



HAL
open science

Informations vibrotactiles pour l'aide à la navigation et la gestion des contacts avec l'environnement

Cynthia Mandil

► **To cite this version:**

Cynthia Mandil. Informations vibrotactiles pour l'aide à la navigation et la gestion des contacts avec l'environnement. Education. Normandie Université, 2017. Français. NNT : 2017NORMC238 . tel-01693329

HAL Id: tel-01693329

<https://theses.hal.science/tel-01693329>

Submitted on 26 Jan 2018

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.

THESE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité Sciences et technologies des activités physiques

Préparée au sein de l'Université de Caen Normandie

Informations vibrotactiles pour l'aide à la navigation et la gestion des contacts avec l'environnement

**Présentée et soutenue par
Cynthia MANDIL**

Thèse soutenue publiquement le 26 octobre 2017

devant le jury composé de

| | | |
|----------------------------|---|---------------|
| Monsieur Nicolas BENGUIGUI | Professeur des universités, Université de Caen Normandie | Directeur |
| Monsieur Vincent HAYWARD | Professeur des universités, Université Pierre et Marie Curie, Paris | Rapporteur |
| Monsieur François JOUEN | Professeur des universités, Ecole Pratique des Hautes Etudes, Paris | Examineur |
| Madame Laure LEJEUNE | Maitre de conférence, Université de Caen Normandie | Co-encadrante |
| Madame Marion LUYAT | Professeur des universités, Université de Lille 3 | Rapporteur |
| Madame Edwige PISSALOUX | Professeur des universités, Université de Rouen | Examineur |

Thèse dirigée par Nicolas BENGUIGUI et co-encadrée par Laure LEJEUNE, Centre d'Etude Sport et Actions Motrices

Invité : Lieutenant-Colonel Emmanuel GARDINETTI, Direction Générale de l'Armement, Paris



Avant-propos

Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'un cofinancement par la Direction Générale de l'Armement et le Conseil Régional de Basse-Normandie. Je tiens à remercier ces institutions pour ce soutien financier m'ayant permis de réaliser mes travaux dans de bonnes conditions et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce projet de recherche.

Je tiens à exprimer mes remerciements et ma reconnaissance à l'ensemble des membres du jury, Vincent Hayward, François Jouen, Edwige Pissaloux et Marion Luyat, qui me font l'honneur d'expertiser de ce travail.

Cette thèse a été dirigée et co-encadrée par Nicolas Benguigui et Laure Lejeune que je remercie chaleureusement. Les différents travaux de recherche que j'ai effectués à vos côtés, de la Licence au Master, sont à l'origine de cette envie de mener une thèse. Je vous remercie tous les deux d'avoir accepté de poursuivre cette collaboration quatre années de plus et de m'avoir accordé votre confiance pour mener à bien ce travail doctoral.

Je tiens également à remercier le laboratoire CesamS, au sein duquel j'ai réalisé cette thèse, ainsi qu'à l'ensemble de ces membres, pour m'avoir permis à de nombreuses reprises de présenter mon travail, en interne ou lors de conférences. Je remercie plus particulièrement Christophe Durand, directeur du laboratoire et de l'Ecole Doctorale, d'avoir veillé au bon déroulement de ce travail de recherche. Merci également à Elise et Bruno, pour leurs conseils et leur implication à différents stades de la thèse.

Ce travail de recherche n'aurait pas été possible sans l'implication de plusieurs ingénieurs ayant contribué au développement du dispositif expérimental : Alexandre François et Nicolas Lefèvre du CIREVE, ainsi que Patrick Fenouil et Guillaume Hector. Je les remercie pour la qualité et l'ampleur du travail accompli, et leur disponibilité tout au long de ces quatre années afin d'assurer la maintenance et le bon fonctionnement du dispositif.

J'ai également une pensée chaleureuse pour les doctorants que j'ai côtoyés durant ces quelques années. Les moments passés à leur côté, au bureau ou en dehors, font partie des excellents souvenirs que je garderai de ces années de doctorat. Merci à Maroua, en particulier, dont la présence et l'oreille attentive auront été précieuses à de nombreux moments. De nos cinq années d'études et de recherche passées ensemble restera, j'espère, une belle amitié.

Merci à ma famille, et en particulier mes parents, qui m'ont toujours encouragé et donné les moyens de m'épanouir et qui m'ont fait pleinement confiance pour mener à bien ces longues études.

Je me dois également d'adresser quelques mots à mes amis pour leurs nombreux encouragements et leurs paroles réconfortantes. Merci à vous tous d'avoir apporté un peu de folie à ces années studieuses.

Enfin, merci à celui qui partage mon quotidien et qui a été d'une patience et d'un soutien infaillible durant ce long et difficile travail. Gilles, ta simple présence, mais également tes nombreux conseils et encouragements, m'auront permis de conserver moral et confiance et d'aller au bout de ce projet.

La fin de cette thèse marque également la fin d'un chapitre long de neuf années passées à étudier (entre autres) à l'UFR STAPS de Caen et marquées par de très belles rencontres. Encore, merci.

Informations vibrotactiles pour la régulation d'approches et la gestion des contacts avec l'environnement

Ce travail de recherche vise à étudier la transmission d'informations vibrotactiles pour l'aide à la navigation et plus particulièrement pour améliorer la régulation des phases d'approche et la gestion des contacts avec l'environnement. L'un des défis majeurs de ce domaine de recherche est de comprendre comment rendre compte d'informations, parfois complexes, avec une modalité sensorielle n'étant pas naturellement utilisée pour les traiter. Ainsi, ce travail doctoral avait pour but de montrer la possibilité de suppléer la vision et à spécifier les caractéristiques de la stimulation vibrotactile qui influencent l'accès aux informations d'approche. Les différentes études qui étayaient cette thèse ont été réalisées à partir d'un dispositif expérimental couplant un environnement virtuel et un dispositif tactile comprenant différents vibrateurs placés à la surface de la peau. Les deux premiers chapitres expérimentaux se sont appuyés sur des tâches d'estimation de temps de pré-contact (*time-to-contact*, TTC) classiquement utilisées pour étudier les processus visuels mis en jeu dans la régulation des situations d'approche. Le premier chapitre expérimental (expériences 1, 2 et 3) constituait une étude préliminaire qui a notamment montré que le jugement était plus précis lorsque le dispositif tactile renvoyait des informations concernant la distance d'approche (par rapport à des informations sur la taille angulaire). Les résultats du second chapitre expérimental (expériences 4 et 5) ont montré que la modalité tactile permettait d'estimer le TTC mais de manière moins précise que la modalité visuelle. Toutefois, lorsque la modalité visuelle est occultée, transmettre des informations tactiles durant la période d'occultation permet d'améliorer la précision du jugement. Le dernier chapitre expérimental (expériences 6 et 7) s'est intéressé plus précisément à l'influence des informations vibrotactiles sur la régulation d'une approche au sol dans une situation simulée d'atterrissage en hélicoptère. Les deux expérimentations ont montré que l'utilisation d'informations tactiles permettait une diminution significative de la vitesse de contact au sol lorsque l'environnement visuel était dégradé et que cette diminution dépendait de la variable informationnelle transmise par le dispositif. Au final, les résultats de ce travail de recherche sont discutés au regard des théories fondamentales sur la perception et l'action. Ils permettent de montrer comment des informations d'approche peuvent être perçues à travers la modalité tactile et ainsi suppléer la vision lorsqu'elle est dégradée.

Mot clés – Perception, dispositifs tactiles, approche écologique, interfaces homme-machine, multimodalité, navigation.

ABSTRACT

Vibrotactile information for approach regulation and making contacts

The purpose of this doctoral research was to study vibrotactile information in navigation tasks, especially for approach regulation. One of the main issues in this research area is to find out how to specify complex information through a sensory modality that is usually unused. Thus, this work aimed at demonstrating the possibility to supply vision with tactile information and at specifying the characteristics of the vibrotactile stimulation that allow access to the information. The different studies have been carried out with an experimental display coupling a virtual environment and a tactile display consisting of several actuators placed on the skin. The first two empirical chapters were based on time-to-contact (TTC) judgment tasks, a paradigm generally used to study visual processes involved in approach situations. The first experimental chapter (experiments 1, 2 and 3) was a preliminary study, which showed that TTC estimation were more precise when the tactile display conveyed information about the distance to the target (compared to information about its angular size). The results of the second chapter (experiments 4 and 5) showed that TTC estimation was less accurate with tactile information compared to vision. Nevertheless, conveying tactile information when visual information was occluded significantly improved time-to-contact estimation. In the last chapter of this thesis, we focused on the influence of vibrotactile information on the regulation of a ground approach with a virtual situation of landing with a helicopter. We showed that tactile information reduced significantly the impact velocity when the visual environment was degraded (experiment 6 and 7). Moreover, the results showed that this decrease of velocity depended on the variable conveyed by the tactile display. Finally, the results of this work are discussed regarding fundamental theories about perception and action. Overall, it shows that approach information can be perceived through the tactile modality and thus supply vision in degraded environment.

Key words – Perception, tactile displays, ecological approach, human-machine interfaces, multimodality, navigation.

Table des matières

| | |
|-----------------------|----|
| Introduction générale | 11 |
|-----------------------|----|

PARTIE I : CADRE THEORIQUE

| | |
|--|----|
| Chapitre 1 – La peau, une interface de communication | 18 |
|--|----|

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Introduction | 19 |
| 2 | Mécanismes perceptifs de la modalité tactile | 20 |
| 2.1 | <i>Aspects neurophysiologiques</i> | 20 |
| 2.1.1 | Structure de la peau | 20 |
| 2.1.2 | Caractéristiques des mécanorécepteurs | 22 |
| 2.2 | <i>Psychophysique de la perception vibrotactile</i> | 24 |
| 2.2.1 | Discrimination spatiale | 24 |
| 2.2.2 | Facteurs spatiotemporels influençant la perception des stimulations vibrotactiles | 28 |
| 2.3 | <i>Avantages de la modalité tactile comme interface de communication</i> | 32 |
| 3 | Principes de fonctionnement généraux des dispositifs vibrotactiles | 34 |
| 3.1 | <i>Considérations matérielles</i> | 34 |
| 3.2 | <i>Caractéristiques physiques de la stimulation</i> | 36 |
| 3.3 | <i>Quelques exemples de dispositifs classiques</i> | 38 |
| 3.4 | <i>Contextes et limites d'utilisation des dispositifs vibrotactiles</i> | 40 |
| 3.4.1 | Handicap sensoriel | 40 |
| 3.4.2 | Navigation et orientation | 41 |
| 3.4.3 | Activités physiques | 42 |
| 3.4.4 | Réalité virtuelle et augmentée | 42 |
| 3.4.5 | Interfaces mobiles et multimédia | 43 |
| 3.5 | <i>De la substitution sensorielle à la suppléance perceptive</i> | 44 |
| 4 | Principes généraux de codage de l'information tactile | 47 |
| 4.1 | <i>Paramètres utilisés pour coder l'information</i> | 48 |
| 4.1.1 | Intensité | 48 |
| 4.1.2 | Localisation | 49 |
| 4.1.3 | Durée | 49 |
| 4.1.4 | Rythmes et caractéristiques temporelles | 49 |
| 4.1.5 | Patrons spatiotemporels | 50 |
| 4.2 | <i>Différents types d'informations tactiles</i> | 51 |
| 4.2.1 | Communication | 51 |
| 4.2.2 | Signaux d'alerte | 51 |
| 4.2.3 | Informations directionnelles | 52 |
| 4.2.4 | Informations codées | 52 |

Chapitre 2 – Perception et régulation des situations d'approche _____ 54

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduction | 55 |
| 2 | Situations d'approche : définition et régulation perceptivo-motrice | 56 |
| 2.1 | <i>L'approche écologique de la perception et de l'action</i> | 56 |
| 2.1.1 | Invariants : l'information du point de vue de l'environnement | 57 |
| 2.1.2 | Affordances : l'information du point de vue de l'observateur | 58 |
| 2.1.3 | Lois de contrôle : le couplage perception-action | 59 |
| 2.2 | <i>Définition et caractéristiques des situations d'approche</i> | 60 |
| 2.3 | <i>Variables impliquées dans la régulation d'une approche</i> | 61 |
| 2.3.1 | L'estimation du TTC à partir de la variable tau (τ) | 62 |
| 2.3.2 | La régulation de la décélération à partir de la variable optique τ | 65 |
| 2.3.3 | Variables liées à la texture du sol | 67 |
| 3 | Principes de codage des informations d'approche | 70 |
| 3.1 | <i>Codage de l'information à l'aide d'un seul vibreur : rythme et intensité comme paramètres privilégiés</i> | 70 |
| 3.1.1 | Principes de codage basés sur les caractéristiques temporelles et le rythme de vibration | 71 |
| 3.1.2 | Principes de codage basés sur l'intensité | 75 |
| 3.1.3 | Comparaison entre les paramètres mobilisant un seul vibreur | 76 |
| 3.2 | <i>Codage de l'information à l'aide de plusieurs vibreurs : les patrons spatiotemporels</i> | 80 |
| 3.2.1 | Une définition arbitraire du patron de stimulation | 81 |
| 3.2.2 | L'approche écologique comme support pour la définition des patrons de stimulation | 85 |
| 4 | Intégration multisensorielle et dispositifs vibrotactiles | 88 |
| 4.1 | <i>Partage des ressources attentionnelles entre les modalités sensorielles</i> | 89 |
| 4.2 | <i>Processus intermodaux</i> | 91 |

Problématique générale _____ 94

PARTIE II : ETUDES EXPERIMENTALES

Chapitre 3 – Principes généraux des dispositifs expérimentaux utilisés _____ 100

| | | |
|----------|---|------------|
| 1 | Application n°1 : estimation du temps de pré-contact | 102 |
| 2 | Application n°2 : régulation d'approche au sol | 103 |
| 3 | Dispositif vibrotactile | 104 |
| 3.1 | <i>Matériel</i> | 104 |
| 3.2 | <i>Précision temporelle des stimulations</i> | 105 |

Chapitre 4 – Effet des paramètres de la stimulation et du type d'approche sur le jugement de TTC _____ 109

| | | |
|----------|--|------------|
| 1 | Introduction | 110 |
| 2 | Expérience 1 : effet de l'écartement des vibrateurs et de la continuité de la stimulation sur le jugement de TTC pour des approches radiales | 113 |
| 2.1 | <i>Méthode expérimentale</i> | 113 |
| 2.1.1 | Participants | 113 |
| 2.1.2 | Caractéristiques générales de tâches | 113 |
| 2.1.3 | Matériel | 114 |
| 2.2 | <i>Procédure</i> | 117 |
| 2.3 | <i>Analyses statistiques</i> | 118 |
| 2.4 | <i>Résultats</i> | 119 |
| 2.4.1 | Discussion | 122 |
| 3 | Expérience 2 : effet de l'écartement des vibrateurs et de la continuité de la stimulation sur le jugement de TTC pour des approches tangentielles | 124 |
| 3.1 | <i>Methodologie expérimentale</i> | 124 |
| 3.1.1 | Caractéristiques générales de la tâche | 124 |
| 3.1.2 | Matériel | 125 |
| 3.1.3 | Analyses statistiques | 126 |
| 3.2 | <i>Résultats</i> | 126 |
| 3.2.1 | Discussion | 129 |
| 4 | Expérience 3 : précision du jugement de TTC selon le type d'approche simulé (radiale vs tangentielle) | 131 |
| 4.1 | <i>Méthode expérimentale</i> | 131 |
| 4.1.1 | Participants | 131 |
| 4.1.2 | Caractéristiques générales de la tâche | 131 |
| 4.1.3 | Matériel | 132 |
| 4.1.4 | Procédure | 132 |
| 4.1.5 | Analyses statistiques | 132 |
| 4.1.6 | Résultats | 133 |
| 4.2 | <i>Discussion</i> | 135 |

Chapitre 5 – Comparaison et combinaison d'informations visuelles et tactiles pour le jugement de TTC _____ 138

| | | |
|----------|---|------------|
| 1 | Introduction | 139 |
| 2 | Expérience 4 : précision d'un jugement de TTC réalisé à partir d'informations visuelles, tactiles ou bimodales | 141 |
| 2.1 | <i>Méthode expérimentale</i> | 141 |
| 2.1.1 | Participants | 141 |
| 2.1.2 | Caractéristiques générales de la tâche | 141 |
| 2.1.3 | Matériel | 141 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 2.1.4 | Procédure | 144 |
| 2.1.5 | Analyses statistiques | 146 |
| 2.2 | Résultats | 146 |
| 2.2.1 | Erreur constante (EC) | 146 |
| 2.2.2 | Erreur absolue (EA) | 149 |
| 2.2.3 | Erreur variable (EV) | 151 |
| 2.3 | Discussion | 153 |
| 3 | Expérience 5 : utilisation des informations tactiles pour suppléer la vision durant une occultation | 157 |
| 3.1 | Méthode expérimentale | 157 |
| 3.1.1 | Participants | 157 |
| 3.1.2 | Caractéristiques cinématiques de la tâche | 158 |
| 3.1.3 | Procédure | 158 |
| 3.1.4 | Analyses statistiques | 159 |
| 3.2 | Résultats | 160 |
| 3.2.1 | Erreur constante (EC) | 160 |
| 3.2.2 | Erreur absolue | 161 |
| 3.2.3 | Erreur variable | 162 |
| 3.3 | Discussion | 163 |

Chapitre 6 – Informations tactiles pour la régulation d’une approche lors d’un atterrissage simulé en hélicoptère ____ 165

| | | |
|------------|--|------------|
| 1 | Introduction | 166 |
| 2 | Expérience 6 : régulation d’un atterrissage simulé en hélicoptère à partir d’informations tactiles variant selon différents sens de stimulation | 167 |
| 2.1 | Méthode expérimentale | 168 |
| 2.1.1 | Participants | 168 |
| 2.1.2 | Caractéristiques générales de la tâche | 168 |
| 2.1.3 | Matériel | 168 |
| 2.1.4 | Procédure | 170 |
| 2.1.5 | Analyses statistiques | 173 |
| 2.2 | Résultats | 174 |
| 2.2.1 | Vitesse d’impact au sol | 174 |
| 2.2.2 | Vitesse moyenne | 177 |
| 2.3 | Discussion | 180 |
| 3 | Expérience 7 : effet de différentes variables informationnelles sur la régulation d’un atterrissage simulé en hélicoptère | 184 |
| 3.1 | Méthode expérimentale | 185 |
| 3.1.1 | Participants | 185 |
| 3.1.2 | Caractéristiques générales de la tâche | 185 |
| 3.1.3 | Matériel | 186 |
| 3.1.4 | Procédure | 188 |
| 3.1.5 | Analyses statistiques | 189 |
| 3.2 | Résultats | 190 |
| 3.2.1 | Vitesse d’impact | 190 |
| 3.2.2 | Vitesse moyenne | 192 |
| 3.2.3 | Analyses complémentaires | 193 |
| 3.3 | Discussion | 197 |

| | |
|---|------------|
| Discussion générale | 199 |
| 1 Contexte et objectifs de la thèse | 199 |
| 2 Contributions de ce travail de recherche dans le domaine des interfaces vibrotactiles | 200 |
| 3 Conclusion et perspectives de recherche | 206 |
| Références bibliographiques | 208 |
| Annexes | 222 |
| Annexe n°I : Retranscription de l'entretien avec le pilote d'hélicoptère du SAMU 61 – CHIR d'Alençon (14/02/2014) | 223 |
| Annexe n°2 II : Formulaire de consentement type | 235 |
| Table des figures | 236 |

Introduction générale

Très tôt dans le développement, le sens du toucher permet au bébé, et même au fœtus, d'appréhender les propriétés physiques de son environnement, d'apprécier les différentes textures, la forme et la rigidité des objets qui l'entourent. En l'absence d'information visuelle, la modalité tactile est d'ailleurs naturellement utilisée pour percevoir la disposition de l'environnement proche et éviter les contacts avec des obstacles. Cette fonction exploratoire à laquelle participe la modalité tactile est finement couplée à l'acte moteur. Gibson (1962) proposera de l'appeler « toucher actif » et de la dissocier du toucher passif : la sensibilité tactile aux stimuli émanant de l'environnement, celle qui nous permet de sentir le sens du vent à la surface de sa peau ou percevoir une tape sur l'épaule comme une invitation à se retourner. Les premiers travaux sur le « sens du toucher » ne faisaient pas cette distinction et nombre d'études en physiologie sensorielle et en psychophysique furent ainsi dédiées à la sensibilité cutanée (Weber, 1934).

