux, F., 2017. Musicians react faster and are better multisensory integrators. *Brain and Cognition* 111, 156–162. URL : <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2016.12.001>, doi :10.1016/j.bandc.2016.12.001.
- [127] Lechner, S.G., Lewin, G.R., 2013. Hairy sensation. *Physiology* 28, 142–150. URL : <https://doi.org/10.1152/physiol.00059.2012>, doi :10.1152/physiol.00059.2012.

- [128] Lee, S.C., Starner, T., 2010. Buzzwear : Alert perception in wearable tactile displays on the wrist, in : Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 433–442. URL : <https://doi.org/10.1145/1753326.1753392>, doi :10.1145/1753326.1753392.
- [129] Lee, Y.L., Crabtree, C.E., Norman, J.F., Bingham, G.P., 2008. Poor shape perception is the reason reaches-to-grasp are visually guided online. *Perception and Psychophysics* 70, 1032–1046. URL : <https://doi.org/10.3758/pp.70.6.1032>, doi :10.3758/pp.70.6.1032.
- [130] Leithinger, D., Ishii, H., 2010. Relief : A scalable actuated shape display, in : Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 221–222. URL : <https://doi.org/10.1145/1709886.1709928>, doi :10.1145/1709886.1709928.
- [131] Li, J., Jacobs, J., Chang, M., Hartmann, B., 2017. Direct and immediate drawing with cnc machines, in : Proceedings of the 1st Annual ACM Symposium on Computational Fabrication, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. pp. 1–2. URL : <https://doi.org/10.1145/3083157.3096344>, doi :10.1145/3083157.3096344.
- [132] Li, J., Yang, X., Tao, X., Tian, J., 2009. *User Interface, System Design*. Springer US, Boston, MA. URL : https://doi.org/10.1007/978-0-387-73003-5_286, doi :10.1007/978-0-387-73003-5_286.
- [133] Liao, Y.C., Chen, Y.L., Lo, J.Y., Liang, R.H., Chan, L., Chen, B.Y., 2016. Edgevib : Effective alphanumeric character output using a wrist-worn tactile display, in : Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 595–601. URL : <https://doi.org/10.1145/2984511.2984522>, doi :10.1145/2984511.2984522.
- [134] Lipari, N.G., Borst, C.W., 2014. Study of 2d vibration summing for improved intensity control in vibrotactile array rendering, in : *Bebis, G., Boyle, R., Parvin, B., Koracin, D., McMahan, R., Jerald, J., Zhang, H., Drucker, S.M., Kambhamettu, C., El Choubassi, M., Deng, Z., Carlson, M. (Eds.), Advances in Visual Computing*. Springer International Publishing, Cham, pp. 325–334.
- [135] Loucks, T.M.J., Ofori, E., Sosnoff, J.J., 2012. Force control under auditory feedback : Effector differences and audiomotor memory. *Perceptual and Motor Skills* 114, 915–935. URL : <https://doi.org/10.2466/24.25.27.pms.114.3.915-935>, doi :10.2466/24.25.27.pms.114.3.915-935.
- [136] Lundin Palmerius, K., Schönborn, K., 2016. Visualization of heat transfer using projector-based spatial augmented reality. *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics* , 407–417.
- [137] Luzhnica, G., Stein, S., Veas, E., Pammer, V., Williamson, J., Smith, R.M., 2017. Personalising vibrotactile displays through perceptual sensitivity adjustment, in : Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers,

- Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 66–73. URL : <https://doi.org/10.1145/3123021.3123029>, doi :10.1145/3123021.3123029.
- [138] Luzhnica, G., Veas, E., 2017. Vibrotactile patterns using sensitivity prioritisation, in : Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 74–81. URL : <https://doi.org/10.1145/3123021.3123032>, doi :10.1145/3123021.3123032.
- [139] Luzhnica, G., Veas, E., 2019. Optimising encoding for vibrotactile skin reading, in : Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 1–14. URL : <https://doi.org/10.1145/3290605.3300465>.
- [140] Luzhnica, G., Veas, E., Seim, C., 2018. Passive haptic learning for vibrotactile skin reading, in : Proceedings of the 2018 ACM International Symposium on Wearable Computers, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 40–43. URL : <https://doi.org/10.1145/3267242.3267271>, doi :10.1145/3267242.3267271.
- [141] Maeda, T., Kurahashi, T., 2019. Thermodule : Wearable and modular thermal feedback system based on a wireless platform. Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 2019 URL : <https://doi.org/10.1145/3311823.3311826>, doi :10.1145/3311823.3311826.
- [142] Mahns, D.A., Perkins, N.M., Sahai, V., Robinson, L., Rowe, M.J., 2006. Vibrotactile frequency discrimination in human hairy skin. *Journal of Neurophysiology* 95, 1442–1450. URL : <https://doi.org/10.1152/jn.00483.2005>, doi :10.1152/jn.00483.2005.
- [143] Malekipour, E., El-Mounayri, H., 2017. Defects, process parameters and signatures for online monitoring and control in powder-based additive manufacturing, in : Mechanics of Additive and Advanced Manufacturing, Volume 9. Springer International Publishing, pp. 83–90. URL : https://doi.org/10.1007/978-3-319-62834-9_12, doi :10.1007/978-3-319-62834-9_12.
- [144] Mani, M., Witherell, P., Jee, H., 2017. Design Rules for Additive Manufacturing : A Categorization, in : International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, pp. 1–10. URL : <https://doi.org/10.1115/DETC2017-68446>, doi :10.1115/DETC2017-68446. v001T02A035.
- [145] Markl, M., Körner, C., 2016. Multiscale modeling of powder bed-based additive manufacturing. *Annual Review of Materials Research* 46, 93–123. doi :10.1146/annurev-matsci-070115-032158.
- [146] Matscheko, M., Ferscha, A., Riener, A., Lehner, M., 2010. Tactor placement in wrist worn wearables, in : International Symposium on Wearable Computers (ISWC) 2010, IEEE. pp. 1–8. URL : <https://doi.org/10.1109/iswc.2010.5665867>, doi :10.1109/iswc.2010.5665867.
- [147] McLanders, M., Santomauro, C., Tran, J., Sanderson, P., 2014. Tactile displays of pulse oximetry in integrated and separated configurations. Proceedings of the

- Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting 58, 674–678. URL : <https://doi.org/10.1177/1541931214581158>, doi :10.1177/1541931214581158.
- [148] Mies, D., Marsden, W., Warde, S., 2016. Overview of additive manufacturing informatics : “a digital thread”. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation* 5, 114–142. URL : <https://doi.org/10.1186/s40192-016-0050-7>, doi :10.1186/s40192-016-0050-7.
- [149] Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A., Kishino, F., 1995. Augmented reality : a class of displays on the reality-virtuality continuum, in : Das, H. (Ed.), *Telemanipulator and Telepresence Technologies*, International Society for Optics and Photonics. SPIE. pp. 282 – 292. URL : <https://doi.org/10.1117/12.197321>.
- [150] Millar, G.C., Tabrizian, P., Petrasova, A., Petras, V., Harmon, B., Mitsova, H., Meetenmeyer, R.K., 2018. Tangible landscape : A hands-on method for teaching terrain analysis, in : *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 1–12. URL : <https://doi.org/10.1145/3173574.3173954>, doi :10.1145/3173574.3173954.
- [151] Miller, G.A., 1953. What is information measurement? *American Psychologist* 8, 3–11. URL : <https://doi.org/10.1037/h0057808>, doi :10.1037/h0057808.
- [152] Mitsuishi, M., Warisawa, S., Hatamura, Y., Nagao, T., Kramer, B., 1992. A user-friendly manufacturing system for hyper-environments. *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation* 1, 25–31. URL : <https://doi.org/10.1109/robot.1992.220339>, doi :10.1109/robot.1992.220339.
- [153] Miwa, T., Yonekawa, Y., 1974. Evaluation methods for vibrations. *Applied Acoustics* 7, 83–101. URL : [https://doi.org/10.1016/0003-682x\(74\)90025-5](https://doi.org/10.1016/0003-682x(74)90025-5), doi :10.1016/0003-682x(74)90025-5.
- [154] Morioka, M., Whitehouse, D.J., Griffin, M.J., 2008. Vibrotactile thresholds at the fingertip, volar forearm, large toe, and heel. *Somatosensory and Motor Research* 25, 101–112. URL : <https://doi.org/10.1080/08990220802045574>, doi :10.1080/08990220802045574.
- [155] Morrison, A., Knoche, H., Manresa-Yee, C., 2015. Designing a vibrotactile language for a wearable vest, in : Marcus, A. (Ed.), *Design, User Experience, and Usability : Users and Interactions*, Springer International Publishing, Cham. pp. 655–666.
- [156] Mueller, S., Lopes, P., Baudisch, P., 2012. Interactive construction : Interactive fabrication of functional mechanical devices, in : *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 599–606. URL : <https://doi.org/10.1145/2380116.2380191>, doi :10.1145/2380116.2380191.
- [157] Nakagaki, K., Follmer, S., Ishii, H., 2015. Lineform : Actuated curve interfaces for display, interaction, and constraint, in : *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 333–339. URL : <https://doi.org/10.1145/2807442.2807452>, doi :10.1145/2807442.2807452.

- [158] Nasir, T., 2009. Geo-sonf : Spatial sonification of contour maps, in : 2009 IEEE International Workshop on Haptic Audio visual Environments and Games, pp. 141–146. doi :10.1109/HAVE.2009.5356116.
- [159] Nassar, A.R., Reutzler, E.W., 2013. A proposed digital thread for additive manufacturing, in : 24th International SFF Symposium - An Additive Manufacturing Conference, pp. 19–43.
- [160] Navaraj, W.T., Núñez, C.G., Shakthivel, D., Vinciguerra, V., Labeau, F., Gregory, D.H., Dahiya, R., 2017. Nanowire FET based neural element for robotic tactile sensing skin. *Frontiers in Neuroscience* 11. URL : <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00501>, doi :10.3389/fnins.2017.00501.
- [161] Nesbitt, K., 2004. Ms-taxonomy : a conceptual framework for designing multi-sensory displays, in : Proceedings. Eighth International Conference on Information Visualisation, 2004. IV 2004., pp. 665–670. doi :10.1109/IV.2004.1320213.
- [162] Newcombe, N., Weisberg, S.M., Atit, K., Jacovina, M.E., Ormand, C., Shipley, T.F., 2015. The lay of the land : Sensing and representing topography. *The Baltic International Yearbook of Cognition, Logic and Communication* 10, 6.
- [163] Ng, G., Barralon, P., Dumont, G., Schwarz, S.K., Ansermino, J.M., 2007. Optimizing the tactile display of physiological information : vibro-tactile vs. electro-tactile stimulation, and forearm or wrist location, in : Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc, pp. 4202–4205. doi :10.1109/IEMBS.2007.4353263.
- [164] Ng, J.Y.C., Man, J.C.F., Fels, S., Dumont, G., Ansermino, J.M., 2005. An evaluation of a vibro-tactile display prototype for physiological monitoring. *Anesthesia and Analgesia* , 1719–1724 URL : <https://doi.org/10.1213/01.ane.0000184121.03150.62>, doi :10.1213/01.ane.0000184121.03150.62.
- [165] Nigay, L., Coutaz, J., 1997. Multifeature systems : The care properties and their impact on software design, in : *Multimedia Interfaces : Research and Applications*, AAAI Press. pp. 1–16.
- [166] Novich, S.D., Eagleman, D.M., 2015. Using space and time to encode vibrotactile information : toward an estimate of the skin’s achievable throughput. *Experimental Brain Research* 233, 2777–2788. URL : <https://doi.org/10.1007/s00221-015-4346-1>, doi :10.1007/s00221-015-4346-1.
- [167] Oakley, I., McGee, M.R., Brewster, S., Gray, P., 2000. Putting the feel in ‘look and feel’, in : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 415–422. URL : <https://doi.org/10.1145/332040.332467>, doi :10.1145/332040.332467.
- [168] Oakley, I., Yeongmi Kim, Junhun Lee, Jeha Ryu, 2006. Determining the feasibility of forearm mounted vibrotactile displays, in : 2006 14th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 27–34. doi :10.1109/HAPTIC.2006.1627079.
- [169] Ogrinc, M., Farkhatdinov, I., Walker, R., Burdet, E., 2018. Sensory integration of apparent motion speed and vibration magnitude. *IEEE Transactions on Haptics*