Les travaux de Geldard (1957, 1960) ont été précurseurs dans l'utilisation de ce canal sensoriel pour communiquer des informations. Dans un premier article, Geldard (1957) faisait état de la multitude de signaux auxquels sont sensibles les récepteurs cutanés (chimiques, thermiques, électriques et mécaniques). Les stimuli mécaniques (vibrations) lui apparaissaient cependant comme la meilleure propriété de la modalité tactile à exploiter pour communiquer des informations, en raison notamment de la rapidité de traitement des stimuli et d'un seuil de douleur élevé. Ainsi, il proposa le premier dispositif de substitution sensorielle (Vibratese) qui exploitait les vibrations naturellement émises par la voix pour communiquer avec des personnes atteintes de déficience auditive. De manière générale, la substitution sensorielle désigne le principe consistant à transmettre, par une modalité sensorielle (modalité sortante), des informations naturellement et donc habituellement perçues par une modalité sensorielle différente (modalité entrante ; Lenay, Canu, & Villon, 1997). Comme modalité sortante, la modalité tactile est un choix pertinent dans la mesure où elle est jusqu'alors très peu utilisée, laissant inexploitée une partie des capacités du système sensoriel. Ainsi,

de nombreux dispositifs de substitution sensorielle consistent à convertir des informations visuelles ou auditives en stimuli vibratoires grâce à des vibrateurs placés à la surface de la peau. Profitant notamment des progrès technologiques permettant la conception de dispositifs de plus en plus performants, ce domaine de recherche s'est considérablement développé depuis les travaux de Geldard (Jones & Sarter, 2008; van Erp, 2002).

Si au départ l'objectif poursuivi était de compenser la perte d'un sens, l'utilisation des dispositifs vibrotactiles est aujourd'hui envisagée dans un cadre autre que celui de la substitution sensorielle. En effet, notre environnement actuel propose de multiples dispositifs technologiques donnant accès à un nombre considérable d'informations. Parallèlement au développement d'interfaces visuelles de plus en plus complexes, on observe une tendance à la multimodalité caractérisée par une utilisation plus élargie de nos capacités sensorielles. Si nos téléphones vibrent et que nos véhicules émettent des sons à l'approche d'un obstacle c'est pour permettre un accès à l'information même lorsque la vision est dégradée ou allouée à d'autres tâches.

Des études de plus en plus nombreuses, en particulier dans le domaine de la recherche appliquée, permettent de saisir l'intérêt particulier des dispositifs tactiles dans les tâches de navigation. Ces dernières nécessitent de contrôler son mouvement et ses déplacements de façon à atteindre une localisation précise, en utilisant les informations présentes dans l'environnement ou des aides techniques telles qu'une carte, une boussole, un tableau de bord, etc. Elles peuvent être effectuées dans des contextes très divers, du plus commun comme se déplacer en ville ou conduire, au plus spécifique notamment dans le domaine du pilotage d'avions ou d'hélicoptères. Il s'agit d'activités de déplacement orientées vers un but et qui mettent en jeu un couplage permanent entre la prise d'informations sensorielles et la réalisation motrice. La plupart des informations nécessaires à la réalisation de ce type de tâches sont perçues par la modalité visuelle. Cette forte dominance d'un canal sensoriel peut parfois conduire, dans des situations où les capacités du système sensoriel sont dépassées, à une dégradation des performances, du confort ou encore du niveau de sécurité. Une illustration simple

mais très éloquente est la navigation de nuit, le système visuel humain étant limité pour percevoir l'information en l'absence de luminosité. Par ailleurs, les tâches de navigation sont particulièrement sollicitantes sur le plan cognitif, en particulier lorsqu'elles impliquent l'utilisation d'un véhicule. Dans ce contexte, la navigation passe notamment par l'utilisation d'une interface et nécessite de gérer une quantité d'informations parfois abondante (vitesse, altitude, etc.).

Le cas du pilotage d'hélicoptère est particulièrement illustratif des problèmes qui peuvent être engendrés par la dominance de la modalité visuelle dans la prise d'informations. Non seulement le pilote doit gérer le flux d'informations visuelles à l'extérieur du cockpit mais la vision est également allouée à la consultation des nombreux instruments présents à l'intérieur du cockpit. Lors d'une phase délicate comme l'atterrissage, il est parfois nécessaire de délaissier l'un des deux avec potentiellement une perte d'information. Par ailleurs, lors d'un atterrissage, le mouvement des rotors de l'hélicoptère peut engendrer des conditions de visibilité largement dégradées. En effet, durant l'approche de l'engin au-dessus du sable ou de la neige on observe des phénomènes de brownout (sable) et de whiteout (neige) dans lesquels le mouvement des rotors crée un brouillard autour de l'hélicoptère (**Figure 0.1**). Ces conditions particulières d'atterrissage rendent impossible la prise d'information à l'extérieur du cockpit et sont ainsi responsables d'une part importante des accidents d'hélicoptère (Research and Technology Organization & Human Factors and Medicine Panel, 2012). On peut également citer le pilotage de nuit ou le vol au-dessus de surfaces dont la texture est uniforme (mer, désert) comme des conditions particulièrement pauvres en informations visuelles. Le pilotage d'hélicoptère est donc touché par diverses problématiques liées au manque de visibilité et offre un contexte appliqué particulièrement intéressant pour évaluer le bénéfice des informations vibrotactiles en phase d'approche.



Figure 0.1 – Hélicoptères atterrissant (a) sur le sable et (b) sur la neige (Research and Technology Organization & Human Factors and Medicine Panel, 2012).

Après plusieurs décennies d'études expérimentales, et malgré des résultats encourageants, les stimuli vibrotactiles restent peu exploités par les interfaces actuelles. La principale problématique dans la mise à disposition de ces nouveaux modes de perception est la nécessité d'un codage intuitif de l'information. Cette notion d'intuitivité implique notamment qu'une stimulation évoque directement et sans ambiguïté l'information à laquelle elle est associée. Le caractère intuitif de la stimulation représente un véritable enjeu pour l'utilisation des dispositifs vibrotactiles dans la mesure où ce type de stimuli n'est pas naturellement utilisé. L'objectif principal de ce travail est donc de comprendre comment exploiter une interface vibrotactile afin de fournir les informations nécessaires à la gestion d'un contact ou d'une approche, notamment dans des situations où les informations visuelles sont indisponibles ou dégradées. Tout en conservant le caractère appliqué des recherches actuelles sur les dispositifs tactiles, ce travail se veut également ancré dans une perspective fondamentale en s'appuyant sur la théorie écologique de la perception et de l'action (Gibson, 1950, 1966, 1979). Des travaux récents laissent en effet penser qu'il s'agirait d'un cadre d'étude pertinent, à la fois pour comprendre les mécanismes impliqués dans l'utilisation des dispositifs tactiles mais également pour définir des principes de codage particulièrement intuitifs.

La première partie de cette thèse (chapitres 1 et 2) présentera le contexte théorique dans lequel s'inscrit ce travail de recherche. La seconde partie (chapitres 3, 4 et 5) concernera les différentes études expérimentales mises en place.

- Le **Chapitre 1** exposera les aspects fondamentaux liés à l'utilisation de la modalité tactile comme interface de communication. Il proposera dans un premier temps, une description des aspects perceptifs de la modalité tactile à travers un ensemble de travaux réalisés dans le domaine de la psychophysique et permettant une meilleure compréhension de la perception des stimuli vibratoires. Dans un second temps, il présentera la mise en œuvre technique des dispositifs utilisés dans le cadre de la suppléance visuotactile et leurs contextes d'application.

- Le **Chapitre 2** présentera comment les dispositifs vibrotactiles ont été utilisés pour transmettre des informations d'approche en situation de navigation. Dans un premier temps, ce chapitre abordera les différentes variables informationnelles impliquées dans ce type de situations et notamment les variables optiques qui, selon certaines études sur la perception visuelle, sont mises en jeu dans la régulation d'une approche. Nous préciserons, dans un second temps, comment ces variables peuvent être codées sous une forme vibrotactile.

- Le **Chapitre 3** concernera une étude préliminaire visant à déterminer les caractéristiques de la stimulation vibrotactile (écartement spatial entre les vibrateurs et discontinuité des vibrations) qui influencent la précision du jugement du temps de pré-contact (time to contact, TTC). Ce paradigme est classiquement utilisé dans les études sur la perception visuelle afin d'étudier les processus mis en jeu dans les situations d'approche ou d'interception.

- Le **Chapitre 4** s'appuiera sur le même paradigme et visera à comparer les performances dans différentes modalités sensorielles (visuelle et tactile). De plus, cette étude visera à déterminer si, dans ce type de tâche, la modalité tactile peut renforcer ou compléter des informations visuelles notamment lorsqu'elles sont occultées.

- Le **Chapitre 5** mettra en œuvre des tâches virtuelles de régulation d'approche au sol en hélicoptère. Nous verrons comment différentes informations tactiles permettent d'améliorer la régulation d'une approche au sol lorsque la vision est dégradée et comment les paramètres de la stimulation influencent les performances.

- Enfin, les résultats de ces différentes études seront mis en perspective dans une discussion générale puis une conclusion. Il s'agira de présenter les principales contributions de ce travail de thèse et d'en définir les limites, et enfin d'identifier des pistes de recherche pour les études à venir.

PREMIERE PARTIE

CADRE THEORIQUE

Chapitre 1

La peau, une interface de communication

1 Introduction

Si la peau forme une enveloppe corporelle indispensable à la protection des organes, elle est aussi une interface physique entre l'Homme et son environnement. L'ensemble des récepteurs cutanés permet d'apprécier la texture, la température ou encore la pression exercée par un objet de l'environnement sur une partie du corps. La modalité tactile permet donc d'accéder à une multitude de sensations et donc de perceptions différentes des propriétés de notre environnement.

Pour communiquer des informations par la peau, une diversité de dispositifs a été envisagée. Certains auteurs ont proposé d'utiliser des stimuli électriques transmettant un faible courant à la surface de la peau (Kaczmarek, Webster, Bachy-Rita, & Tompkins, 1991) et plus récemment des variations de température d'une source de chaleur (Jones & Berris, 2002). Les dispositifs haptiques, utilisant notamment des technologies de retour de force, constituent des dispositifs particuliers qui exploitent la sensibilité kinesthésique du système tactile (Hayward, Astley, Cruz-Hernandez, Grant, & Robles-De-La-Torre, 2004). Enfin, les stimuli vibratoires envisagés pour transmettre des informations via la peau depuis une cinquantaine d'année (Geldard, 1957, 1960) ont fait depuis l'objet de nombreuses recherches (Choi & Kuchenbecker, 2013; Kaczmarek et al., 1991) notamment pour communiquer des informations de navigation (Self, van Erp, Eriksson, & Elliott, 2008; van Erp, 2000)

Ce travail s'intéresse spécifiquement aux dispositifs vibrotactiles qui exploitent la sensibilité des mécanorécepteurs de la peau aux stimuli vibratoires. Il soulève deux questions principales. La première, relative aux aspects perceptifs, cherche à déterminer les conditions dans lesquelles les vibrations sont les mieux perçues. Les travaux réalisés dans le champ de la psychophysique apportent ici des éléments précieux pour mieux comprendre la sensibilité de la peau aux stimuli vibratoires. Au-delà de la capacité à discriminer les différents attributs des stimuli, la seconde question porte sur le codage de l'information. Cette question centrale

est spécifique au domaine de la substitution visuotactile puisque, rappelons-le, il s'agit de convertir sous forme tactile des informations habituellement perçues par la modalité visuelle. Depuis une dizaine d'années, les travaux sur les dispositifs tactiles explorent donc différents principes de codage qui visent à associer au mieux un patron tactile donné à une information à transmettre.

Au regard de ces deux questions, ce premier chapitre sera consacré à la présentation de l'ensemble des mécanismes impliqués dans la perception des informations tactiles et plus spécifiquement des stimuli vibrotactiles. Il exposera également les spécificités des interfaces vibrotactiles en précisant comment l'information peut être codée sous forme tactile en abordant les différents paramètres de la stimulation et types d'information. Si certaines informations bénéficient d'un codage spontanément interprété, d'autres nécessitent en revanche des recherches approfondies visant à déterminer le codage le plus facilement interprétable afin de garantir l'utilisabilité de tels dispositifs.

2 Mécanismes perceptifs de la modalité tactile

2.1 Aspects neurophysiologiques

2.1.1 Structure de la peau

Comme cela est décrit dans de nombreux ouvrages (e.g. Buser & Imbert, 1982; Caston, 1993), le système tactile est composé de différents récepteurs sensoriels, permettant une sensibilité aux stimuli thermiques, électriques et de pression. Les dispositifs vibrotactiles exploitant principalement la sensibilité des mécanorécepteurs aux déformations de la peau (pression et vibrations), nous nous intéressons ici uniquement à ce type de récepteurs cutanés. Ces mécanorécepteurs sont reliés à des fibres nerveuses qui transmettent la stimulation vers le système nerveux et permettent la sensibilité à différentes sortes de pressions mécaniques. Quatre types de récepteurs sont répartis à travers les trois couches qui constituent la peau. De la couche la plus superficielle vers la plus profonde se trouvent l'épiderme, le derme et l'hypoderme (**Figure 1.1**). Les cellules de Merkel et les

corpuscules de Meissner se trouvent plutôt dans la zone cutanée superficielle alors que l'on trouve les corpuscules de Ruffini et Pacini au niveau des couches sous-cutanées, plus profondes. L'épiderme est la couche la plus fine avec une épaisseur de 0.5 à 1.5 mm, suivi du derme (0.6 à 3 mm) et enfin l'hypoderme qui peut s'étendre de plusieurs centimètres. La composition de la peau, notamment la répartition des différents mécanorécepteurs, est différente en fonction du type de peau. La peau glabre, ou peau lisse, correspond aux zones corporelles dépourvues de pilosité, situées principalement dans la paume de la main, les doigts, la plante des pieds et la langue. Il s'agit de zones très riches en récepteurs avec notamment une forte concentration en cellules de Merkel et corpuscules de Meissner et où la sensibilité est la plus fine. Par exemple, le bout des doigts compte environ 43% de cellules de Merkel. A l'inverse, la peau velue qui comprend les surfaces corporelles où se trouvent les follicules pileux (majorité de la surface corporelle hormis les mains, les pieds et la langue) contient principalement des corpuscules de Ruffini et de Pacini, avec une densité moyenne.

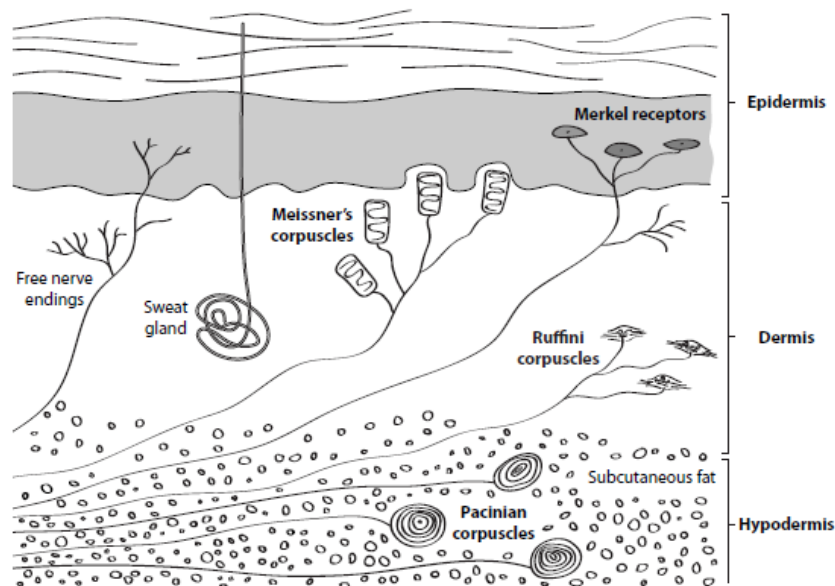


Figure 1.1 – Les différentes couches cutanées et leurs mécanorécepteurs (d'après Spelmezan, 2011 et adapté de Goldstein, 2002).