- 11, 455–463. URL : <https://doi.org/10.1109/toh.2017.2772232>, doi :10.1109/toh.2017.2772232.
- [170] Olwal, A., Lindfors, C., Gustafsson, J., Kjellberg, T., Mattsson, L., 2005. Astor : An autostereoscopic optical see-through augmented reality system, in : Proceedings of the 4th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, IEEE Computer Society, USA. p. 24–27. URL : <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2005.15>, doi :10.1109/ISMAR.2005.15.
- [171] Pacchierotti, C., Prattichizzo, D., Kuchenbecker, K.J., 2015. Displaying sensed tactile cues with a fingertip haptic device. *IEEE Transactions on Haptics* 8, 384–396. URL : <https://doi.org/10.1109/toh.2015.2445770>, doi :10.1109/toh.2015.2445770.
- [172] Panda, B., Paul, S.C., Hui, L.J., Tay, Y.W.D., Tan, M.J., 2017. Additive manufacturing of geopolymer for sustainable built environment. *Journal of Cleaner Production* 167, 281–288. doi :10.1016/j.jclepro.2017.08.165.
- [173] Panëels, S., Anastassova, M., Brunet, L., 2013. Tactiped : Easy prototyping of tactile patterns, in : Kotzé, P., Marsden, G., Lindgaard, G., Wesson, J., Winckler, M. (Eds.), *Human-Computer Interaction – INTERACT 2013*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 228–245.
- [174] Park, C., Yoon, J., Oh, S., Choi, S., 2020. Augmenting physical buttons with vibrotactile feedback for programmable feels, in : Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 924–937. URL : <https://doi.org/10.1145/3379337.3415837>, doi :10.1145/3379337.3415837.
- [175] Park, G., Cha, H., Choi, S., 2019. Haptic enchanters : Attachable and detachable vibrotactile modules and their advantages. *IEEE Transactions on Haptics* 12, 43–55. URL : <https://doi.org/10.1109/toh.2018.2859955>, doi :10.1109/toh.2018.2859955.
- [176] Park, G., Choi, S., 2011. Perceptual space of amplitude-modulated vibrotactile stimuli, in : 2011 IEEE World Haptics Conference, pp. 59–64. doi :10.1109/WHC.2011.5945462.
- [177] Pawling, R., Cannon, P.R., McGlone, F.P., Walker, S.C., 2017. C-tactile afferent stimulating touch carries a positive affective value. *PLOS ONE* 12, e0173457. URL : <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173457>, doi :10.1371/journal.pone.0173457.
- [178] Peiris, R.L., Peng, W., Chen, Z., Chan, L., Minamizawa, K., 2017. Thermovr : Exploring integrated thermal haptic feedback with head mounted displays, in : Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 5452–5456. URL : <https://doi.org/10.1145/3025453.3025824>, doi :10.1145/3025453.3025824.
- [179] Peng, H., Briggs, J., Wang, C.Y., Guo, K., Kider, J., Mueller, S., Baudisch, P., Guimbretière, F., 2018. Roma : Interactive fabrication with augmented reality

- and a robotic 3d printer, in : Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 1–12. URL : <https://doi.org/10.1145/3173574.3174153>, doi :10.1145/3173574.3174153.
- [180] Peng, H., Wu, R., Marschner, S., Guimbretière, F., 2016. On-the-fly print : Incremental printing while modelling, in : Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 887–896. URL : <https://doi.org/10.1145/2858036.2858106>, doi :10.1145/2858036.2858106.
- [181] Peng, H., Zoran, A., Guimbretière, F.V., 2015. D-coil : A hands-on approach to digital 3d models design, in : Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 1807–1815. URL : <https://doi.org/10.1145/2702123.2702381>, doi :10.1145/2702123.2702381.
- [182] Pescara, E., Phillipov, I., Beigl, M., 2019. Stocksense : A wrist-worn vibrotactile display for tracking volatile markets, in : Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 2019, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. pp. 1–4. URL : <https://doi.org/10.1145/3311823.3311834>, doi :10.1145/3311823.3311834.
- [183] Pielot, M., Oliveira, R.d., 2013. Peripheral vibro-tactile displays, in : Proceedings of the 15th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 1–10. URL : <https://doi.org/10.1145/2493190.2493197>, doi :10.1145/2493190.2493197.
- [184] Pietrzak, T., Crossan, A., Brewster, S., Martin, B., Pecci, I., 2009. Creating usable pin array tactons for nonvisual information. *IEEE Transactions on Haptics* 2, 61–72. URL : <https://doi.org/10.1109/toh.2009.6>, doi :10.1109/toh.2009.6.
- [185] Piper, B., Ratti, C., Ishii, H., 2002. Illuminating clay : A 3-d tangible interface for landscape analysis, in : Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 355–362. URL : <https://doi.org/10.1145/503376.503439>, doi :10.1145/503376.503439.
- [186] Ponche, R., 2013. Méthodologie de conception pour la fabrication additive, application à la projection de poudres. Ph.D. thesis. Ecole Centrale de Nantes. France.
- [187] Ponche, R., Kerbrat, O., Mognol, P., Hascoet, J.Y., 2014. A novel methodology of design for additive manufacturing applied to additive laser manufacturing process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 30, 389–398. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584513001026>, doi :<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2013.12.001>.
- [188] Poret, M., Ibarboure, S., Robine, M., Duc, E., Desainte-Catherine, M., Couture, N., Semal, C., 2020. Sonification for 3D Printing Process Monitoring, in : International Computer Music Conference, Santiago, Chile. pp. 1–8. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03118034>.

- [189] Provancher, W.R., Kuchenbecker, K.J., Niemeyer, G., Cutkosky, M.R., 2005. Perception of curvature and object motion via contact location feedback, in : Springer Tracts in Advanced Robotics. Springer Berlin Heidelberg, pp. 456–465. URL : https://doi.org/10.1007/11008941_49, doi :10.1007/11008941_49.
- [190] Puts, N.A.J., Edden, R.A.E., Muthukumaraswamy, S., Singh, K.D., McGonigle, D.J., 2019. Induced and evoked properties of vibrotactile adaptation in the primary somatosensory cortex. *Neural Plasticity* 2019, 1–9. URL : <https://doi.org/10.1155/2019/5464096>, doi :10.1155/2019/5464096.
- [191] Querard, V., 2019. Réalisation de pièces aéronautiques de grandes dimensions par fabrication additive WAAM. Ph.D. thesis. Ecole Centrale de Nantes. France.
- [192] Rabinowitz, W.M., Houtsma, A.J.M., Durlach, N.I., Delhorne, L.A., 1987. Multidimensional tactile displays : Identification of vibratory intensity, frequency, and contactor area. *The Journal of the Acoustical Society of America* 82, 1243–1252. URL : <https://doi.org/10.1121/1.395260>, doi :10.1121/1.395260.
- [193] Rahal, L., Cha, J., El Saddik, A., 2009. Continuous tactile perception for vibrotactile displays, in : 2009 IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments, pp. 86–91. doi :10.1109/ROSE.2009.5355986.
- [194] Ranasinghe, N., Jain, P., Tolley, D., Karwita, S., Yilei, S., Do, E.Y.L., 2016. Ambiotherm : Simulating ambient temperatures and wind conditions in vr environments, in : Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 85–86. URL : <https://doi.org/10.1145/2984751.2985712>, doi :10.1145/2984751.2985712.
- [195] Ranjbar, P., Stranneby, D., akner koler, C., Borg, E., 2016. Identification of vibrotactile morse code on abdomen and wrist. *International Journal of Engineering Technology and Scientific Innovation* 1, 351–366.
- [196] Rivers, A., Adams, A., Durand, F., 2012. Sculpting by numbers. *ACM Transactions on Graphics* 31, 1–7. URL : <https://doi.org/10.1145/2366145.2366176>, doi :10.1145/2366145.2366176.
- [197] Romagnoli, M., Fontana, F., Sarkar, R., 2011. Vibrotactile recognition by western and indian population groups of traditional musical scales played with the harmonium, in : Proceedings of the 6th International Conference on Haptic and Audio Interaction Design, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. p. 91–100. doi :10.1007/978-3-642-22950-3_10.
- [198] Rothenberg, M., Verrillo, R.T., Zahorian, S.A., Brachman, M.L., Bolanowski, S.J., 1977. Vibrotactile frequency for encoding a speech parameter. *The Journal of the Acoustical Society of America* 62, 1003–1012. URL : <https://doi.org/10.1121/1.381610>, doi :10.1121/1.381610.
- [199] Ryu, J., Chun, J., Park, G., Choi, S., Han, S.H., 2010. Vibrotactile feedback for information delivery in the vehicle. *IEEE Transactions on Haptics* 3, 138–149. URL : <https://doi.org/10.1109/toh.2010.1>, doi :10.1109/toh.2010.1.

- [200] San Martín, A., Kildal, J., 2019. Audio-visual ar to improve awareness of hazard zones around robots, in : Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 1–6. URL : <https://doi.org/10.1145/3290607.3312996>, doi :10.1145/3290607.3312996.
- [201] Sanders, M.S., McCormick, E.J., 1993. Human factors in engineering and design, 7th ed. Human factors in engineering and design, 7th ed., McGraw-Hill Book Company, New York, NY, England.
- [202] Sapir, E., 1929. A study in phonetic symbolism. *Journal of Experimental Psychology* 12, 225–239. URL : <https://doi.org/10.1037/h0070931>, doi :10.1037/h0070931.
- [203] Saraiji, M.Y., Peiris, R.L., Shen, L., Minamizawa, K., Tachi, S., 2018. Ambient : Facial thermal feedback in remotely operated applications, in : Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 1–4. URL : <https://doi.org/10.1145/3170427.3186483>, doi :10.1145/3170427.3186483.
- [204] Sarant, J.Z., Cowan, R.S., Blamey, P.J., Galvin, K.L., Clark, G.M., 1993. The effect of handedness in tactile speech perception. *J Rehabil Res Dev* 30, 423–435.
- [205] Schaack, S., Chernyshov, G., Ragozin, K., Tag, B., Peiris, R., Kunze, K., 2019. Haptic collar : Vibrotactile feedback around the neck for guidance applications, in : Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 2019, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. pp. 1–4. URL : <https://doi.org/10.1145/3311823.3311840>, doi :10.1145/3311823.3311840.
- [206] Schaffert, N., Janzen, T.B., Mattes, K., Thaut, M.H., 2019. A review on the relationship between sound and movement in sports and rehabilitation. *Frontiers in Psychology* 10, 244. URL : <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2019.00244>, doi :10.3389/fpsyg.2019.00244.
- [207] Schatzle, S., Weber, B., Leichtmann, B., 2017. Hands-free reading braille with a vibrotactile wristband, in : IADIS International Conference Interfaces and Human Computer Interaction - IHCI, pp. 35–45. URL : <http://www.iadisportal.org/digital-library/hands-free-reading-braille-with-a-vibrotactile-wristband>.
- [208] Schito, J., Fabrikant, S.I., 2018. Exploring maps by sounds : using parameter mapping sonification to make digital elevation models audible. *International Journal of Geographical Information Science* 32, 874–906. URL : <https://doi.org/10.1080/13658816.2017.1420192>, doi :10.1080/13658816.2017.1420192.
- [209] Schmidt, R., Ratto, M., 2013. Design-to-fabricate : Maker hardware requires maker software. *IEEE Computer Graphics and Applications* 33, 26–34. URL : <https://doi.org/10.1109/mcg.2013.90>, doi :10.1109/mcg.2013.90.
- [210] Schneider, O.S., Israr, A., MacLean, K.E., 2015. Tactile animation by direct manipulation of grid displays, in : Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, Association for Computing Machinery, New