2.1.2 Caractéristiques des mécanorécepteurs

Les caractéristiques des mécanorécepteurs déterminent et limitent leur sensibilité aux différents stimuli. Ainsi, ils sont tous sensibles à des formes de pression mécanique différentes :

- Les *corpuscules de Meissner* sont sensibles aux pressions de basses-fréquences et sont impliqués dans le toucher fin.
- Les *cellules de Merkel* sont les plus petits mécanorécepteurs et répondent aux pressions et à l'enfoncement de la peau.
- Les *corpuscules de Ruffini* sont également sensibles aux pressions mais également à l'étirement de la peau.
- Les *corpuscules de Pacini* sont des mécanorécepteurs de petite taille et permettent la perception des vibrations de hautes fréquences.

Si les mécanorécepteurs renvoient à des sensations aussi variées, c'est qu'ils possèdent des propriétés de réponse aux stimuli bien spécifiques (**Tableau 1.1**). La classification des mécanorécepteurs s'appuie principalement sur leur vitesse d'adaptation (SA – lente ; RA – rapide) et la taille de leur champ récepteur (1 – petit ; 2 – large).

Tableau 1.1 – Caractéristiques des différents mécanorécepteurs de la peau (d'après Kaczmarek et al., 1991).

| | Merkel | Meissner | Ruffini | Pacini |
|---|----------------|----------------|----------------------|-----------|
| Classification | SA1 | RA1 | SA2 | RA2 |
| Adaptation | Lente | Rapide | Lente | Rapide |
| Fréquence de sensibilité (Hz) | 0-100 | 1-300 | <8 | 5-1000 |
| Taille du champ récepteur (mm²) | 1-100 | 2-100 | 10-1000 | 10-500 |
| Taille des récepteurs (cm²) | 140 | 70 | 21 | 9 |
| Type de sensation perçue | Pression, tact | Pression, tact | Etirement de la peau | Vibration |

Vitesse d'adaptation

Pour qu'un stimulus provoque une sensation, celui-ci doit atteindre un seuil minimum. En cas de prolongement d'une stimulation, les mécanorécepteurs s'adaptent en augmentant progressivement ce seuil. Ainsi, certains mécanorécepteurs, comme les corpuscules de Ruffini et les disques de Merkel, ont une adaptation lente et sont sensibles à la durée et l'intensité du stimulus. Les corpuscules de Meissner et Pacini ont une adaptation rapide et renseignent alors sur la variation du stimulus au cours du temps.

Champ récepteur

Une autre condition nécessaire à l'activation d'un mécanorécepteur est que le stimulus soit appliqué dans une certaine zone autour de celui-ci, appelée champ récepteur. La taille du champ récepteur influence la précision avec laquelle le mécanorécepteur réagit au stimulus. Les mécanorécepteurs permettant une sensibilité fine (Merkel et Meissner) ont des champs récepteurs réduits (10 mm² en moyenne). Les corpuscules de Ruffini et Pacini ont quant à eux un champ récepteur plus large et se trouvent dans des zones corporelles ayant une sensibilité moyenne.

Fréquence de sensibilité

Les mécanorécepteurs sont généralement sensibles aux stimuli se trouvant dans une gamme particulière de fréquence. Les corpuscules de Pacini, sensibles aux vibrations, possèdent la gamme de sensibilité la plus large et répondent aux plus hautes fréquences de stimulation. Ils ont également le pic de sensibilité le plus élevé avec une réponse optimale à environ 250 Hz et constituent donc les récepteurs principalement mis en jeu lors de l'utilisation d'un dispositif vibrotactile. Les corpuscules de Ruffini sont sensibles uniquement aux stimuli de basse fréquence, alors les cellules de Merkel et Meissner répondent à une gamme de fréquences moyennes.

2.2 Psychophysique de la perception vibrotactile

2.2.1 Discrimination spatiale

La discrimination (ou acuité) spatiale définit la précision avec laquelle il est possible de localiser un stimulus. Elle est généralement formalisée par la mesure d'un seuil de discrimination qui détermine le plus petit espace au-delà duquel deux stimuli sont perçus comme étant à des localisations différentes. De manière générale, elle dépend de la densité de récepteurs de la zone stimulée qui varie d'une région corporelle à une autre (**Figure 1.2**). La discrimination est maximale au niveau des mains, où la modalité tactile joue un rôle fondamental pour l'exploration manuelle. L'abdomen et le dos, les zones généralement exploitées par les dispositifs vibrotactiles, ont des seuils de discrimination parmi les plus faibles.



Figure 1.2 – *L'homonculus*, une représentation des capacités sensibles de la peau. La taille de chaque zone corporelle est représentée proportionnellement à la densité de récepteurs ainsi qu'à la zone dédiée au niveau cérébral (<http://lemonde.fr>, adapté de Prudente et al., 2015).

La mesure du seuil de discrimination spatiale des stimuli tactiles dépend également de la méthode utilisée. La méthode la plus ancienne est la méthode des deux points de Weber (1834), reprise par la suite dans de nombreuses études (Craig & Johnson, 2000). Elle consiste à stimuler la peau à différentes localisations (simultanément ou successivement) et à déterminer le plus petit écartement à partir duquel les sujets perçoivent les stimulations comme étant à deux localisations différentes. Avec cette méthode, des seuils de 18 à 38 mm ont été mesurés au niveau de l'abdomen (e.g. Stevens & Choo, 1996; Verrillo, 1962; Weinstein, 1968). Bien que de nombreuses études aient par la suite émis de sérieuses réserves concernant cette méthode et sa capacité à réellement mesurer l'acuité spatiale (Craig & Johnson, 2000), elle reste la plus couramment utilisée. Une des principales limites évoquées est l'aspect subjectif de la réponse donnée par les sujets. En effet, les sujets pourraient adopter différents critères pour déterminer s'ils perçoivent une ou deux stimulations. Cette subjectivité pourrait être à l'origine de la grande variabilité intra et interindividuelle observée dans les différents résultats obtenus. Par exemple, Eskildsen et al (1969) ont obtenu des seuils de discrimination pour une même localisation allant de 9,4 à 22,6 mm en fonction des sujets.

Bien qu'elle ait reçu moins d'attention que la méthode des deux points de Weber, l'erreur de localisation (*error of localization*) constitue une autre méthode couramment utilisée dans la littérature pour mesurer l'acuité spatiale. Elle consiste à stimuler la peau à une localisation donnée, le sujet doit alors localiser la stimulation directement sur sa peau. Une étude de Weinstein (1968) a mis en évidence les différences de seuils obtenus avec ces deux méthodes (**Figure 1.3**). Au niveau de l'abdomen – localisation fréquemment utilisée pour transmettre des informations vibrotactiles – l'erreur de localisation est de 10 mm alors que la méthode des deux points conduit à un seuil de 38 mm. Par ailleurs, l'abdomen constitue, avec les jambes et les avant-bras, la zone où l'écart entre les deux méthodes de mesure est le plus important. Cette analyse très détaillée des différents seuils de perception à la surface du corps constitue une étude de référence dans le domaine. Notons toutefois qu'elle concernait des stimulations de

pression à la surface de la peau ce qui nous amène à considérer ces seuils avec précaution en présence de stimulations de nature vibratoire.

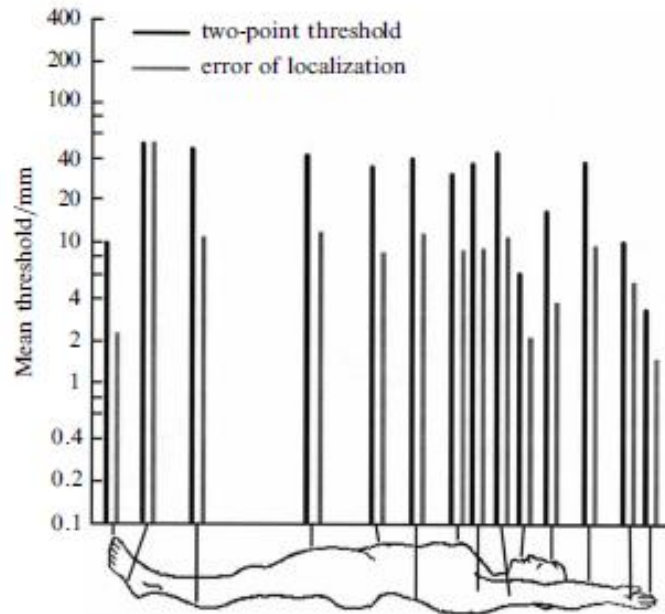


Figure 1.3 – Seuil de discrimination de deux points et erreur de localisation à différentes localisations corporelles (d'après Weinstein, 1968).

Concernant l'acuité spatiale pour des stimuli vibrotactiles, une première étude d'Eskildsen et al. (1969) a adopté la méthode de Weber afin de déterminer le seuil de discrimination spatial au niveau du dos. L'étude était réalisée à l'aide du dispositif TSAS (Tactile Vision Substitution System), avec des tacleurs de 1 mm, vibrant 2 secondes à 160 Hz. Les participants recevaient simultanément deux stimuli avec un écartement spatial de 10, 20, 30 ou 40 mm et devaient indiquer s'ils percevaient une ou deux stimulations. Le seuil médian ainsi évalué était de 17.8 mm.

Pour mesurer l'acuité spatiale au niveau du tronc, van Erp (2005) a utilisé une méthode différente de celle de Weber. Deux stimulations successives, avec un écartement spatial variable, étaient appliquées à la surface de la peau des participants. Ils devaient ensuite indiquer si la seconde stimulation était située à gauche ou à droite de la première. Les analyses ont ainsi fait apparaître un seuil de discrimination allant de 30 à 40 mm pour l'abdomen et le dos.

L'acuité spatiale de la peau pour des stimuli vibrotactiles reste encore peu étudiée et les résultats paraissent très hétérogènes, probablement en raison de la diversité des méthodes et des matériels utilisés.

Enfin, certaines études proposent qu'il existe des points d'ancrage autour desquels l'acuité spatiale serait plus précise. En effet, la localisation absolue d'un stimulus autour de l'abdomen est significativement plus précise au niveau du nombril et de la colonne vertébrale (Cholewiak, Brill, & Schwab, 2004). Van Erp (2005) a par ailleurs trouvé des seuils de discrimination significativement plus faibles au niveau de ces deux localisations par rapport au reste de l'abdomen (**Figure 1.4**). Des points d'ancrage se trouvent également au niveau du bras, avec une acuité plus fine au niveau du poignet et de l'épaule (Cholewiak & Collins, 2003). Ces points d'ancrage seraient donc des points de référence anatomiques autour desquels la localisation des stimuli est plus précise.

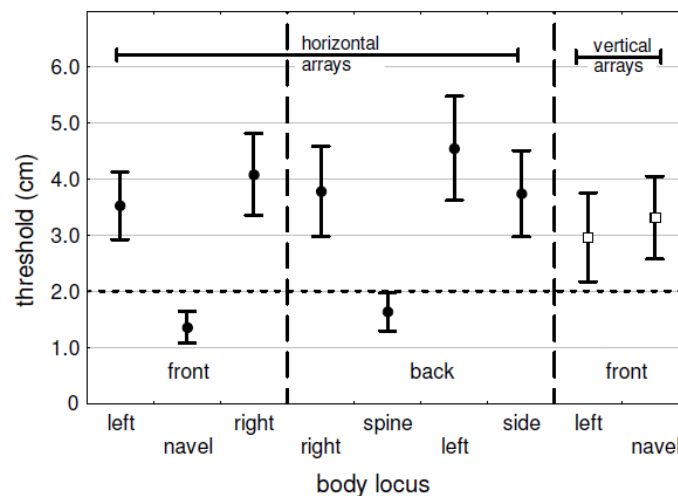


Figure 1.4 – Seuils de discrimination vibrotactiles au niveau de 9 localisations réparties autour de de l'abdomen et du dos. Les seuils ont été mesurés au niveau de l'abdomen, avec des vibrateurs placés horizontalement (au-dessus et de part et d'autre du nombril) ou verticalement (au-dessus et à gauche du nombril). Pour le dos, les vibrateurs étaient disposés verticalement (sur, et de part et d'autre de la colonne vertébrale, et sur le flanc gauche) – d'après van Erp, 2005.

2.2.2 Facteurs spatiotemporels influençant la perception des stimulations vibrotactiles

Certains auteurs ont identifié plusieurs phénomènes qui influencent la perception des stimuli vibrotactiles. Ces phénomènes peuvent être liés aux caractéristiques spatiales ou temporelles de la stimulation et influencent directement le seuil de perception ou la capacité de discrimination des stimuli. Parfois, c'est la combinaison de caractéristiques spatiales (distance entre les stimuli) et temporelles qui est à l'origine de ces différents phénomènes perceptifs.

Adaptation

Dans ce champ de recherche, le terme d'adaptation définit le phénomène survenant après des stimulations sensorielles prolongées qui réduisent le seuil de détection des mécanorécepteurs et modifie progressivement la perception du stimulus. Pour des stimuli vibrotactiles, une exposition prolongée provoque une diminution de l'intensité perçue de la stimulation et une augmentation du seuil de perception. Si l'adaptation peut être contraignante pour la transmission d'informations vibrotactiles, ses effets sur la perception ne sont pas uniquement négatifs. Diverses études ont en effet démontré que l'adaptation permettait d'améliorer la discrimination de différentes fréquences (Goble & Hollins, 1994) et amplitudes (Goble & Hollins, 1993; Zhang et al., 2008).

Masquage

Le phénomène de masquage intervient lorsque deux stimuli sont transmis avec une forte proximité temporelle ou spatiale. Ils peuvent alors être intégrés simultanément et être perçus comme une seule et unique stimulation (van Erp, 2002). On parle de masquage temporel lorsqu'une même localisation est stimulée successivement et que le délai entre les différentes stimulations est relativement court. Le masquage spatial fait suite à l'activation de deux localisations distinctes, lorsque le début la seconde stimulation démarre avant la fin de la première. Dans

les deux cas, l'effet de ce phénomène peut être limité en augmentant le délai temporel ou en utilisant des fréquences de vibration différentes pour chacun des stimuli (Verrillo & Gescheider, 1975). Ce phénomène peut également influencer l'intensité perçue de l'une des stimulations (Verrillo & Gescheider, 1975).

Saltation

Le phénomène de saltation se caractérise par la perception d'une stimulation à un endroit où la peau n'est pas stimulée. Geldard & Sherrick (1972) ont en effet constaté que lorsqu'on applique sur la peau (à intervalles réguliers) trois stimulations successives à une première localisation, puis trois autres à une deuxième localisation, suivies d'une dernière stimulation à un troisième endroit, les sujets percevaient sept stimulations équidistantes (**Figure 1.5**). Pour que le phénomène se produise il faut au moins deux localisations distinctes et des intervalles de 20 à 300 ms entre chaque stimulation même si des performances optimales sont observées entre 40 et 60 ms (Geldard, 1985). Le phénomène de saltation peut être utilisé pour « dessiner » des lignes vibrotactiles et transmettre, par exemple, des informations directionnelles. En effet, la sensation provoquée est identique que la stimulation soit présentée en mode saltatoire ou véridique (Cholewiak & Collins, 2000).

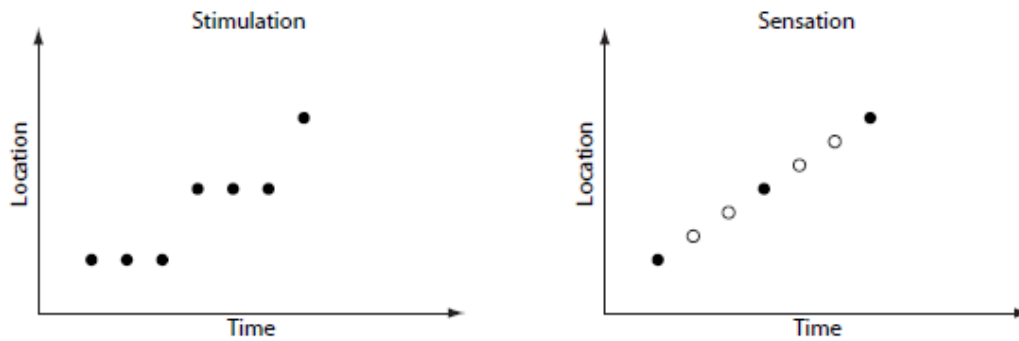


Figure 1.5 – Représentation du phénomène de saltation. Le premier graphique (gauche) indique comment la peau est réellement stimulée au niveau des trois localisations. Le second (droite) représente la sensation perçue, les cercles blancs indiquant les stimulations perçues à des localisations différentes de leur localisation réelle (d'après Spelmezan, 2011).

Effet Tau

Helson & King (1931) ont mis en évidence un autre phénomène perceptif dans lequel les facteurs temporels influencent le jugement de distance entre deux stimuli successifs. Dans leur étude, les sujets recevaient trois stimulations à des localisations différentes (L_1 , L_2 et L_3) et devaient indiquer si la distance entre la première et la seconde (L_1-L_2) était plus petite, égale ou supérieure à la distance entre la seconde et première (L_2-L_3). Alors que la distance physique était identique entre chaque vibreur, la durée inter-stimulus pouvait varier de 200 à 500 ms. Les données recueillies ont montré que le jugement de distance était directement proportionnel à la durée entre les stimulations. Autrement dit, lorsque le premier intervalle temporel est plus court, alors la distance est perçue comme plus petite. Ce phénomène, appelé *Tau effect*, est également présent lorsque seules deux localisations sont utilisées (L_1 , L_2 puis à nouveau L_1) et traduit une assimilation de la dimension spatiale (i.e. distance) à une dimension temporelle (i.e. délai inter-stimulus).

Effet Phi

Cette illusion spatiotemporelle, présente dans les modalités visuelle et tactile, apparait également dans la littérature sous le terme de sensation de mouvement apparent. Elle donne la sensation d'un stimulus en mouvement lorsque celui passe

successivement d'une localisation à une autre. L'effet phi apparait sous certaines combinaisons de durée de vibration et d'intervalle temporel entre des stimulations successives. De façon générale, plus l'intervalle temporel entre deux stimuli est court, plus ces derniers vont avoir tendance à être perçus comme étant simultanés. De la même façon, plus l'intervalle temporel est long, plus les stimulations vont être perçues comme étant transmises successivement. Il existe des conditions intermédiaires dans lesquelles les stimulations vont être perçues comme étant une même stimulation en mouvement, c'est-à-dire créer la sensation d'un stimulus se déplaçant à la surface de la peau. L'effet phi est également corrélé à la durée de vibration de chaque stimulation. En effet, plus celle-ci est élevée, plus l'intervalle entre les stimulations doit être augmenté pour créer la sensation de mouvement (Figure 1.6).