- York, NY, USA. p. 21–30. URL : <https://doi.org/10.1145/2807442.2807470>, doi :10.1145/2807442.2807470.
- [211] Schuett, J.H., Winton, R.J., Batterman, J.M., Walker, B.N., 2014. Auditory weather reports : Demonstrating listener comprehension of five concurrent variables, in : Proceedings of the 9th Audio Mostly : A Conference on Interaction With Sound, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. pp. 1–7. URL : <https://doi.org/10.1145/2636879.2636898>, doi :10.1145/2636879.2636898.
- [212] Shah, V.A., Casadio, M., Scheidt, R.A., Mrotek, L.A., 2019a. Spatial and temporal influences on discrimination of vibrotactile stimuli on the arm. *Experimental Brain Research* 237, 2075–2086. URL : <https://doi.org/10.1007/s00221-019-05564-5>, doi :10.1007/s00221-019-05564-5.
- [213] Shah, V.A., Casadio, M., Scheidt, R.A., Mrotek, L.A., 2019b. Vibration propagation on the skin of the arm. *Applied Sciences* 9. URL : <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/20/4329>, doi :10.3390/app9204329.
- [214] Shaw, E., Roper, T., Nilsson, T., Lawson, G., Cobb, S.V., Miller, D., 2019. The heat is on : Exploring user behaviour in a multisensory virtual environment for fire evacuation, in : Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 1–13. URL : <https://doi.org/10.1145/3290605.3300856>, doi :10.1145/3290605.3300856.
- [215] Sheng, J., Balakrishnan, R., Singh, K., 2006. An interface for virtual 3d sculpting via physical proxy, in : Proceedings of the 4th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and Southeast Asia, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 213–220. URL : <https://doi.org/10.1145/1174429.1174467>, doi :10.1145/1174429.1174467.
- [216] Sherrick, C.E., 1985. A scale for rate of tactual vibration. *The Journal of the Acoustical Society of America* 78, 78–83. URL : <https://doi.org/10.1121/1.392457>, doi :10.1121/1.392457.
- [217] Sherrick, C.E., Cholewiak, R.W., Collins, A.A., 1990. The localization of low- and high-frequency vibrotactile stimuli. *The Journal of the Acoustical Society of America* 88, 169–179. URL : <https://doi.org/10.1121/1.399937>, doi :10.1121/1.399937.
- [218] Siu, A.F., Gonzalez, E.J., Yuan, S., Ginsberg, J.B., Follmer, S., 2018. Shapeshift : 2d spatial manipulation and self-actuation of tabletop shape displays for tangible and haptic interaction, in : Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 1–13. URL : <https://doi.org/10.1145/3173574.3173865>, doi :10.1145/3173574.3173865.
- [219] Sofia, K.O., Jones, L., 2013. Mechanical and psychophysical studies of surface wave propagation during vibrotactile stimulation. *IEEE Transactions on Haptics* 6, 320–329. URL : <https://doi.org/10.1109/toh.2013.1>, doi :10.1109/toh.2013.1.

- [220] Spector, F., Maurer, D., 2012. Making sense of scents : The colour and texture of odours. *Seeing and Perceiving* 25, 655–677. URL : <https://doi.org/10.1163/187847612x648800>, doi :10.1163/187847612x648800.
- [221] Spence, C., 2020. Temperature-based crossmodal correspondences : causes and consequences. *Multisensory Research* 33, 645–682. doi :10.1163/22134808-20191494.
- [222] Spence, C., Senkowski, D., Röder, B., 2009. Crossmodal processing. *Experimental Brain Research* 198, 107–111. URL : <https://doi.org/10.1007/s00221-009-1973-4>, doi :10.1007/s00221-009-1973-4.
- [223] Stone, R., Pahl, S., Boomsma, C., 2014. Exploiting gaming technologies to visualise dynamic thermal qualities of a domestic dwelling : Pilot study of an interactive virtual apartment, in : *BEHAVE'14 : 3rd European conference on behaviour and energy efficiency*, pp. 1–10.
- [224] Strohmeier, P., Hornbæk, K., 2017. Generating haptic textures with a vibrotactile actuator, in : *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 4994–5005. URL : <https://doi.org/10.1145/3025453.3025812>, doi :10.1145/3025453.3025812.
- [225] Stronks, H.C., Parker, D.J., Walker, J., Lieby, P., Barnes, N., 2015. The feasibility of coin motors for use in a vibrotactile display for the blind. *Artificial Organs* 39, 480–491. URL : <https://doi.org/10.1111/aor.12414>, doi :10.1111/aor.12414.
- [226] Stronks, H.C., Walker, J., Parker, D.J., Barnes, N., 2017. Training improves vibrotactile spatial acuity and intensity discrimination on the lower back using coin motors. *Artificial Organs* 41, 1059–1070. URL : <https://doi.org/10.1111/aor.12882>, doi :10.1111/aor.12882.
- [227] Strzys, M.P., Kapp, S., Thees, M., Klein, P., Lukowicz, P., Knierim, P., Schmidt, A., Kuhn, J., 2018. Physics holo.lab learning experience : using smartglasses for augmented reality labwork to foster the concepts of heat conduction, in : *European Journal of Physics*, IOP Publishing. p. 035703. URL : <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aaa8fb>, doi :10.1088/1361-6404/aaa8fb.
- [228] Summers, I.R., Dixon, P.R., Cooper, P.G., Gratton, D.A., Brown, B.H., Stevens, J.C., 1994. Vibrotactile and electrotactile perception of time-varying pulse trains. *The Journal of the Acoustical Society of America* 95, 1548–1558. URL : <https://doi.org/10.1121/1.408542>, doi :10.1121/1.408542.
- [229] Summers, I.R., Whybrow, J.J., Gratton, D.A., Milnes, P., Brown, B.H., Stevens, J.C., 2005. Tactile information transfer : A comparison of two stimulation sites. *The Journal of the Acoustical Society of America* 118, 2527–2534. URL : <https://doi.org/10.1121/1.2031979>, doi :10.1121/1.2031979.
- [230] Sweeny, T.D., Guzman-Martinez, E., Ortega, L., Grabowecky, M., Suzuki, S., 2012. Sounds exaggerate visual shape. *Cognition* 124, 194–200. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010027712000819>, doi :<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2012.04.009>.