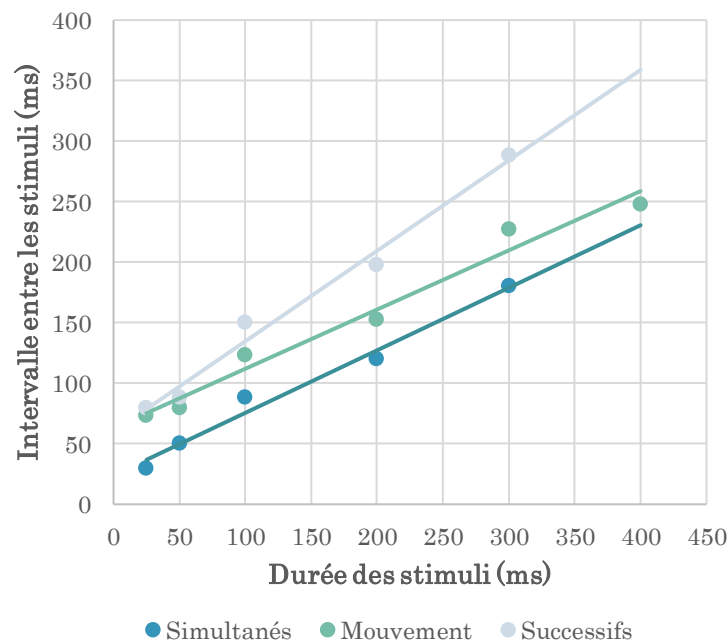


Figure 1.6 – Valeurs temporelles moyennes pour lesquelles les stimuli sont jugés comme étant simultanés, en mouvement ou successifs (d'après Sherrick et Rogers, 1966).

Effet Kappa

L'effet kappa décrit l'influence des facteurs spatiaux dans le jugement d'un intervalle temporel entre deux stimuli. Mis en évidence par Cohen et al. (1953), il évoque un phénomène intermodal ayant fait l'objet de nombreuses études dans le domaine de la perception visuelle. Dans cette expérience princeps, trois flashes lumineux séparés par une distance variable étaient présentés, brièvement et successivement, aux sujets. Il leur était ensuite demandé d'ajuster la position du 3^{ème} flash afin que la distance entre les trois flashes soit identique. Dans ce contexte, plus le délai entre chaque flash est grand, plus la distance du second intervalle est surestimée, et inversement. Les travaux de Suto (1952) ont mis en évidence ce phénomène au niveau de la modalité tactile et ont surtout montré que l'effet kappa n'était pas induit par la distance physique mais la distance perçue entre les différents stimuli. Autrement dit, si la distance physique séparant les stimuli des intervalles à juger est différente mais qu'elle est perçue comme étant identique, l'effet Kappa ne sera pas observé.

Les interactions entre les paramètres spatiaux et temporels de la vibration tactile rapportées ci-dessus illustrent parfaitement la dissociation entre sensation et perception. Ces phénomènes sont d'autant plus importants lors de la conception des messages vibrotactiles puisqu'ils pourront appauvrir ou au contraire enrichir la perception.

2.3 Avantages de la modalité tactile comme interface de communication

La modalité tactile présente de nombreux avantages à être utilisée pour communiquer de l'information (Jones & Sarter, 2008; Visell, 2009). Premièrement, la peau offre une large surface de stimulation (environ 1,75 m² chez l'adulte). De plus, l'utilisation de la modalité tactile permet de libérer les yeux, les oreilles et, selon le site de stimulation, les mains qui peuvent ainsi être allouées à d'autres tâches. La modalité tactile est aussi particulièrement avantageuse dans son aspect

omnidirectionnel, c'est-à-dire qu'elle ne nécessite pas d'orienter les récepteurs sensoriels pour capter l'information (contrairement à la vision).

La modalité tactile est également reconnue comme étant efficace pour transmettre des informations à la fois spatiales et temporelles (van Erp, 2000). La rétine, possédant une résolution spatiale très fine, permet à la vision d'être une modalité privilégiée pour les jugements spatiaux. Cependant, la modalité tactile offre une meilleure discrimination temporelle des stimuli que la vision (van Erp & Werkhoven, 2004). A titre d'exemple, les rythmes sont mieux reproduits lorsqu'ils sont présentés via la modalité tactile que visuellement (Brewster & Brown, 2004). Par ailleurs, la modalité tactile apparaît plus adaptée que la modalité auditive pour suppléer la vision en vue de transmettre des informations de nature spatiale (Geldard, 1960), l'audition étant plus précise pour le traitement d'informations de nature temporelle.

Un autre avantage de la modalité tactile, et notamment des stimuli vibratoires, réside dans le fait que la transmission d'informations peut être assurée même dans des conditions perturbées. En condition de forte accélération, comme c'est le cas à bord d'avions à grande vitesse, alors que les informations visuelles sont dégradées et difficiles à exploiter, les informations transmises par un dispositif vibrotactile restent identifiables (van Veen & van Erp, 2001). Par ailleurs, les patrons vibrotactiles restent identifiables par les sujets même en cas de forte charge mentale (Chan, MacLean, & McGrenere, 2005) ou encore lorsque le sujet est soumis à d'autres vibrations environnantes (van Erp, van Veen, Jansen, & Dobbins, 2005). Cela permet aux stimuli vibrotactiles d'être utilisés dans des contextes très variés.

Bien que cet argument ne soit que rarement avancé, l'utilisation de la modalité tactile est également intéressante dans le cadre d'une conception universelle des dispositifs de communication. L'idée sous-jacente est de concevoir des dispositifs qui puissent être utilisés de la même façon par le plus grand nombre, « peu importe les habiletés sensorielles d'une personne ou les conditions ambiantes » (Center for Universal Design, 2008). Dans ce contexte, la modalité tactile apparaît comme un média intéressant pour communiquer des informations

qui seraient accessibles à la fois aux personnes malentendantes et non voyantes (Tableau 1.2).

Tableau 1.2 – Accessibilité de l'information en fonction des sources sensorielles.

| | | | |
|---------------------|--------------------------|-------|------------------|
| Vision | • | | |
| Audition | | • | |
| Tactile | • | • | • |
| Population générale | Aveugle | Sourd | Sourd et aveugle |
| | Déficiences sensorielles | | |

L'ensemble de ces avantages fait de la modalité tactile une interface de communication particulièrement intéressante pour transmettre des informations dans une diversité de domaines d'application (qui seront décrits plus précisément dans la partie 3.4).

3 Principes de fonctionnement généraux des dispositifs vibrotactiles

3.1 Considérations matérielles

Depuis que l'idée d'utiliser la peau comme interface de communication a émergé, un grand nombre de dispositifs a vu le jour et les technologies actuelles permettent d'avoir aujourd'hui un panel très large de matériels utilisés (Mortimer, Zets, Mort, & Shovan, 2011; Visell, 2009). Généralement, les dispositifs sont composés d'un système d'acquisition qui prélève l'information nécessaire. Ce système de capture de l'information peut être une caméra, un capteur de mouvement ou encore un émetteur-récepteur à ultrasons. Elles sont ensuite transmises à un système transformant le signal d'origine en un signal tactile qui sera conduit jusqu'aux tacleurs (Figure 1.7). Concernant la configuration du dispositif, Kaczmarek et al. (1991) distinguent plusieurs types de dispositifs: ceux mobilisant un unique vibreur pouvant être placés à différentes localisations et

ceux mobilisant plusieurs vibreurs disposés sous forme de ligne (dispositifs unidimensionnels) ou de matrice (dispositifs bidimensionnels).

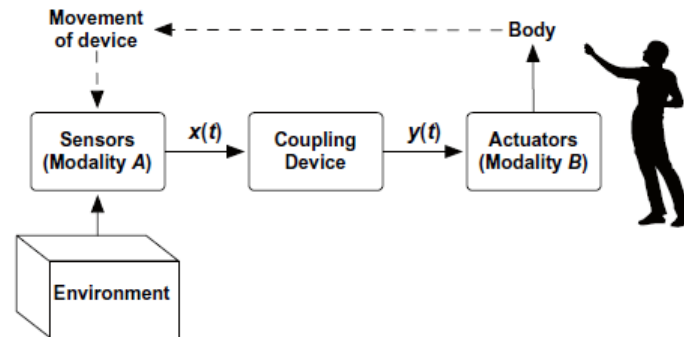


Figure 1.7 – Architecture globale d'un dispositif de substitution sensorielle (d'après Visell, 2009).

Éléments centraux des dispositifs vibrotactiles, les tacleurs sont généralement de type inertiel (**Figure 1.9, a**), c'est-à-dire qu'ils produisent des vibrations par rotation d'une masse autour d'elle-même (Jones & Sarter, 2008; Visell, 2009). La masse est généralement encapsulée dans une surface protectrice et peut prendre une forme plate ou cylindrique (**Figure 1.8, a**). Les formes plates sont placées parallèlement à la peau, c'est-à-dire de manière à ce que la surface la plus large soit en contact avec la peau. Les formes cylindriques sont placées avec l'axe du cylindre perpendiculaire à la peau et ont donc en général une surface de contact plus réduite que sur les formes plates. D'autres types de tacleurs sont actuellement utilisés mais dans une moindre mesure notamment en raison de leur coût plus élevé que les tacleurs inertiels. Ces vibreurs dits linéaires (**Figure 1.8, b**) utilisent une bobine qui successivement attire et repousse une masse fixée au bout d'une tige (Mortimer, Zets, & Cholewiak, 2007). La masse a alors un mouvement linéaire perpendiculaire à la peau (**Figure 1.9, b**). Avec cette forme de tacleurs, la masse n'est pas encapsulée et constitue la seule partie du tacleur en contact et qui vibre sur la peau. Enfin, les tacleurs piézoélectriques, plus rares, utilisent une propriété de certains matériaux comme la céramique qui se contractent ou se dilatent en fonction du voltage qui leur est appliqué. Les tacleurs sont alors composés de deux surfaces piézoélectriques en contact avec la peau et dont les polarités sont opposées (Mortimer et al., 2011).

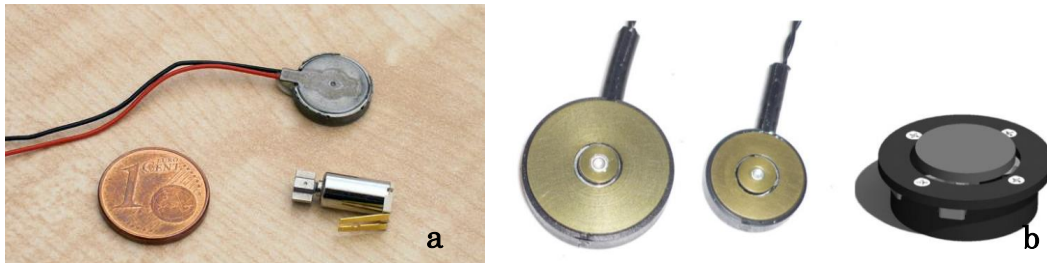


Figure 1.8 – Vibrateurs inertiels (a) de forme plate (haut) et cylindrique (bas) – d'après Spelmezan (2011). Vibrateur linéaires (b)

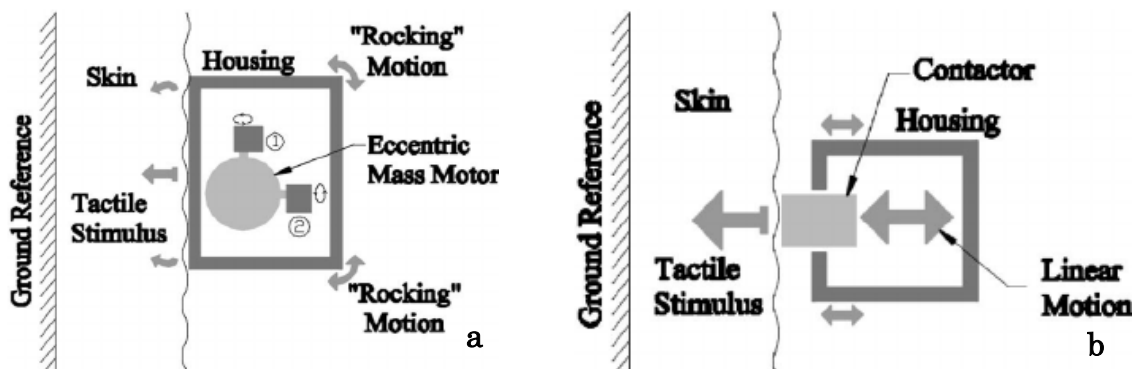


Figure 1.9 – Principe de fonctionnement des vibrateurs de type inertiel (a) et linéaire (b). Les vibrateurs inertiels produisent une vibration par rotation d'une masse encapsulée. Le mouvement de rotation peut être perpendiculaire (1) ou parallèle (2) à la peau. Les vibrateurs linéaires produisent une vibration grâce au mouvement linéaire et perpendiculaire à la peau d'une masse semi-encapsulée.

3.2 Caractéristiques physiques de la stimulation

Même si les dispositifs sont variés, les paramètres physiques des stimulations peuvent être décrits de manière relativement transversale. La vibration est caractérisée par un certain nombre de paramètres physiques (une amplitude, une fréquence et une forme d'onde) qui correspondent aux caractéristiques du signal électrique généré par le dispositif afin de mettre en mouvement les masses.

La **fréquence** correspond au nombre de mouvements (rotation ou linéaire) par seconde effectués par la masse. Elle est mesurée au moment où la vibration atteint son amplitude maximale. La peau est sensible à des fréquences de vibration entre 10 et 500 Hz (Kaczmarek et al., 1991) mais la perception est optimale à des fréquences avoisinant les 250 Hz (Cholewiak & Collins, 1991), ce qui correspond aux valeurs de sensibilité maximale des corpuscules de Pacini. Il s'agit également

de la fréquence à laquelle les variations de fréquence sont les mieux discriminées (Rothenberg et al., 1977).

Une stimulation vibrotactile se caractérise également par l'**amplitude** du signal. Elle correspond également à l'amplitude du renforcement de la peau provoqué par la stimulation et peut être mesurée en μm . L'amplitude et la fréquence de vibration sont deux caractéristiques indissociables qui s'influencent mutuellement (Jones & Sarter, 2008). D'une part, l'amplitude minimale pour déclencher une stimulation tactile dépend de la fréquence de vibration. Plus la fréquence est faible, plus l'amplitude doit être élevée pour que la vibration soit perçue. Au niveau de l'abdomen, ce seuil se situe entre 10 et 30 μm pour des fréquences de vibration comprises entre 30 et 300 Hz (Cholewiak, Brill, & Schwab, 2004). D'autre part, pour une fréquence de vibration constante, l'augmentation de l'amplitude conduit à une augmentation de la fréquence perçue (von Békésy, 1959).

La **forme d'onde** correspond à la forme géométrique des variations du niveau d'activation (amplitude du signal) au cours du temps (**Figure 1.10** – **Différentes formes d'activation des vibrateurs : sinusoïdale (a), triangulaire (b) et rectangulaire (c)**). Elle influence à la fois l'intensité et le type de sensation perçue (Brown, 2007). Les formes sinusoïdales, généralement utilisées et caractérisées par une modulation progressive, sont associées à des stimulations plutôt douces (Gunther & O'Modhrain, 2003). Les formes rectangulaires correspondent à une amplitude modulée de façon plus brusque et sont qualifiées de plus rugueuses. Enfin, les formes triangulaires produisent des sensations intermédiaires et sont caractérisées par une modulation de l'amplitude par paliers (van Erp, 2002).

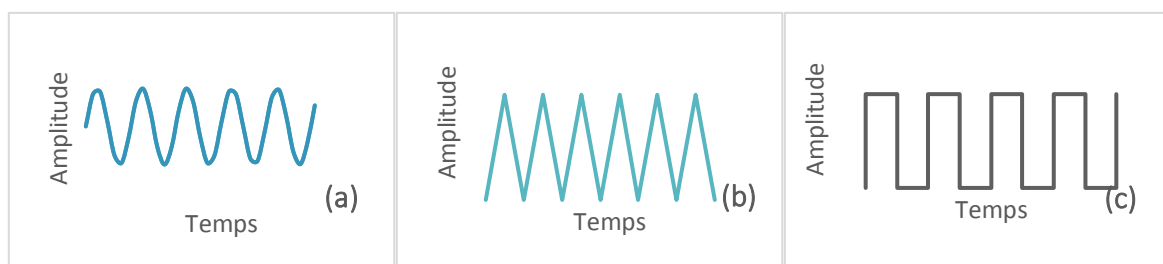


Figure 1.10 – Différentes formes d'activation des vibrateurs : sinusoïdale (a), triangulaire (b) et rectangulaire (c).

3.3 Quelques exemples de dispositifs classiques

Le **Tactile-to-vision substitution system (TVSS)** est un des dispositifs précurseurs de la substitution sensorielle (Bach-y-rita et al., 1969). D'un point de vue fonctionnel, il convertit l'image d'une caméra en information vibrotactile transmise par une matrice de tacteurs (20x20) placée dans le dos du sujet (**Figure 1.11**). Chaque vibreur est associé de façon analogique à une zone de l'image et s'active si la luminosité dépasse un certain seuil. Ce système permet ainsi de représenter au niveau tactile les principaux contrastes d'une image. L'objectif ambitieux qui a orienté la conception du TVSS était de retranscrire et faire percevoir l'ensemble d'une scène visuelle à des personnes aveugles. Ce dispositif s'est avéré efficace pour différencier des lignes orientées selon des axes différents (horizontal, vertical ou oblique) et réaliser des tâches cognitives plus complexes comme reconnaître des formes ou des visages familiers. Cependant, la réalisation de ces différentes tâches n'était possible qu'après 20 à 40h de pratique (Bach-Y-Rita et al., 1969). Par ailleurs, ce dispositif très encombrant ne permettait qu'une utilisation en laboratoire. Malgré ces résultats mitigés sur plan fonctionnel, la multitude d'études dont le TVSS a fait l'objet a permis de mieux comprendre les processus mis en jeu dans la substitution sensorielle et surtout de soulever des questions fondamentales sur la perception auxquelles une partie spécifique sera consacrée (partie 3.5).

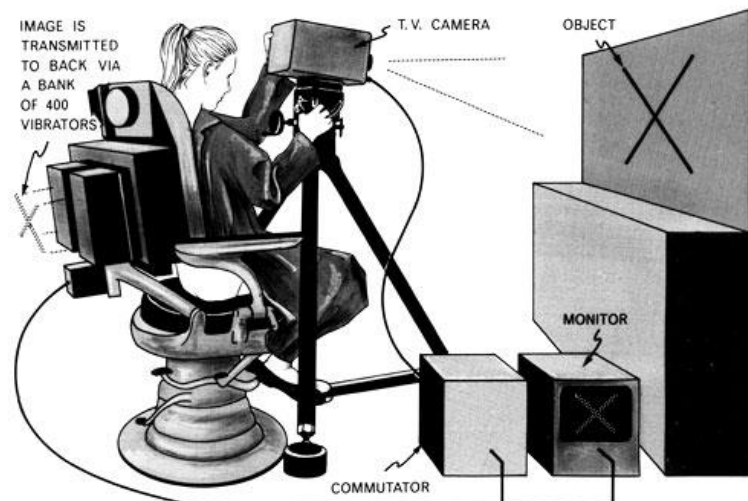


Figure 1.11 – Le TVSS, dispositif de substitution visuotactile convertissant en stimuli vibrotactiles des images captées par une caméra (d'après Bach-y-Rita, 1969).

L'**Optacon** est un dispositif qui fut commercialisé dans les années soixante-dix comme aide à lecture pour les personnes non voyantes (Goldish & Taylor, 1974). Le système d'acquisition consistait en une petite caméra capturant toute image graphique ou textuelle (**Figure 1.12**). Le signal était ensuite transmis à une matrice de 6x24 tacleurs placée sur l'index du sujet et vibrant à 230 Hz. Les performances de lecture avec l'Optacon vont d'une dizaine de mots par minute après neuf jours d'entraînement, à plus de trente après une utilisation prolongée. Si ces performances sont bien en dessous de celles du Braille (une centaine de mots par minute), l'Optacon offrait l'avantage de permettre la lecture de supports non retranscrits en Braille.



Figure 1.12 – L'Optacon, dispositif de substitution sensorielle, permettant de convertir en stimuli vibrotactiles tout support écrit.

Le **Tactile Situation Awareness System (TSAS)** est un dispositif ayant fait l'objet d'un grand nombre de recherches dans le domaine de la navigation et l'orientation spatiale. Le dispositif a été développé afin de répondre aux problèmes de désorientation spatiale rencontrés par les pilotes (Rupert, Guedry, & Reschke, 1994). À l'aide d'une matrice de 8x24 vibrateurs incorporée dans une veste, le dispositif transmettait des informations sur la direction du vecteur gravitaire pendant le vol et permettait ainsi au pilote de percevoir les mouvements en roulis

et en tangage de l'appareil (**Figure 1.13**). Plusieurs vols tests réalisés à l'aide du dispositif ont fourni des résultats encourageants. Les pilotes étaient notamment capables de réaliser différentes manœuvres sans les dispositifs de vol habituels (Self et al., 2008). L'efficacité du dispositif a été démontrée en condition de vol réel et dans des tâches de pilotage d'avions et d'hélicoptères (Rai, Suri, Braithwaite, & Rupert, 1999; Rupert, 2000). Le dispositif a par la suite été décliné en plusieurs versions permettant notamment de transmettre des informations sur la vitesse de déplacement de l'appareil (Rupert & Guedry, 1994) ou plus récemment d'améliorer l'équilibre postural lorsque les informations visuelles sont indisponibles (Brill, Lawson, & Rupert, 2014).

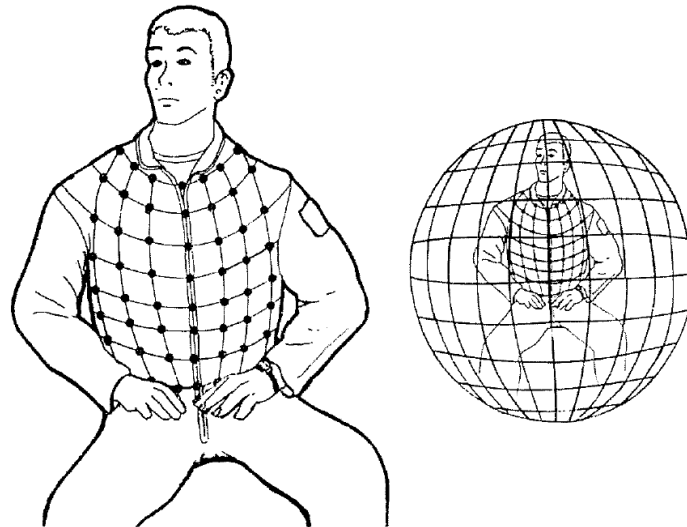


Figure 1.13 – Le TSAS, dispositif composé d'une matrice de vibrateurs couvrant l'ensemble du tronc. Chaque vibrateur est associé à une direction de l'espace et s'active pour attirer l'attention ou guider le mouvement (d'après Rupert et al., 1994).

3.4 Contextes et limites d'utilisation des dispositifs vibrotactiles

3.4.1 Handicap sensoriel

A l'image du Braille, les premiers dispositifs développés dans le cadre de la substitution visuotactile visaient à communiquer des informations verbales ou

permettre la lecture de textes sans l'utilisation de la vision. Dans ces toutes premières recherches, Geldard (1960) a développé le *Vibratese*, un alphabet vibrotactile composé de 45 éléments (chiffres et lettres). Après 35h de pratique, les utilisateurs étaient capables de lire des phrases (90% de précision) avec un débit de 38 symboles par min. L'Optacon proposa quant à lui une version vibrotactile du Braille tout en offrant la possibilité de parcourir des images par le sens du toucher (Goldish & Taylor, 1974). La principale limite de ces dispositifs est le temps d'apprentissage relativement long avant de pouvoir exploiter pleinement leurs capacités. De plus, l'utilisation des dispositifs vibrotactiles pour percevoir des images complexes de façon précise est limitée par la résolution spatiale de la peau.

Le handicap sensoriel constitue toujours un des domaines d'application principal et de nombreuses études continuent de développer des dispositifs pour les personnes déficientes visuelles intégrant désormais des informations de navigation en vue d'améliorer leur mobilité et leur autonomie (Cardin, Thalmann, & Vexo, 2006; Zöllner, Huber, Jetter, & Reiterer, 2011).

3.4.2 Navigation et orientation

Nos ressources attentionnelles sont fortement mobilisées lors des tâches de navigation, notamment lorsqu'il s'agit de se déplacer selon un itinéraire inconnu, conduire un véhicule ou piloter un engin. Pour répondre à cette problématique, les dispositifs tactiles ont massivement investi ce domaine d'application depuis une quinzaine d'années (Mortimer, Zets, Mort, & Shovan, 2011; van Erp, 2000). En plus des situations de navigation pédestre, une grande partie des travaux s'est intéressée aux situations de conduite automobile (Gray, Ho, & Spence, 2014; van Erp & van Veen, 2004) et de pilotage où les phénomènes de désorientation spatiale sont fréquents et la charge attentionnelle particulièrement élevée (Oskarsson et al., 2013; van Veen & van Erp, 2001). Dans ces différents contextes, les stimuli vibrotactiles se sont montrés particulièrement efficaces pour orienter des déplacements en cas de forte charge attentionnelle au niveau visuel ou pour remplacer des outils plus traditionnels comme une carte ou un GPS. Ils ont

également la particularité de pouvoir réorienter l'attention visuelle dans une direction donnée en cas de danger ou pour signifier un évènement important.

3.4.3 Activités physiques

Un autre domaine d'application, plus récent, consiste à guider le mouvement durant l'apprentissage moteur et notamment l'apprentissage des coordinations motrices. L'utilisation des informations tactiles constitue ainsi une alternative aux instructions ou feedbacks oraux et permet de fournir des instructions dans des situations où l'instructeur et l'apprenant sont distants l'un de l'autre. Ils permettent également de s'affranchir des contraintes de la langue dans des équipes sportives internationales pour transmettre des instructions tactiques aux joueurs lors de l'entraînement (van Erp, Saturday, & Jansen, 2006). Ces études ont été réalisées dans des activités sportives très diverses telles que le snowboard (Spelmezan, Jacobs, Hilgers, & Borchers, 2009), l'aviron (van Erp et al., 2006) ou encore la danse (Nakamura, Tabata, Ueda, Kiyofuji, & Kuno, 2005).

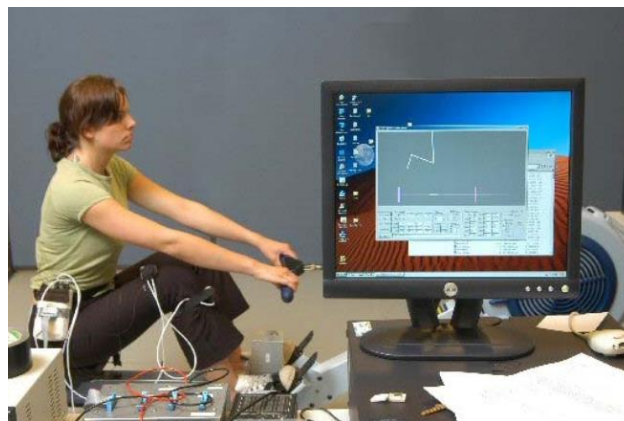


Figure 1.14 – Utilisation d'un dispositif tactile pour améliorer la coordination de rameuses (van Erp et al., 2006).

3.4.4 Réalité virtuelle et augmentée

La réalité virtuelle est un ensemble de technologies permettant de simuler une expérience sensorielle dans un environnement artificiel. Ces technologies ont été développées à la fois pour des usages récréatifs (jeux vidéo), culturels (musée, spectacles) ou encore éducatifs. Comme c'est le cas dans notre environnement naturel, les dispositifs de réalité virtuelle exploitent principalement la vision pour rendre compte de l'environnement simulé. Les dispositifs vibrotactiles peuvent alors être utilisés dans ces contextes afin de fournir des informations supplémentaires ou augmentées sur la disposition et les contraintes de l'environnement virtuel. Par exemple, stimuler la peau pour signifier un contact avec un élément de l'environnement permet d'augmenter le réalisme et la sensation d'immersion (Bloomfield & Badler, 2007). Une étude a également montré la possibilité d'explorer des objets virtuels à l'aide d'un gant intégrant plusieurs vibrateurs (Pomes, Slater, & Giannopoulos, 2012).

3.4.5 Interfaces mobiles et multimédia

Les informations vibrotactiles peuvent également augmenter les possibilités de communication interpersonnelle en étant intégrées à des interfaces mobiles. D'un point de vue technique, l'interface mobile ComTouch permet de transformer les pressions exercées sur les touches d'un appareil mobile en stimulations vibrotactiles sur un autre appareil (Chang, O'Modhrain, Jacob, Gunther, & Ishii, 2002). En parallèle, de plus en plus de travaux étudient la possibilité d'exploiter les stimuli vibratoires pour transmettre des messages plus ou moins complexes (Brewster & Brown, 2004; Tan & Pentland, 1997). Ces messages vibrotactiles peuvent, par exemple, indiquer un type d'appel ou de message (vocal, textuel ou multimédia) ainsi que sa priorité (basse, moyenne ou haute) (Brown et Brewster, 2005). Ils peuvent également remplacer certains affichages visuels présentés sur les ordinateurs (comme les barres de progression) permettant ainsi de suivre l'évolution d'un processus en cours sans solliciter la modalité visuelle (Brewster & King, 2005).

3.5 De la substitution sensorielle à la suppléance perceptive

Alors que dans les premiers travaux, l'expression *substitution sensorielle* était majoritairement employée (Bach-y-Rita, 1972; Kaczmarek et al., 1991), des études plus récentes mettent en exergue l'usage inapproprié de cette terminologie (Auvray, 2006; Lenay, Gapenne, Hanneton, Marque, & Genouëlle, 2003).

L'usage du terme « substitution » paraît inadéquat dans la mesure où le dispositif permet de réaliser certaines tâches impossibles sans la vision, sans pour autant fournir toutes les informations perçues par la rétine, comme par exemple la couleur, la luminosité, etc. Selon Bach-y-rita (2002), le TVSS ne permet pas de rendre la qualité d'une expérience visuelle. Le dispositif permet de discriminer et distinguer des événements sans permettre par exemple l'attribution d'une signification émotionnelle à la perception. Les sujets eux-mêmes ont fait part de leur déception à l'issue de leur première utilisation du dispositif. Par ailleurs, ces dispositifs fournissent des informations supplémentaires plutôt qu'une réelle substitution. Autrement dit, ils proposent une nouvelle modalité sensorielle originale plus qu'ils ne substituent une modalité préexistante. Les travaux de recherche portant sur cette thématique permettent ainsi d'étudier les mécanismes de la perception d'une nouvelle façon et notamment d'observer comment se construit ce nouveau mode de perception.

Cette remise en question, incarnée principalement par les travaux d'Auvray (2006; 2003; 2009), ne concerne pas uniquement l'emploi du terme « substitution ». Généralement, l'adjectif *sensoriel* fait référence à nos organes sensoriels et aux différents capteurs qui réagissent spécifiquement une forme de stimuli (Schmidt, 1999). L'œil, organe sensoriel de la vision, réagit aux stimuli électromagnétiques (lumière) de longueurs d'ondes comprises entre 400 et 800 nm. Ainsi, le terme « *sensorielle* » est lui aussi inapproprié dans la mesure où les dispositifs de substitution sensorielle ne fournissent pas à une personne aveugle un nouveau canal sensoriel permettant de capter la lumière. En revanche, les stimulations tactiles transmises par le dispositif permettent de percevoir certaines informations de l'environnement qui sont également accessibles par la vision. En ce sens, l'usage

de ces dispositifs relève plutôt du domaine de la perception. Pour mettre en exergue cette distinction, Auvray s'appuie également sur un ensemble de principes généraux (nécessité de l'action, mise en extériorité des percepts, plasticité structurelle et fonctionnelle du système nerveux) caractérisant la perception à l'aide d'un dispositif de substitution sensorielle.

Un des résultats majeurs des études portant sur la suppléance perceptive est la **nécessité de l'action** pour accéder à l'information. Une perception passive de la scène visuelle via ces dispositifs est très limitée tandis qu'une manipulation active du dispositif permet la réalisation de nombreuses tâches perceptives (reconnaissance de formes, de visages, etc.). La manipulation de l'input, à travers les mouvements du sujet, lui permet de faire le lien entre son action et les sensations qui en résultent (stimulations vibrotactiles). Illustrant cette idée, Lenay et al. (1997) ont utilisé un dispositif vibrotactile extrêmement simple constitué d'un seul vibreur placé sur l'index et connecté à une cellule photo-électrique. Le vibreur s'activait lorsque la luminosité atteignait un certain seuil. Après quelques minutes d'exploration le sujet était capable de localiser une cible lumineuse (direction et distance approximative). En revanche lorsque les stimulations étaient données de façon artificielle (c'est-à-dire issues de séquences d'exploration précédentes et non liées aux mouvements effectifs du sujet) les participants ne parvenaient pas à localiser l'objet dans l'espace. Il apparaît donc ici que la perception médiée par un dispositif de suppléance perceptive n'apparaît qu'après un apprentissage perceptivo-moteur. L'action motrice étant indispensable pour acquérir l'information, on peut alors considérer le terme « perceptif » comme étant plus approprié que le terme « *sensoriel* » pour qualifier ces dispositifs.

Par ailleurs, la manipulation active du dispositif permet à cette perception de s'accompagner d'une **mise en extériorité des percepts** permettant aux stimuli d'être perçus comme des objets localisés dans l'espace. Bien que la sensation tactile soit proximale, les sujets parviennent à extérioriser cette sensation pour percevoir un objet distal situé dans l'environnement (Auvray, 2006; Lenay et al., 2003). Plusieurs éléments permettent d'affirmer cette distinction entre la sensation tactile et la perception qui en résulte. Des études ont notamment montré qu'après apprentissage, la localisation de l'entrée sensorielle n'influait pas la perception

montrant ainsi que des sensations différentes conduisent à une perception identique (Auvray, 2006; Bach-Y-Rita, 2004).

L'utilisation de dispositifs de suppléance perceptive a également permis de révéler la **plasticité structurelle et fonctionnelle** de nos systèmes nerveux centraux. Il a été montré que, lors de l'utilisation d'un dispositif de suppléance, les stimulations tactiles activent des aires visuelles chez des personnes aveugles (Kupers, Sampaio, Moesgaard, Gjedde, & Ptito, 2003). Bien que l'entrée sensorielle et que le contrôle moteur soient différents de celui des muscles oculaires, le cerveau possède une capacité à recréer un espace perceptif ayant des caractéristiques similaires à celles de la vision. Cette plasticité peut être qualifiée de sensorimotrice dans la mesure où l'action motrice est nécessaire et justifie donc l'emploi des termes tels que « *sensorimotrice* » ou « *perceptive* » plutôt que « *sensorielle* ».

En définitive, ces dispositifs permettent une expérience perceptive nouvelle qui n'est pas assimilée à une perception visuelle. Il ne s'agit donc pas de substitution mais de création d'un nouvel espace de perception ayant son propre couplage sensorimoteur. Comme proposé par certains auteurs, le terme de « *suppléance perceptive* » paraît en effet plus approprié pour décrire l'expérience vécue et les processus mis en jeu lors de l'utilisation de tels dispositifs (Auvray, 2006; Lenay et al., 2003). Les résultats obtenus avec de tels dispositifs soulèvent en outre un grand nombre de questions fondamentales, comme celle du caractère modal ou amodal de nos perceptions. Ils remettent en cause la conception de la perception comme un simple flux d'informations de l'environnement vers le sujet puisque dans le cadre de la substitution sensorielle la perception se construit à partir de l'action.

Les dispositifs tactiles permettent d'aborder des questions fondamentales sur la perception humaine. Les réponses apportées à ces questions permettront ainsi d'orienter les principes de codage de l'information vibrotactile et de faire une utilisation optimale de ces dispositifs.

4 Principes généraux de codage de l'information tactile

L'efficacité d'un dispositif vibrotactile dépend en grande partie de l'intuitivité de l'information transmise sous forme tactile (Jones & Sarter, 2008; Self et al., 2008). Cette notion d'intuitivité implique que l'information soit spécifiée directement et sans ambiguïté, et en ce sens, le principe de codage utilisé est fondamental. Pour coder une information tactile, différentes approches sont possibles, tant au niveau de la nature de l'information captée que des paramètres utilisés pour la transmettre sous forme vibrotactile. Le choix d'un principe de codage est toutefois complexe et dépend à la fois des possibilités matérielles, du public visé ou encore du contexte d'utilisation.