- [231] Swerdfeger, B.A., Fernquist, J., Hazelton, T.W., MacLean, K.E., 2009. Exploring melodic variance in rhythmic haptic stimulus design, in : Proceedings of Graphics Interface 2009, Canadian Information Processing Society, CAN. p. 133–140.
- [232] Talbot, M., Cowan, W., 2009. On the audio representation of distance for blind users, in : Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 1839–1848. URL : <https://doi.org/10.1145/1518701.1518984>, doi :10.1145/1518701.1518984.
- [233] Talsma, D., Senkowski, D., Soto-Faraco, S., Woldorff, M.G., 2010. The multifaceted interplay between attention and multisensory integration. Trends in Cognitive Sciences 14, 400–410. URL : <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.06.008>, doi :10.1016/j.tics.2010.06.008.
- [234] Tamura, Y., Nakamura, H., 2009. Thermal display for scientific haptization of numerical simulations. Proceedings of the 16th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology , 261–262 URL : <https://doi.org/10.1145/1643928.1643995>, doi :10.1145/1643928.1643995.
- [235] Tan, H.Z., Durlach, N.I., Reed, C.M., Rabinowitz, W.M., 1999. Information transmission with a multifinger tactual display. Perception and Psychophysics 61, 993–1008. URL : <https://doi.org/10.3758/bf03207608>, doi :10.3758/bf03207608.
- [236] Tan, H.Z., Rabinowitz, W.M., Durlach, N.I., 1989. Analysis of a synthetic tadoma system as a multidimensional tactile display. The Journal of the Acoustical Society of America 86, 981–988. URL : <https://doi.org/10.1121/1.398733>, doi :10.1121/1.398733.
- [237] Tan, H.Z., Reed, C.M., Durlach, N.I., 2010. Optimum information transfer rates for communication through haptic and other sensory modalities. IEEE Transactions on Haptics 3, 98–108. URL : <https://doi.org/10.1109/toh.2009.46>, doi :10.1109/toh.2009.46.
- [238] Teibrich, A., Mueller, S., Guimbretière, F., Kovacs, R., Neubert, S., Baudisch, P., 2015. Patching physical objects, in : Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 83–91. URL : <https://doi.org/10.1145/2807442.2807467>, doi :10.1145/2807442.2807467.
- [239] Ternes, D., MacLean, K.E., 2008. Designing large sets of haptic icons with rhythm, in : Haptics : Perception, Devices and Scenarios. Springer Berlin Heidelberg, pp. 199–208. URL : https://doi.org/10.1007/978-3-540-69057-3_24, doi :10.1007/978-3-540-69057-3_24.
- [240] Tewell, J., Bird, J., Buchanan, G.R., 2017. Heat-nav : Using temperature changes as navigation cues, in : Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 1131–1135. URL : <https://doi.org/10.1145/3025453.3025965>, doi :10.1145/3025453.3025965.

- [241] Thomas Hermann, Andy Hunt, J.G.N., 2011. *The Sonification Handbook*. Logos Publishing House, Berlin. URL : <https://sonification.de/handbook/download/TheSonificationHandbook-HermannHuntNeuhoff-2011.pdf>.
- [242] Tommerdahl, M., Hester, K., Felix, E., Hollins, M., Favorov, O., Quibrera, P., Whitsel, B., 2005. Human vibrotactile frequency discriminative capacity after adaptation to 25 hz or 200 hz stimulation. *Brain Research* 1057, 1–9. URL : <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2005.04.031>, doi :10.1016/j.brainres.2005.04.031.
- [243] Traube, C., 2013. De la thermoception à la perception auditive : en quête de l'identité du son « froid ». *Les Cahiers de la Société québécoise de recherche en musique* 14, 9–15. URL : <https://doi.org/10.7202/1016193ar>, doi :10.7202/1016193ar.
- [244] Turcott, R., Chen, J., Castillo, P., Knott, B., Setiawan, W., Briggs, F., Klumb, K., Abnoui, F., Chakka, P., Lau, F., Israr, A., 2018. Efficient evaluation of coding strategies for transcutaneous language communication, in : *Haptics : Science, Technology, and Applications*. Springer International Publishing, pp. 600–611. URL : https://doi.org/10.1007/978-3-319-93399-3_51, doi :10.1007/978-3-319-93399-3_51.
- [245] Uva, A., Fiorentino, M., Monno, G., 2011. Augmented reality integration in product development, in : *Proceedings of the International conference on Innovative Methods in Product Design (IMProVe 2011)*, June 15th–17th, Venice, Italy, pp. 73–79.
- [246] Van Erp, J., Spape, M.M.A., 2003. Distilling the underlying dimensions of tactile melodies. *Psychology* .
- [247] Velasco, C., Beh, E.J., Le, T., Marmolejo-Ramos, F., 2018. The shapes associated with the concept of ‘sweet and sour’ foods. *Food Quality and Preference* 68, 250–257. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950329318302222>, doi :<https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2018.03.012>.
- [248] Velasco, C., Woods, A.T., Petit, O., Cheok, A.D., Spence, C., 2016. Crossmodal correspondences between taste and shape, and their implications for product packaging : A review. *Food Quality and Preference* 52, 17–26. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950329316300490>, doi :<https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2016.03.005>.
- [249] Verrillo, R.T., Bolanowski, S.J., Gescheider, G.A., 2002. Effect of aging on the subjective magnitude of vibration. *Somatosensory and Motor Research* 19, 238–244. URL : <https://doi.org/10.1080/0899022021000009161>, doi :10.1080/0899022021000009161.
- [250] Verrillo, R.T., Fraioli, A.J., Smith, R.L., 1969. Sensation magnitude of vibrotactile stimuli. *Perception and Psychophysics* 6, 366–372. URL : <https://doi.org/10.3758/bf03212793>, doi :10.3758/bf03212793.
- [251] Verrillo, R.T., Gescheider, G.A., Calman, B.G., Doren, C.L.V., 1983. Vibrotactile masking : Effects of one and two-site stimulation. *Perception and Psychophysics* 33, 379–387. URL : <https://doi.org/10.3758/bf03205886>, doi :10.3758/bf03205886.

- [252] Vogels, I.M., Kappers, A.M., Koenderink, J.J., 1999. Influence of shape on haptic curvature perception. *Acta Psychologica* 100, 267–289. URL : [https://doi.org/10.1016/s0001-6918\(98\)00041-9](https://doi.org/10.1016/s0001-6918(98)00041-9), doi :10.1016/s0001-6918(98)00041-9.
- [253] Vollmer, M., Möllmann, K.P., 2017. Teaching physics and understanding infrared thermal imaging, in : *ETOP 2017 Proceedings*, Optical Society of America. p. 104522C. URL : <http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ETOP-2017-104522C>.
- [254] Walker, B.N., Kramer, G., 2005a. Mappings and metaphors in auditory displays : An experimental assessment, in : *ACM Trans. Appl. Percept.*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 407–412. URL : <https://doi.org/10.1145/1101530.1101534>, doi :10.1145/1101530.1101534.
- [255] Walker, B.N., Kramer, G., 2005b. Sonification design and metaphors : Comments on walker and kramer, *icad 1996*. *ACM Trans. Appl. Percept.* 2, 413–417. URL : <https://doi.org/10.1145/1101530.1101535>, doi :10.1145/1101530.1101535.
- [256] Walker, S.P., Salisbury, J.K., 2003. Large haptic topographic maps : Marsview and the proxy graph algorithm, in : *Proceedings of the 2003 Symposium on Interactive 3D Graphics*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 83–92. URL : <https://doi.org/10.1145/641480.641499>, doi :10.1145/641480.641499.
- [257] Wan, C.Y., Wood, A.G., Reutens, D.C., Wilson, S.J., 2010. Congenital blindness leads to enhanced vibrotactile perception. *Neuropsychologia* 48, 631–635. URL : <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.10.001>, doi :10.1016/j.neuropsychologia.2009.10.001.
- [258] Wang, D., Peng, C., Afzal, N., Li, W., Wu, D., Zhang, Y., 2018a. Localization performance of multiple vibrotactile cues on both arms. *IEEE Transactions on Haptics* 11, 97–106. URL : <https://doi.org/10.1109/toh.2017.2742507>, doi :10.1109/toh.2017.2742507.
- [259] Wang, J., Erkoyuncu, J., Roy, R., 2018b. A conceptual design for smell based augmented reality : Case study in maintenance diagnosis. *Procedia CIRP* 78, 109–114. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118312472>, doi :<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.09.067>. 6th CIRP Global Web Conference – Envisaging the future manufacturing, design, technologies and systems in innovation era (CIRPe 2018).
- [260] Wang, Q.J., Spence, C., 2017. The role of pitch and tempo in sound-temperature crossmodal correspondences. *Multisensory Research* 30, 307–320. doi :10.1163/22134808-00002564.
- [261] Wang, Y., Millet, B., Smith, J.L., 2014. Informing the use of vibrotactile feedback for information communication : An analysis of user performance across different vibrotactile designs. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 58, 1859–1863. URL : <https://doi.org/10.1177/1541931214581389>, doi :10.1177/1541931214581389.

- [262] Weichel, C., Alexander, J., Karnik, A., Gellersen, H., 2015a. Spata : Spatio-tangible tools for fabrication-aware design, in : Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 189–196. URL : <https://doi.org/10.1145/2677199.2680576>, doi :10.1145/2677199.2680576.
- [263] Weichel, C., Hardy, J., Alexander, J., Gellersen, H., 2015b. Reform : Integrating physical and digital design through bidirectional fabrication, in : Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 93–102. URL : <https://doi.org/10.1145/2807442.2807451>, doi :10.1145/2807442.2807451.
- [264] Weichel, C., Lau, M., Kim, D., Villar, N., Gellersen, H.W., 2014. Mixfab : A mixed-reality environment for personal fabrication, in : Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 3855–3864. URL : <https://doi.org/10.1145/2556288.2557090>, doi :10.1145/2556288.2557090.
- [265] Weinstein, S., 1968. Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex and laterality. *The skin senses* , 195–222 URL : <https://ci.nii.ac.jp/naid/10027636839/en/>.
- [266] Weisenberger, J.M., 1986. Sensitivity to amplitude-modulated vibrotactile signals. *The Journal of the Acoustical Society of America* 80, 1707–1715. URL : <https://doi.org/10.1121/1.394283>, doi :10.1121/1.394283.
- [267] Wiberg, A., Persson, J., Olvander, J., 2019. Design for additive manufacturing – a review of available design methods and software, in : Volume 925, Issue6 : Rapid Prototyping Journal, EleraldInsight. pp. 1080–1094. URL : <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2018-0262>, doi :10.1108/RPJ-10-2018-0262.
- [268] Willis, K.D., Xu, C., Wu, K.J., Levin, G., Gross, M.D., 2010. Interactive fabrication : New interfaces for digital fabrication, in : Proceedings of the Fifth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 69–72. URL : <https://doi.org/10.1145/1935701.1935716>, doi :10.1145/1935701.1935716.
- [269] Wilson, G., Halvey, M., Brewster, S.A., Hughes, S.A., 2011. Some like it hot : Thermal feedback for mobile devices, in : Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 2555–2564. URL : <https://doi.org/10.1145/1978942.1979316>, doi :10.1145/1978942.1979316.
- [270] Wnuk, E., de Valk, J.M., Huisman, J.L.A., Majid, A., 2017. Hot and cold smells : Odor-temperature associations across cultures. *Frontiers in Psychology* 8, 1373. URL : <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2017.01373>, doi :10.3389/fpsyg.2017.01373.
- [271] Wurhofer, D., Meneweger, T., Fuchsberger, V., Tscheligi, M., 2018. Reflections on operators’ and maintenance engineers’ experiences of smart factories, in : Proceedings of the 2018 ACM Conference on Supporting Groupwork, Association