Pour coder des informations sous forme tactile il est possible d'avoir recours à une approche dite *picturale* (Craig & Sherrick, 1982) qui consiste à transposer directement et par analogie l'information d'une modalité sensorielle vers la modalité tactile. Il s'agit du type de codage utilisé par le TVSS qui convertit l'image captée par une caméra vidéo en stimulations électriques ou vibrotactiles (Bach-y-Rita, 1972) et par l'Optacon, qui permet de convertir un texte présenté sur papier en patrons tactiles (Goldish & Taylor, 1974). L'approche dite *codée* s'appuie sur une association plus abstraite entre la stimulation tactile et sa signification (Craig & Sherrick, 1982) et en ce sens s'affranchit de la représentation visuelle de l'information. Enfin, l'approche *métaphorique* s'inspire des métaphores connues de tous pour coder une information, comme par exemple le rythme accéléré d'un battement de cœur pour alerter d'un danger (Brown, 2007). Actuellement, la modalité tactile est souvent utilisée pour transmettre des informations spécifiques en fonction du contexte et de la tâche, et qui peuvent difficilement être communiquées à travers une approche picturale. Les approches codées et métaphoriques apparaissent ainsi comme étant plus prometteuses pour transmettre plus facilement et plus directement des informations sous forme tactile. Elle nécessite toutefois de répondre à la problématique de l'adéquation entre l'information et les paramètres de la stimulation pour favoriser la perception des patrons tactiles.

Cette partie s'intéresse principalement à l'approche codée, en présentant d'une part, les caractéristiques du signal vibratoires (fréquence et amplitude) et les paramètres spatiaux et temporels de la stimulation qui sont utilisés pour transmettre une information sous forme vibrotactile. D'autre part, cette partie présentera une classification, proposée par van Veen & van Erp (2001) et permettant de distinguer les différents types d'information transmises à l'aide des dispositifs vibrotactiles selon leur fonction.

4.1 Paramètres utilisés pour coder l'information

4.1.1 Intensité

L'**intensité** fait référence à la perception subjective de la stimulation et est généralement modulée en variant l'amplitude et/ou la fréquence de vibration (**Figure 1.15**). L'utilisation de ce paramètre s'appuie notamment sur la capacité de la peau à discriminer des variations d'intensité, à condition qu'elles atteignent le seuil de différenciation qui correspond à la plus petite variation d'intensité pouvant être perçue. Il peut être déterminé de manière absolue (en dB) ou de manière relative à l'aide du ratio de Weber qui détermine le seuil par rapport à l'intensité du stimulus actuel. On utilise généralement des variations continues d'intensité (croissantes ou décroissantes) qui peuvent être associées à une variable spécifique.

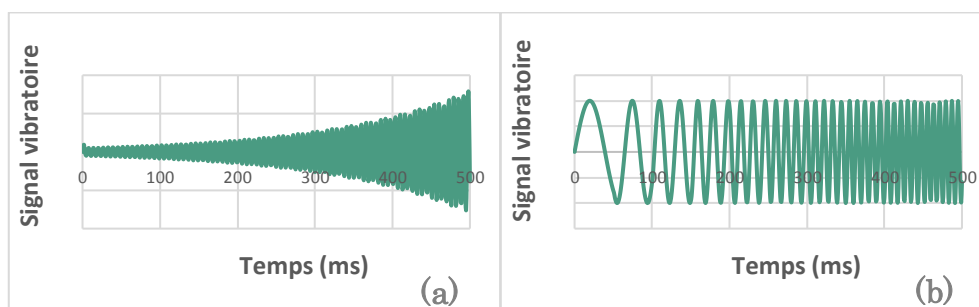


Figure 1.15 – Utilisation de l'intensité comme paramètre de codage. Une intensité croissante peut être obtenue en augmentant l'amplitude (a) ou la fréquence (b) de vibration.

4.1.2 Localisation

La **localisation** est un paramètre privilégié, notamment pour transmettre des informations spatiales en vue d'orienter le sujet ou son attention vers une localisation particulière. La large surface corporelle comprenant les mécanorécepteurs présente un avantage considérable pour l'utilisation de ce paramètre. La localisation est cependant limitée par les capacités de discrimination spatiale de la peau (p.24), notamment le seuil de discrimination, la proximité d'un point d'ancrage, etc. (Cholewiak & Collins, 2003).

4.1.3 Durée

La **durée de vibration** peut être utilisée pour communiquer de l'information, notamment en associant différentes informations ou items à une information spécifique. Geldard (1960) recommande d'utiliser des durées de stimulation entre 0.1 et 2 secondes. Cependant on remarque que les durées de stimulations utilisées varient selon les études de 50 à 800 ms (Jones & Sarter, 2008). De façon générale, il est recommandé de limiter les durées de stimulations à cause notamment du phénomène d'adaptation pouvant modifier le seuil de perception.

4.1.4 Rythmes et caractéristiques temporelles

Le **rythme** et de manière générale les **caractéristiques temporelles** de la stimulation vibrotactile sont très souvent utilisés pour coder l'information sous forme vibrotactile. Pour faire varier un rythme, il est possible de faire varier la durée des stimulations et/ou l'intervalle temporel entre les stimuli. Généralement on parle d'intervalle inter-stimulus (*inter-stimulus intervalle* ou ISI) pour désigner le délai temporel entre la fin d'une stimulation et le début de la suivante. On retrouve également le terme de *stimulus onset asynchrony* (SOA) qui correspond à la durée entre le début de deux stimuli. Il est possible d'exploiter les rythmes vibrotactiles de différentes façons, la première étant de composer différents

rythmes et d'associer chacun d'eux à une information ou un évènement spécifique. Une seconde approche consiste à utiliser des variations de rythmes en fonction des fluctuations d'une variable.

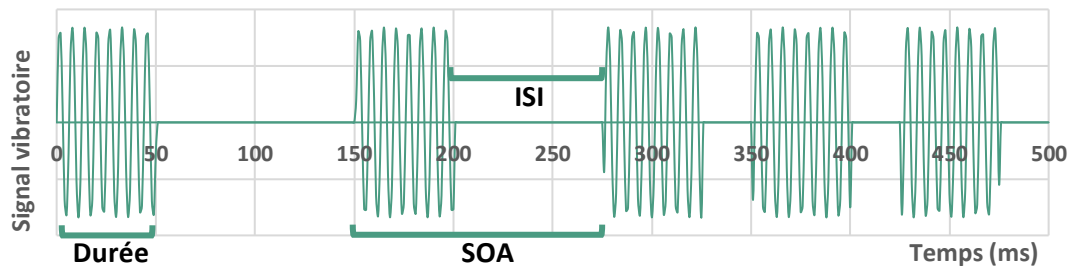


Figure 1.16 – Caractéristiques temporelles d'un patron composé de plusieurs vibrations successives.

4.1.5 Patrons spatiotemporels

Les **patrons spatiotemporels** sont des formes de stimulations particulières qui exploitent à la fois les caractéristiques spatiales et temporelles des vibrations. Ils ne constituent pas véritablement un paramètre de la stimulation à part entière, mais sont le produit d'une combinaison de paramètres spatiaux (localisation, nombre de vibreur activés, etc.) et temporels (rythme, délai entre les vibrations, etc). Ils sont créés par l'activation séquentielle de plusieurs vibreurs donnant la sensation d'un mouvement à la surface de la peau ou d'une forme géométrique évoluant au cours du temps. Ils sont parfois qualifiés de patrons ou stimulations dynamiques, en opposition aux stimulations statiques comme la localisation ou les caractéristiques temporelles qui s'appuient sur une seule dimension pour transmettre une information. En exploitant deux dimensions (spatiale et temporelle), les patrons spatiotemporels permettent d'utiliser certaines caractéristiques de la stimulation comme le sens de vibration, la taille de la stimulation, etc. Ce type de patrons a été récemment utilisé pour transmettre des informations d'approche (Cancar, Diaz, Barrientos, Travieso, & Jacobs, 2013; Rob Gray et al., 2014; van Erp, Veltman, & van Veen, 2003) et fait donc partie des principes de codage qui seront abordés plus en détails dans le chapitre suivant.

4.2 Différents types d'informations tactiles

4.2.1 Communication

Les informations communicationnelles (Castle & Dobbins, 2004) ont pour but de transmettre des concepts plus ou moins abstraits et complexes. Brewster et Brown (2004) proposent notamment d'élaborer des « icônes tactiles », appelées tactons définis comme des messages abstraits et structurés permettant de coder des informations à partir des paramètres de stimulation évoqués précédemment (i.e. intensité de vibration, durée, localisation, rythme). Ces patron tactiles peuvent par exemple coder la nature et la priorité d'un appel sur un mobile (Brown, Brewster, & Purchase, 2005) ou encore des instructions militaires transmises habituellement par le langage gestuel codé des troupes armées (Krausman & White, 2006).

La principale difficulté associée à la transmission d'informations de communication sous forme vibrotactile est la correspondance entre le patron tactile et le message auquel il renvoie qui est moins directe que pour les informations décrites dans les parties suivantes (i.e. 4.2.2, 4.2.3 et 4.2.4). Par ailleurs, Chan et al. (2005) font remarquer que l'identification des informations de communication est significativement altérée en situation de forte charge mentale mais également lorsque les sujets sont engagés dans une tâche concurrente (Oakley & Park, 2008).

4.2.2 Signaux d'alerte

Les signaux d'alerte sont des informations discrètes, généralement transmises via l'activation d'un vibreur, visant à attirer l'attention en cas de danger imminent ou d'évènement particulier. Dans ce contexte, ils peuvent constituer des informations de nature spatiale puisque la stimulation permet d'orienter l'attention dans une direction particulière (Spence & Driver, 1997). En situation de conduite automobile, ces signaux permettent d'orienter l'attention du conducteur dans des zones situées hors du champ visuel (angle mort et arrière du

véhicule) réduisant le temps réaction du freinage et limitant ainsi le risque collision (Ho, Reed, & Spence, 2006). Les dispositifs vibrotactiles d'aide à la mobilité des personnes déficientes visuelles exploitent de la même façon ces signaux d'alerte afin d'avertir de la présence d'obstacles dans l'environnement (Cardin et al., 2006; Zöllner et al., 2011). Comme nous le préciserons dans le chapitre suivant, l'utilisation de ce type d'information est en partie basée sur les liens intermodaux entre la vision et le toucher au niveau attentionnel (Gray & Tan, 2002).

4.2.3 Informations directionnelles

Les informations directionnelles permettent d'orienter un déplacement en situation de navigation, aussi bien à bord d'un véhicule qu'en déplacement pédestre. La manière la plus efficace de transmettre des informations directionnelles consiste à utiliser un dispositif constitué de vibrateurs disposés sous forme de ceinture autour de l'abdomen. La direction dans laquelle s'orienter est ensuite indiquée en stimulant la localisation correspondante autour de l'abdomen. Le codage de l'information directionnelle s'inspire donc d'un principe relativement simple et intuitif, appelé « tap-on-the-shoulder » (Tsukada & Yasumura, 2004; van Erp, 2005; van Veen & van Erp, 2003). La précision de ce type de codage est d'environ $\pm 15^\circ$ (Van Erp, 2005) et supérieure à celle observée lorsque les informations directionnelles sont données verbalement (Tsukada & Yasumura, 2004). De manière intéressante, la précision de l'orientation de l'individu peut être améliorée en couplant la stimulation au mouvement du sujet, c'est-à-dire en modifiant la localisation de la stimulation au fur et à mesure de la rotation de ce dernier (Faugloire & Lejeune, 2014). Les ceintures vibrotactiles permettent ainsi de réaliser, avec une bonne précision, des tâches de navigation comme suivre un itinéraire routier (Asif, Heuten, & Boll, 2010) ou encore atteindre des zones spécifiques, par exemple de 15 m de diamètre (van Erp et al., 2005).

4.2.4 Informations codées

Sous cette appellation, van Veen & van Erp (2001) intègrent l'ensemble des autres types d'informations pouvant être codées sous forme vibrotactile. Ce terme, proposé par van Erp, peut prêter à confusion, notamment au regard de l'approche codée décrite dans la partie 4 (p. 47). Cette catégorie renvoie à des informations plus spécifiques au contexte d'utilisation du dispositif et aux caractéristiques de la tâche. Les informations d'approche, qui font l'objet de ce travail de recherche, ainsi que d'autres informations de navigation, comme la déviation latérale en situation de pilotage, sont des exemples d'informations de ce type (Gray et al., 2014; Oskarsson et al., 2013; van Erp, Veltman, & van Veen, 2003). La transmission de ces informations via un dispositif tactile fait partie d'un champ de recherche relativement récent et les études actuelles n'ont pas permis de converger vers un principe de codage unique.

Le prochain chapitre présentera de manière détaillée comment les différents paramètres de la stimulation sont utilisés pour transmettre sous forme vibrotactile ce type d'information et plus précisément les informations d'approche.

Chapitre 2

Perception et régulation des situations
d'approche

1 Introduction

La navigation est un des domaines où les dispositifs tactiles ont reçu le plus d'attention ces dernières années et dans lequel l'utilisation cette modalité semble particulièrement efficace. De façon générale, on distingue le contrôle directionnel et la régulation de l'approche comme étant les deux composantes principales d'un déplacement ou d'une tâche de navigation (Bardy, 2014; Warren, 1988).

Comme évoqué précédemment, les informations directionnelles ont fait l'objet de nombreuses études et revues de littérature dans le domaine des interfaces vibrotactiles (van Erp, 2005). Rappelons que le codage de ces informations s'appuie principalement sur le principe du « tap-on-the shoulder » (p. 52), un principe de codage relativement simple et intuitif, permettant notamment d'orienter l'attention, la position du sujet dans l'environnement ou sa trajectoire (Ho, Tan, & Spence, 2005; van Erp, 2005). Concernant la deuxième composante, la régulation de l'approche, la problématique du codage de l'information est plus complexe. Contrairement aux informations directionnelles qui exploitent un *mapping* naturel et intuitif entre la direction et la localisation autour de l'abdomen, il n'existe pas de relation aussi intuitive à exploiter pour transmettre de telles informations.

Il apparaît néanmoins que les dispositifs vibrotactiles offrent de multiples possibilités pour coder les différentes variables informationnelles qui peuvent rendre compte d'un mouvement d'approche. D'un point de vue physique, les variables qui caractérisent une situation d'approche sont la distance et la vitesse d'approche. Plusieurs études ont donc cherché à coder ces variables sous forme vibrotactile (Gray et al., 2014; van Veen, van Erp, & Spape, 2004). Par ailleurs, certaines études sur la perception visuelle font état d'une variable optique qui pourrait être impliquée dans la régulation des mouvements d'approche et d'interception, en donnant directement accès au temps de pré-contact. Ces travaux s'inscrivent dans l'approche écologique de la perception, portée par les travaux de Gibson (1950; 1979). Récemment, des travaux se sont appuyés sur cette approche

théorique pour orienter les principes de codage des informations d'approche sous forme vibrotactile. Cette approche théorique semblant offrir de nouvelles perspectives pour la présente thématique de recherche, une attention particulière lui sera accordée dans la partie suivante.

2 Situations d'approche : définition et régulation perceptivo-motrice

2.1 L'approche écologique de la perception et de l'action

Au milieu du XX^{ème} siècle, Gibson (1950, 1966, 1979) proposa une théorie permettant d'expliquer les mécanismes qui sous-tendent la perception visuelle. Son approche s'oppose frontalement aux courants de l'époque, et particulièrement aux théories cognitivistes. Le cognitivisme s'appuie sur une approche computationnelle en empruntant les modèles du traitement de l'information (Shannon & Weaver, 1948). Les théories cognitivistes envisagent alors la perception comme nécessairement médiée (et donc indirecte) par un ensemble de processus de construction de l'information et de représentations mentales. A titre d'exemple, les théories cognitivistes considèrent que la stimulation visuelle, telle qu'elle nous parvient, ne permet pas d'accéder à un espace en trois dimensions. La stimulation sensorielle ne contenant pas l'information suffisante pour percevoir, celle-ci doit être enrichie par des processus cognitifs afin de lui donner un sens.

Gibson proposa pour sa part que le principe de représentation soit abandonné au profit d'une perception directe de l'environnement. Ces recherches ont visé à démontrer que l'ensemble des informations nécessaires au contrôle de nos actions est déjà présent dans l'environnement et ne nécessite pas de faire appel à des représentations mentales. Le caractère écologique de cette approche tient à la place de l'environnement dans le processus de perception qui, dans le sens où Gibson l'entend, constitue tout ce qui entoure l'animal et qui lui est perceptible. Un des fondements de cette théorie est la relation complémentaire entre l'individu et cet environnement, qui forment un ensemble indissociable, au contraire de l'approche

cognitiviste étudie la perception principalement du point de vue de l'individu. Plus qu'une théorie de la perception visuelle, Gibson introduit une théorie du contrôle visuel des actions motrices puisque le mouvement y occupe une place prépondérante, l'individu accédant à l'information par son exploration perceptive.

2.1.1 Invariants : l'information du point de vue de l'environnement

Lors d'une approche, la perception de la taille d'un objet reste la même malgré l'augmentation de l'angle visuel et de la taille de son image rétinienne. De manière générale, malgré des changements significatifs du stimulus lorsque l'on est en mouvement, les propriétés perçues d'un objet restent inchangées. Ce phénomène appelé consistance perceptive est à l'origine de la notion d'invariant introduite par Gibson. Ils correspondent à des patrons de stimulation spatio-temporels qui restent inchangés malgré certaines transformations du flux visuel (Michaels & Carello, 1981). Ils spécifient non seulement la disposition de l'environnement mais également l'activité du percevant dans l'environnement (vitesse, direction, etc.). Si les approches indirectes voient cette consistance comme une correction du système nerveux, l'approche écologique la considère comme une propriété de la stimulation. Autrement dit, un patron invariant a des changements constants, c'est à dire une manière particulière d'évoluer au cours du temps. Par exemple une mélodie est un patron auditif ayant une structure particulière reconnaissable peu importe l'instrument qui la joue ou encore le tempo. On appelle ce type d'invariant des *invariants structurels*. On parle également d'*invariant transformationnel* pour décrire la façon dont se transforme un stimulus et qui spécifie un changement d'état de l'objet. Ce type d'invariant fait appel à un aspect particulier de consistance perceptive, la consistance du changement (*change constancy*). Johansson (1973) en fit la parfaite illustration en plaçant dans le noir, un homme possédant des lumières fixées sur les principales articulations. Lorsque celui reste statique, l'observateur décrit des lumières comme disposées aléatoirement. Mais lorsque des mouvements familiers sont réalisés (marcher, sauter...), l'observateur perçoit bien l'homme effectuant l'activité (**Figure 2.1**). Ce résultat montre que la

forme humaine est bien distincte des invariants qui spécifient le mouvement humain.