- for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 284–296. URL : <https://doi.org/10.1145/3148330.3148349>, doi :10.1145/3148330.3148349.
- [272] Yamaoka, J., Kakehi, Y., 2016. Mirageprinter : Interactive fabrication on a 3d printer with a mid-air display, in : ACM SIGGRAPH 2016 Talks, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. pp. 1–2. URL : <https://doi.org/10.1145/2897839.2927436>, doi :10.1145/2897839.2927436.
- [273] Yampolskiy, M., Skjellum, A., Kretzschmar, M., Overfelt, R.A., Sloan, K.R., Yasinisac, A., 2016. Using 3d printers as weapons. *Int. J. Crit. Infrastruct. Prot.* 14, 58–71. URL : <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2015.12.004>, doi :10.1016/j.ijcip.2015.12.004.
- [274] Yavari, M.R., Cole, K.D., Rao, P.K., 2019. Design rules for additive manufacturing – understanding the fundamental thermal phenomena to reduce scrap. *Procedia Manufacturing* 33, 375–382. URL : <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.04.046>, doi :10.1016/j.promfg.2019.04.046.
- [275] Yue, Y.T., Zhang, X., Yang, Y., Ren, G., Choi, Y.K., Wang, W., 2017. Wiredraw : 3d wire sculpturing guided with mixed reality, in : Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 3693–3704. URL : <https://doi.org/10.1145/3025453.3025792>, doi :10.1145/3025453.3025792.
- [276] Zhang, B., Goel, A., Ghalsasi, O., Anand, S., 2019. CAD-based design and pre-processing tools for additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems* 52, 227–241. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.03.005>, doi :10.1016/j.jmsy.2019.03.005.
- [277] Zhao, S., Israr, A., Fenner, M., Klatzky, R.L., 2017. Intermanual apparent tactile motion and its extension to 3d interactions. *IEEE Transactions on Haptics* 10, 555–566. doi :10.1109/TOH.2017.2678502.
- [278] Zhao, S., Israr, A., Lau, F., Abnoui, F., 2018. Coding tactile symbols for phonemic communication, in : Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 1–13. URL : <https://doi.org/10.1145/3173574.3173966>, doi :10.1145/3173574.3173966.
- [279] Zoran, A., Paradiso, J.A., 2013. Freed : A freehand digital sculpting tool, in : Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. p. 2613–2616. URL : <https://doi.org/10.1145/2470654.2481361>, doi :10.1145/2470654.2481361.

Perception d'informations par des retours vibrotactiles pour une mise en œuvre plus flexible des procédés robotisés de fabrication additive.

Résumé : Cette thèse montre que « l'interaction directe d'un opérateur au cours de la mise en œuvre du procédé industriel de fabrication additive pour améliorer la fabrication est possible ». Aujourd'hui, la mise en œuvre de la Chaîne Numérique ne permet pas de réagir naturellement à l'apparition d'un aléa de fabrication. Or, il apparaît que la fabrication à la demande de produits engendre souvent des aléas durant le processus. La première section du mémoire est consacrée à un état de l'art sur la Fabrication Interactive à partir duquel nous proposons une boucle d'interaction Humain-Robot. Cette boucle permet l'interruption du processus automatique pour apporter une modification locale, directement depuis la cellule de fabrication. Un des verrous à lever est de permettre la perception des valeurs des critères de la fabrication par l'opérateur en temps réel et en mobilité. Pour cela, nous avons exploré les retours vibrotactiles. Ainsi, dans la seconde section du mémoire est présentée TacTool, une application web conçue et réalisée afin d'aider la conception de systèmes vibrotactiles. À partir d'une combinaison de 21 caractéristiques, sélectionnées interactivement et par catégories, l'utilisateur se voit proposer des recommandations sur la conception du dispositif de communication vibrotactile caractérisé. Ces recommandations sont sélectionnées dans un ensemble de 181 recommandations issues de la revue de 97 références comprises entre 1960 et 2020. Dans la dernière section, grâce à la conception d'un bracelet vibrotactile appelé ViMA (Vibrotactile Monitoring Armband), nous avons conçu 20 items vibrotactiles, dont nous avons évalué la capacité à être reconnus. Ainsi, cette évaluation et une enquête auprès de 27 experts de la fabrication additive ont permis de définir 18 symboles vibrotactiles permettant d'informer un opérateur pour la surveillance des procédés automatisés de fabrication additive.

Mots-clés : Interface vibrotactile, Fabrication additive, Réalité augmentée, Interaction Humain-Machine, Chaîne Numérique, Industrie 4.0

Vibrotactile Tactualisation of Information for a More Flexible Use of Additive Manufacturing Robot Cell

Abstract: This PhD Thesis shows that “the direct interaction of an operator during the execution of an industrial additive manufacturing process to improve the fabrication is possible.” Currently, the execution of the Digital Thread for additive manufacturing does not allow to naturally react to the apparition of a manufacturing issue. Yet, it appears that the fabrication of products on demand often generates issues with the process. The first part of this dissertation is focus on a state-of-the-art on the Interactive Fabrication from which we are proposing a human robot interaction loop. This loop allows the interruption of the manufacturing process to carry out localizer modification, directly from the manufacturing robot unit. One of the challenges to solve to allow this interaction is to provide an interface that allows operators to monitor values of different criteria linked to the fabrication in real time while being mobile. Thus, the second part of the dissertation presents TacTool, a web application designed and implemented to help with the design of vibrotactile displays. From the combination of 21 features, interactively selected from 4 categories, the user is then provided with guidelines about the conception of a vibrotactile communication display that matches his or her specifications. These guidelines are picked from a set of 181 guidelines from a review of 97 references issued between 1960 and 2020. In the last part, thanks to the conception of a vibrotactile armband called ViMA (Vibrotactile Monitoring Armband), we have created 20 vibrotactile items for which we evaluated their capacity to be recognized by a group of users. Thereby, this evaluation and a survey with 27 experts of the additive manufacturing processes result in the creation of 18 vibrotactile symbols that can be used by an operator to monitor of automatized additive manufacturing process.

Keywords: Vibrotactile display, Additive Manufacturing, Augmented Reality, Human Computer Interaction, Digital Thread, Industry 4.0