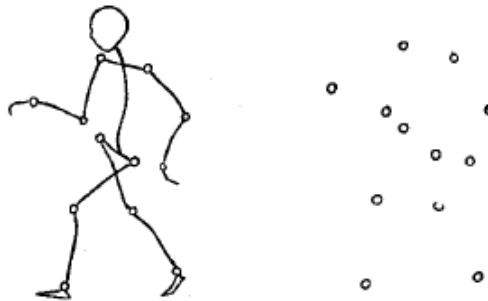


Figure 2.1 – Dans l'étude de Johansson (1973), la vue des points lumineux statiques n'évoquent rien de particulier (figure de gauche), alors que mis en mouvement par l'activité du sujet, ils sont perçus comme une forme humaine (d'après Michaels & Carello, 1981).

2.1.2 Affordances : l'information du point de vue de l'observateur

Le concept d'affordance redonne à l'individu la place prépondérante qu'il occupe dans la définition de l'information. L'idée générale qui sous-tend ce concept est qu'un observateur ne perçoit pas l'objet en lui-même mais sa fonction. Par exemple, des objets solides et plats comme des chaises ou des bancs, invitent à s'asseoir ou poser des objets dessus. Cette action à laquelle appelle naturellement un objet de l'environnement en fonction de ces caractéristiques et de celle de l'individu est appelée affordance. Selon Gibson, ce sont ces affordances et non les caractéristiques intrinsèques des objets qui sont perçues et nécessaires à la régulation de l'action. L'affordance est liée à tout le système homme-environnement et repose sur la compatibilité entre ces deux éléments du système. Elle dépend de l'individu dans le sens où les possibilités d'actions dépendent des capacités d'actions propres à chaque organisme (marcher, courir, voler, nager, etc.) D'autre part, les éléments de l'environnement suggèrent et permettent certains types de comportement selon leur structure (substance, taille, forme, etc.). En

faisant le rapport des propriétés entre le sujet et son environnement, on peut faire émerger un état optimal du système (où l'action est la plus efficace) et un état critique (au-delà duquel l'action est limitée ou doit transiter vers un autre mode). L'expérience de Warren (1988) a permis d'illustrer de manière expérimentale le concept d'affordance. Des hommes de différentes tailles devaient juger de leur capacité à monter des escaliers de hauteurs différentes. Les résultats montrent qu'en considérant le ratio entre la taille du sujet et la hauteur de la marche on parvient à un ratio identique de 0.88 quelle que soit la taille du sujet (**Figure 2.2**).

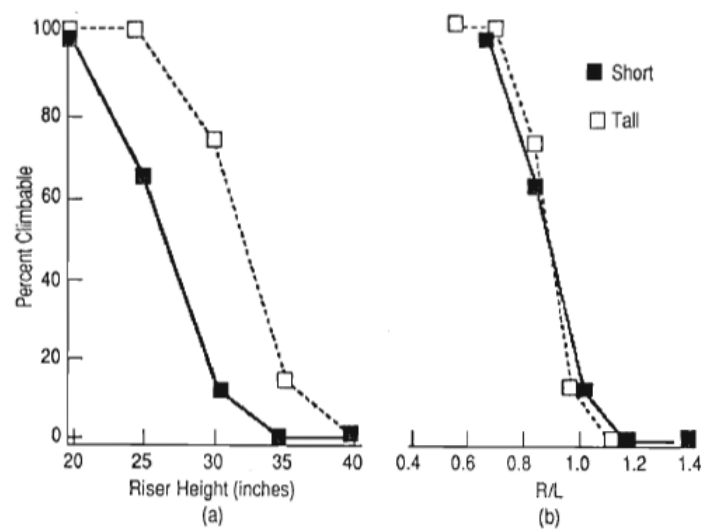


Figure 2.2 – Résultats de l'étude de Warren (1988), montrant le pourcentage d'obstacle franchi en fonction de sa hauteur (a) et du rapport entre la hauteur et la taille du sujet (b), d'après Michaels & Carello (1981).

2.1.3 Lois de contrôle : le couplage perception-action

Les versants perceptifs et moteurs sont, dans l'approche écologique, deux éléments indissociables d'un système interactif. Le mouvement est à la fois la conséquence et à l'origine d'une stimulation sensorielle. Le concept de loi de contrôle, introduit par Warren (1988), décrit la relation entre les variables informationnelles et les paramètres de contrôle du mouvement. Il s'agit d'une formalisation mathématique qui décrit la manière dont les variables informationnelles modulent les variables de contrôle de l'action dans le système

dynamique animal-environnement (**Équation 2.1**). Les forces produites par le sujet percevant pour se mouvoir vont générer un flux optique unique et spécifique au mouvement en question, les variations du flux optique spécifient alors le mouvement de régulation à produire.

$$\Delta Forces_{int} = g(\Delta flux)$$

Équation 2.1 – Formalisation générale des lois de contrôle du mouvement : $\Delta Forces_{int}$ correspond aux forces produites par l'observateur et g est la fonction par laquelle ces forces génèrent une transformation du flux optique ($\Delta flux$).

2.2 Définition et caractéristiques des situations d'approche

Dans l'approche écologique, on distingue les différents comportements moteurs, ou modes d'action (Warren, 1988), principalement en fonction des lois de contrôle étant impliquées dans leur régulation. Certaines études ont été réalisées sur les différents modes d'action des insectes volants (Gibson, 1958, 1966 ; Warren, 1988). Gibson (1966) distingua trois types de comportements moteurs chez les insectes volants :

- Position statique au-dessus du sol (vol stationnaire)
- Déplacement orienté (vol de croisière)
- Orientation temporaire vers un objet (approche, poursuite ou atterrissage)

Warren (1988) décrit ces différents modes d'action en fonction des lois de contrôle impliquées dans le mouvement, selon les différents degrés de liberté d'un insecte volant : verticaux, horizontaux (vers l'avant), roulis et lacet (les mouvements de tangage et de translation latérales sont négligés car très complexes et influençant peu le contrôle du mouvement). Dans la phase de **vol stationnaire**, l'insecte maintient une position constante dans l'environnement. Son mouvement est nul dans les trois axes et le flux optique qui en résulte est nul également (nécessité parfois d'une régulation par rapport à des perturbations internes ou externes). Le **vol de croisière** est semblable à un vol stationnaire dans lequel la

composante horizontale serait non nulle, ce qui correspond à un mouvement vers l'avant. Le mouvement d'**approche** est décrit comme un vol de croisière mais orienté vers un objet précis, ce qui revient pour l'insecte à orienter son axe longitudinal vers cet objet (phénomène de fixation). Après la fixation, cette phase se caractérise par un mouvement de translation vers l'objet. La phase d'**atterrissage** est celle qui généralement suit l'approche. Elle implique deux contraintes supplémentaires : la nécessité d'*initier* la décélération au bon moment et de la *réguler* jusqu'au contact afin que celui-ci soit le moins brutal possible. Dans les comportements de **poursuite**, la trajectoire est régulée en fonction de la position optique de l'objet. Les mouvements de translation vers la cible sont régulés selon des lois de contrôle permettant de maintenir la distance avec la cible et d'éviter ainsi le contact.

Bien qu'étudiés dans le cadre du mouvement des insectes, ces modes d'actions peuvent être transférés aux comportements humains (Warren, 1988) et à l'ensemble des situations de gestion des contacts avec l'environnement. L'approche et l'atterrissage sont les modes d'actions mis en jeu dans la majorité des mouvements d'approche (pilotage d'un avion ou d'un hélicoptère, conduite automobile, etc.). Nous considérerons comme situation d'approche, l'ensemble des tâches mettant en jeu les comportements d'approche et d'atterrissage tels qu'ils ont été décrits par Warren (1988), c'est-à-dire, une situation de déplacement orienté vers un objet de l'environnement et dans laquelle le mouvement doit être régulé afin d'obtenir le type de contact souhaité. La régulation de ce type de tâche s'appuie principalement sur la variable τ et sa dérivée temporelle $\dot{\tau}$, ainsi que diverses informations du flux optique.

2.3 Variables impliquées dans la régulation d'une approche

Selon l'approche écologique de la perception, le contrôle visuel des déplacements repose sur les propriétés du flux optique (Gibson, 1979). Lorsqu'un observateur est en mouvement, les différents éléments de l'environnement défilent

sur l'image rétinienne, dans le sens opposé au déplacement (**Figure 2.3**). La structure du flux optique spécifie le type de mouvement (rotation, translation, etc.), la direction ou encore la vitesse de déplacement. En situation d'approche, le flux optique donne accès à différentes variables permettant de réguler précisément le mouvement.

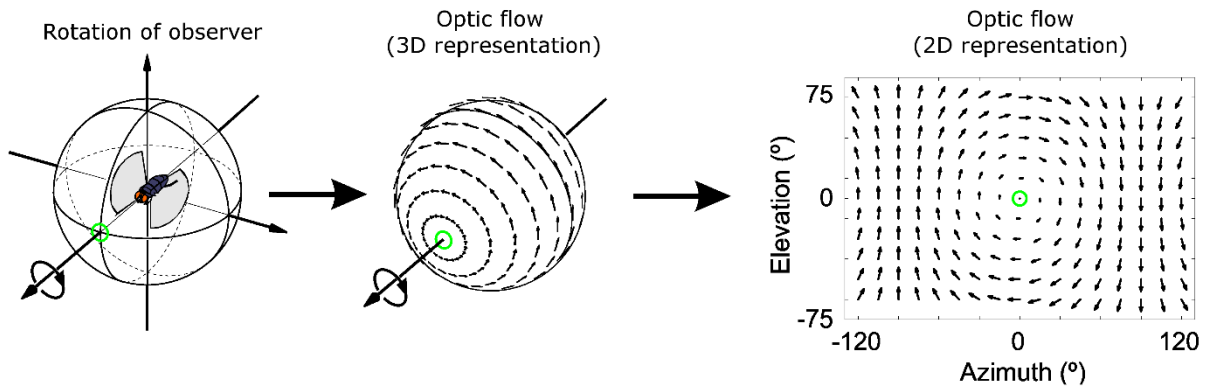


Figure 2.3 – Exemple de flux optique généré par un mouvement de rotation (représentation 3D et 2D ; Huston & Krapp, 2008).

2.3.1 L'estimation du TTC à partir de la variable tau (τ)

Lors d'un mouvement d'approche, le flux optique est caractérisé par une expansion radiale des différents éléments de l'environnement. D'un point de vue optique, cette forme en expansion (ou contraction) correspond à l'angle visuel entre l'objet et la rétine de l'observateur (**Figure 2.4**). On parle également de taille angulaire d'un objet, elle dépend à la fois par la taille physique de l'objet et la distance à laquelle elle se trouve de l'observateur. Un angle visuel de 180° , par exemple, spécifie un contact entre l'objet et le point d'observation. Gibson parle alors de « loi générale de la perspective naturelle », car s'appliquant à tous les systèmes homme-environnement.

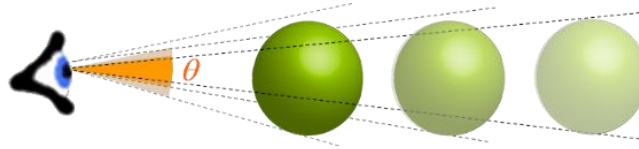


Figure 2.4 – Illustration de la taille angulaire d'un objet (θ).

En 1957, Hoyle, auteur de science-fiction et astronome, raconta dans un de ces romans que des astronomes étaient parvenus à calculer le temps nécessaire pour qu'une comète dont on ignorait la taille atteigne la Terre. Ce temps correspondait au ratio entre la taille angulaire de l'objet (θ) et son taux d'expansion. Plus tard, Lee (1976) proposa que le système perceptif humain puisse être sensible à cette relation et l'utilisait pour estimer le temps de pré-contact d'un objet approchant, à travers un invariant optique transformationnel appelé τ (**Équation 2.2**). Les variations temporelles de la taille angulaire correspondent à son taux d'expansion et décrivent un patron en *looming*, plus l'objet s'approche du sujet, plus sa taille augmente rapidement (**Figure 2.5**). C'est cette accélération dans l'évolution du patron optique qui spécifie une collision imminente, c'est-à-dire la variable optique tau qui spécifie le TTC.

$$\tau = \frac{\theta}{\dot{\theta}} \approx TTC$$

Équation 2.2 – Spécification du TTC à l'aide de la variable tau (τ), correspondant au ratio entre la taille angulaire d'un objet (θ) et sa dérivée temporelle ($\dot{\theta}$).

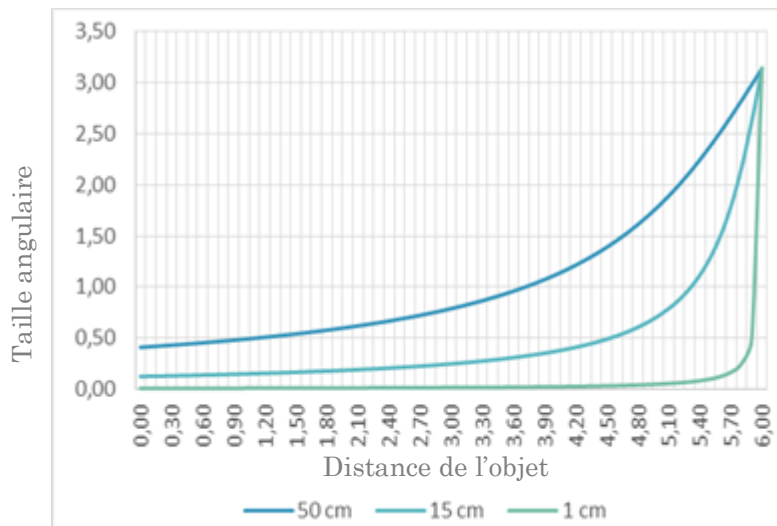


Figure 2.5 – Evolution de la taille angulaire d'un objet au cours d'une approche et pour différentes tailles physiques. Conditions initiales : distance de l'objet = 6 m ; vitesse d'approche = 20 m/s.

Pour étudier la perception du TTC telle que Lee (1976) l'a envisagée, plusieurs études se sont appuyées sur le paradigme de jugement de TTC (e.g. Schiff & Oldak, 1990). La tâche consiste en général à simuler l'approche d'un objet vers le sujet (ou vers un autre élément de l'environnement), qui doit ensuite appuyer sur un bouton au moment où il estime que le contact a lieu. Cette tâche, ainsi que ces différentes variantes, sont très utilisées en psychologie expérimentale et permettent d'étudier la sensibilité de notre système perceptif à la variable τ durant une phase d'approche. D'autres études, manipulant l'expansion optique au cours de l'approche, sont venues renforcer l'hypothèse selon laquelle cette variable serait utilisée pour réguler une approche.

Le TTC est déterminant dans la gestion des contacts avec l'environnement, notamment pour initier certaines actions juste avant un contact. C'est le cas lors de la dernière phase de l'atterrissage d'un avion consistant à relever l'avant de l'appareil juste avant le contact avec le sol. Déclencher trop tôt la manœuvre pourrait déstabiliser l'avion et l'initier trop tard augmenterait le risque de collision. La réussite de la manœuvre tient donc à la précision temporelle de son initiation par le pilote. Dans ce type de tâche, l'utilisation de τ pour estimer le TTC et initier la manœuvre à partir d'une valeur critique du TTC semble être une

meilleure stratégie que l'utilisation d'une altitude limite (Gray et Regan, 1998 ; Mulder et al., 2000).

2.3.2 La régulation de la décélération à partir de la variable optique $\dot{\tau}$

Pour réguler un mouvement de freinage, l'usage d'une stratégie impliquant la variable $\dot{\tau}$, correspondant à la dérivée temporelle de la variable optique τ , est l'hypothèse la plus probable et la plus étudiée dans la littérature. Celle-ci part d'un constat relativement simple : lorsque l'on doit réaliser un freinage à un endroit précis (devant un obstacle par exemple) avec $\dot{\tau}$ maintenu constant, on distingue trois cas de figure (**Tableau 2.1**) :

- Si $\dot{\tau}$ est inférieur à -0.5, l'arrêt est prématuré ;
- Si $\dot{\tau}$ est égal à -0.5, l'arrêt se fait juste à l'endroit souhaité ;
- Si $\dot{\tau}$ est supérieur à -0.5, l'arrêt est trop tardif et peut aboutir à une collision.


La variable $\dot{\tau}$ indique donc si le niveau de décélération est suffisant ou non pour s'arrêter sur une cible. En pratique, plusieurs stratégies s'appuyant sur $\dot{\tau}$ peuvent être utilisées. L'hypothèse de départ formulée par Lee (1976) proposait une stratégie de maintien de la variable à une valeur de référence environ égale à -0.5. Cependant, cette stratégie implique une décélération constante et prolongée. De plus, pour assurer le freinage, il n'est pas nécessaire de maintenir $\dot{\tau}$ à cette valeur durant toute la durée de l'action. Une autre stratégie pourrait s'appuyer sur la nature de l'écart (positif ou négatif) à $\dot{\tau}$:

- Lorsque $\dot{\tau}$ s'éloigne positivement (> -0.5) la décélération doit être réduite,
- Lorsque $\dot{\tau}$ s'éloigne négativement (< -0.5) la décélération doit être augmentée.

La variable serait donc utilisée pour connaître la direction dans laquelle l'ajustement doit être réalisé. Une stratégie similaire consisterait à prendre en compte à la fois de la nature et de l'amplitude de l'écart à $\dot{\tau}$. Cette stratégie permet

de corriger la décélération tant sur le plan qualitatif (augmentation ou diminution) que quantitatif (amplitude de la correction).

Tableau 2.1 – Caractéristiques du freinage pour différentes valeurs maintenue de tau dot.

| Valeur de tau dot | -1 | -0,9 | -0,8 | -0,7 | -0,6 | -0,5 | -0,4 | -0,3 | -0,2 | -0,1 | 0 |
|--|------------------------|------|--------------------|------|------|------------------------|--|------|------|-----------------|---|
| Résultat freinage | Collision | | | | | Parfait | Réussi | | | | |
| Nature collision / Distance arrêt | Sévère ← ————— → Douce | | | | | Juste avant l'obstacle |  | | | | |
| Nature et amplitude de la décélération à fournir | + | | | | | Aucun | - | | | | |
| Profil vitesse | Constante | | Décroissante | | | Décroissante Linéaire | Décroissante | | | Sujet à l'arrêt | |
| Profil décélération | Nulle | | Tend vers ∞ | | | Constante | Tend vers 0 | | | | |

Les hypothèses concernant l'utilisation de $\dot{\tau}$ s'appuient sur des analyses cinématiques de différentes situations d'approche et qui montrent qu'un arrêt réussi est caractérisé par un $\dot{\tau}$ d'environ -0.5. Kim & Carello (1993) ont simulé des approches avec différentes valeurs de constantes de $\dot{\tau}$. Lorsque les sujets doivent juger de la sévérité d'un contact à venir, la limite entre un contact jugé « doux » et une collision sévère correspond à une valeur de $\dot{\tau}$ égale à -0.5. Yilmaz & Warren (1995) ont testé l'utilisation de ces différentes stratégies dans une simulation de freinage où les informations disponibles dans l'environnement étaient manipulées (vitesse, distance, $\dot{\tau}$, θ). Les performances des sujets étaient alors plus affectées par l'absence d'information concernant $\dot{\tau}$ et θ . Cependant, certaines limites à l'utilisation de $\dot{\tau}$ ont été soulignées, notamment le fait qu'elle nécessiterait que le

système perceptif puisse percevoir une variable de second ordre, ce qui paraît difficilement envisageable dans le cadre de l'approche écologique (Nakayama, 1985).

2.3.3 Variables liées à la texture du sol

Il est possible de réguler une approche grâce à d'autres variables informationnelles, notamment dans le cas d'approches présentant une composante verticale, comme c'est le cas dans le cadre du pilotage. Le flux optique produit par les éléments au sol permet d'accéder à d'autres variables permettant de percevoir les changements d'altitude et/ou de réguler une approche vers le sol.

*Splay angle et depression angle*¹

La structure verticale et horizontale des éléments au sol donne accès à deux types de variables principalement utilisées pour réguler des approches verticales vers le sol. Les textures de sol ayant une structure perpendiculaire à la trajectoire favorisent l'accès au *depression angle*. Il correspond à l'angle formé, au niveau de la rétine d'un observateur, par l'horizon et le contour d'un objet perpendiculaire à la trajectoire de l'observateur. Les textures dont la structure géométrique est parallèle à la trajectoire de l'observateur permettent de percevoir plus facilement le *splay angle*. Celui-ci décrit l'angle formé, au point d'observation, entre la ligne décrivant la trajectoire de l'observateur et une ligne au sol qui lui est parallèle, comme une route par exemple (**Figure 2.6**). Les textures quadrillées permettraient quant à elles d'accéder aussi bien à l'une ou l'autre de ces deux variables (Flach, Hagen, & Larish, 1992). Pour détecter les structures de l'environnement et ainsi accéder à ces deux variables, des objets de l'environnement dont la taille et la forme sont familières pourraient être utilisés (arbres, routes, etc). Plusieurs études

¹ Les termes anglais ont été conservés car aucune traduction française n'a été trouvée dans la littérature.

neurophysiologiques mettent en évidence une sensibilité du système visuel au *splay angle* (Regan, Gray, & Hamstra, 1996). Par ailleurs, il semblerait que celle-ci soit prédominante pour détecter les changements d'altitude (Flach et al., 1992; Wolpert, 1988). Le contexte de la tâche (but recherché à travers le contrôle de l'altitude) semble cependant tenir une place cruciale dans le type de variable utilisée. Le *depression angle* serait privilégié en vol stationnaire, lorsque la vitesse horizontale est nulle (Flach et al., 1992). En effet, cette variable étant modifiée également par les mouvements vers l'avant, elle est plus facilement détectable lorsque ceux-ci sont nuls. Les études actuelles ne permettent pas de préciser quelles stratégies de régulation sont utilisées avec le *splay angle* ou le *depression angle*, ni quelles sont les lois de contrôle mises en jeu. Toutefois, il se pourrait qu'elles soient utilisées de la même façon que la taille angulaire pour estimer le TTC.



Figure 2.6 – Différents types de textures donnant accès au *splay angle* et au *depression angle*: (a) perpendiculaires ou (b) parallèles à la trajectoire et en quadrillage.

Global optical flow rate (GOFR) et edge rate (ER)

La densité des éléments de texture du sol apporte également des informations cruciales pour la régulation d'approche aussi bien horizontale que verticale. La vitesse du flux optique global (*global optical flow rate* ou GOFR) correspond à la vitesse angulaire des éléments au sol dans une direction donnée (celle de la trajectoire généralement) (Fajen, 2005). En d'autres termes, GOFR correspond à la vitesse de déplacement d'un observateur en tenant compte de la position

verticale du point d'observation (**Équation 2.3**), plus l'observateur est proche du sol, et plus la vitesse de défilement des éléments de texture. A vitesse horizontale constante, GOFR spécifie l'altitude à laquelle se trouve l'observateur, à l'inverse, lorsque l'altitude est maintenue constante, GOFR devient alors une source d'information concernant la vitesse horizontale.

$$GOFR = \frac{v}{e}$$

Équation 2.3 – Calcul du GOFR en fonction de la vitesse (v) et de la hauteur du déplacement (e).

La variable ER (edge rate) correspond au nombre d'éléments de texture passant par un point fixe du champ visuel par unité de temps (François, Morice, Bootsma, & Montagne, 2011). A l'inverse du GOFR, l'ER est indépendant de la hauteur de déplacement et dépendant uniquement de la densité des éléments de texture du sol. On en sait peu sur la façon dont cette variable est utilisée dans la régulation du mouvement mais il est possible qu'elle influence la vitesse perçue lors d'un déplacement (Larish & Flach, 1990).

Si les deux variables semblent avoir des effets qui se cumulent (Larish & Flach, 1990), plusieurs études, et notamment les travaux de Fajen (2005, 2008) ont montré que GOFR occupait une part plus importante que ER dans la régulation du freinage. Dans son modèle de la décélération idéale (*deceleration error model*), il propose une alternative à l'hypothèse d'une régulation basée sur \dot{t} . GOFR serait combinée à τ pour réguler la décélération d'une approche horizontale (

Équation 2.4). La décélération idéale est celle permettant au sujet s'arrêter à temps sans avoir besoin de faire d'ajustement durant l'action. Ainsi lorsque $d_{idéale}$ est inférieure à $d_{actuelle}$ les sujets augmentent la décélération, dans le cas inverse, ils diminuent la décélération.

$$d_{idéale} = \frac{GOFR}{2\tau}$$

Équation 2.4 – Estimation de la décélération idéale à partir du GOFR et de τ .

3 Principes de codage des informations d'approche

La distance (ou l'altitude) et la vitesse d'approche sont les variables que l'on retrouve de manière prépondérante dans le domaine des interfaces vibrotactiles lorsqu'il s'agit de transmettre des informations d'approche. Plus récemment, le TTC a également été considéré dans plusieurs études pour être transmis sous forme tactile. Parmi les différents paramètres de la stimulation décrits dans le Chapitre 1 (intensité, durée, localisation, paramètres temporelles et patrons spatiotemporels), seuls trois ont été utilisés pour transmettre ces différentes variables informationnelles. Les premières études consistaient à utiliser les paramètres d'un seul vibreur, le rythme ou l'intensité, variant selon l'imminence d'un contact avec un objet de l'environnement. Une seconde approche, issue de travaux plus récents, consiste à utiliser plusieurs vibreurs ; les caractéristiques spatiotemporelles sont alors exploitées pour transmettre l'information.

3.1 Codage de l'information à l'aide d'un seul vibreur : rythme et intensité comme paramètres privilégiés

La majorité des études, en particulier les plus anciennes, a tenté de retranscrire la distance sous forme de stimuli vibrotactiles à travers des variations d'intensité (Cardin et al., 2006; Carton & Dunne, 2013) ou de rythme (Riener & Hartl, 2012; van Erp et al., 2005; van Veen, van Erp, & Spape, 2004; Zöllner et al., 2011). L'intensité ou le rythme varient généralement de manière croissante à l'approche du contact afin d'attirer l'attention du sujet sur l'évènement à venir, cette augmentation pouvant prendre différentes formes. En s'intéressant à ces deux paramètres certaines études ont étudié de façon plus approfondie le lien entre le paramètre de la stimulation et la variable informationnelle.

3.1.1 Principes de codage basés sur les caractéristiques temporelles et le rythme de vibration

La très bonne discrimination par la peau des caractéristiques temporelles des stimuli vibratoires a été mise en évidence à différentes reprises (Brewster & Brown, 2004; Petrosino & Fucci, 1984, 1989). Plusieurs études ont alors proposé d'exploiter cette propriété de la modalité tactile pour transmettre des informations d'approche, principalement à travers le rythme de vibration.

La principale problématique concernant l'utilisation du rythme pour coder des informations d'approche est de définir quel type de rythme permet d'accéder le plus précisément à cette information. On distingue généralement deux types de relation entre le rythme et la distance : une augmentation linéaire ou exponentielle (ou assimilable à une croissance exponentielle). C'est dans cette optique que van Erp et ses collaborateurs (van Erp et al., 2005; van Veen et al., 2004) ont comparé plusieurs patrons variant selon le rythme de vibration (en fonction de la distance) dans une tâche de navigation en contexte naturel avec plusieurs *waypoints* (étapes de navigation) à atteindre successivement. La durée des stimulations était fixée à une seconde et le délai inter-stimulus (ISI) variait de 0 à 10 secondes en fonction de la distance. Dans la condition « monotone », la relation entre l'ISI et la distance était linéaire : l'ISI de départ était de dix secondes et diminuait jusqu'à être nul (i.e. stimulation continue). Dans la condition « 3 phases », la navigation entre deux *waypoints* était divisée en trois phases, associées chacune à un ISI particulier (**Figure 2.7**). Au départ d'un *waypoint* (moins de 15 mètres), l'ISI était de 2 secondes (phase 1), puis passait à 6 secondes (phase 2). A l'approche d'un *waypoint* (moins de 20 mètres), là où les informations sur la distance sont particulièrement importantes, l'ISI passait de 6 à 1 seconde (phase 3). Une condition contrôle où le rythme de vibration est constant (ISI de 2 secondes) fut également testée. Dans les deux études en question, aucune différence entre les deux types de codage n'a pu être observée au niveau du temps de parcours. Ce résultat montre que les informations sur la distance n'améliorent pas la régulation de ce type de tâche, mais il n'implique pas nécessairement que le codage de l'information ne soit pas

approprié. Cette absence de différence entre les trois codages pourrait s'expliquer par le fait que les participants avaient simultanément accès aux informations directionnelles (i.e. direction du prochain waypoint). Celles-ci pouvaient être suffisantes pour atteindre l'objectif de la tâche, impliquant alors que les informations sur la distance ne soient pas utilisées.

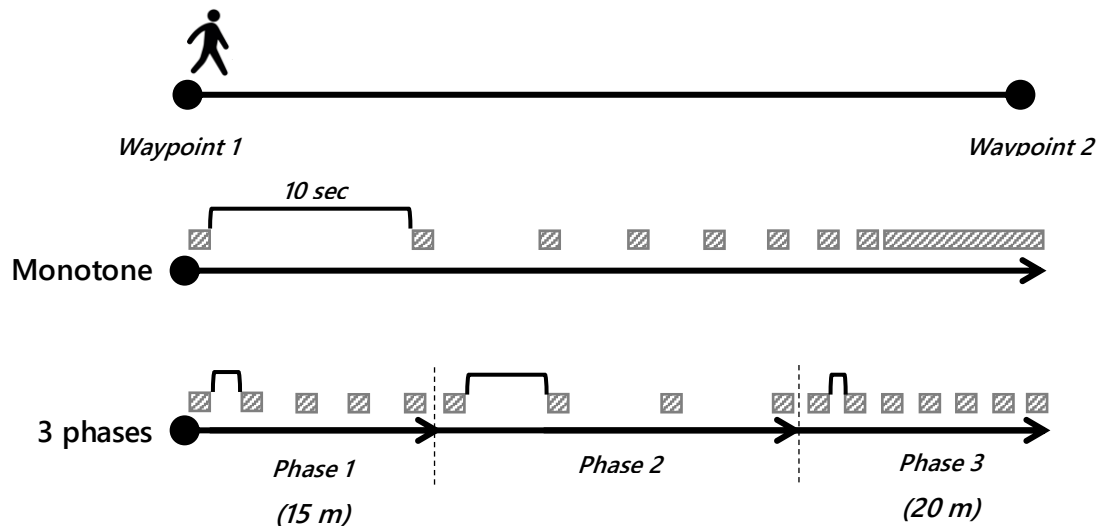


Figure 2.7 – Illustration des patrons utilisés par van Veen et al. (2004). Entre deux waypoints, le rythme de vibration varie selon la distance restante à parcourir. Le codage « monotone » utilise un ISI qui décroît proportionnellement à la distance restante (de 10 à 0 secondes). Le codage en trois phase utilise trois types de rythme, associés une phrase spécifique de l'approche.

Dans une démarche similaire, Riener & Hartl (2012) ont mené une étude dans laquelle les participants, dont la vue était occultée, devaient marcher et s'arrêter à 40 cm d'un mur. Cette tâche était réalisée en s'appuyant sur des stimulations vibrotactiles informant de la distance de l'obstacle, à travers une augmentation du rythme de vibration pouvant prendre deux formes. Un premier type de rythme, dit linéaire, consistait en une augmentation constante tous les 0,7 mètres. Le rythme dit exponentiel augmentait une première fois entre 2 et 1 mètre(s), puis entre 1 et 0,6, et enfin à moins de 0,6 mètre du mur. Leur expérience n'a pas mis en évidence de différences significatives entre ces deux types de codage en ce qui concerne le temps de déplacement. Cependant on observe qu'avec l'utilisation de ces informations tactiles, la vitesse de marche est significativement plus importante

au début de l'approche (jusqu'à environ 1 mètre de l'obstacle), et plus faible à proximité du mur (moins d'un mètre). Ce changement dans la régulation de la vitesse de marche montre que lorsque la vision est occultée, le rythme de vibration permet d'accéder à des informations sur la distance d'un obstacle. Cependant, si les participants semblent percevoir l'augmentation du rythme, et donc les variations de distance, il leur est en revanche impossible de discriminer le type de variation (i.e. linéaire ou exponentielle).

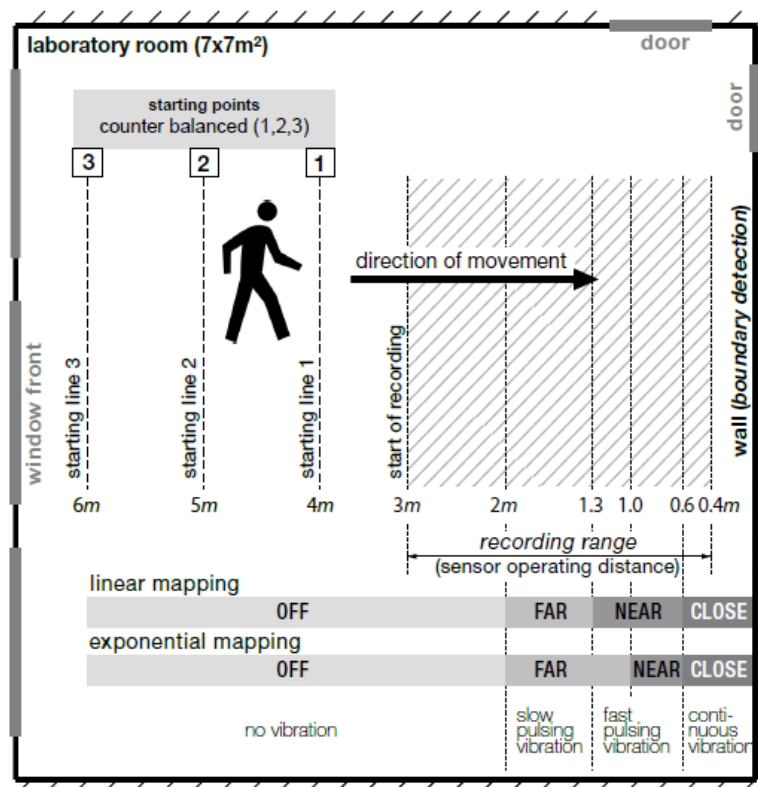


Figure 2.8 – Schéma expérimental utilisé par Riener & Hartl (2012). Les participants démarraient à 6, 5 ou 4 mètres du mur et devaient s'avancer jusqu'à 40 cm du mur. Le dispositif tactile s'activait à moins de 2 mètres du mur, selon deux types de rythmes. Les intervalles de distance « far », « near » et « close » correspondent à trois rythmes de vibration différents.

Asif et al. (2010) ont émis l'hypothèse selon laquelle les paramètres temporels (rythme et durée de vibration) seraient plus efficaces pour transmettre des informations sur la distance lorsqu'ils sont combinés entre eux ou à un autre paramètre comme l'intensité. Dans une étude réalisée en condition réelle de

conduite automobile, un dispositif vibrotactile permettait d'accéder à des informations sur la distance selon trois codages différents : un codage basé uniquement sur une variation de rythme, un codage s'appuyant sur une variation à la fois du rythme et de l'intensité et un dernier codage basé sur le rythme et la durée globale de la stimulation (**Figure 2.9**). La tâche consistait à suivre un itinéraire routier en faisant le moins d'erreur possible (le dispositif indiquait la direction du prochain changement et sa distance à l'aide d'un des trois principes de codage). Les participants faisaient significativement moins d'erreurs avec le codage variant en rythme et durée de stimulation (0 à 4,7% en fonction de l'indication), notamment en comparaison du rythme seul (7,2 à 26% d'erreur) et jugeaient également ce moyen de codage comme étant le plus simple à appréhender (69%). Ainsi, la combinaison de deux paramètres temporels, le rythme et la durée de stimulation, améliore significativement les performances par rapport à l'utilisation seule du rythme (ou du rythme et de l'intensité).

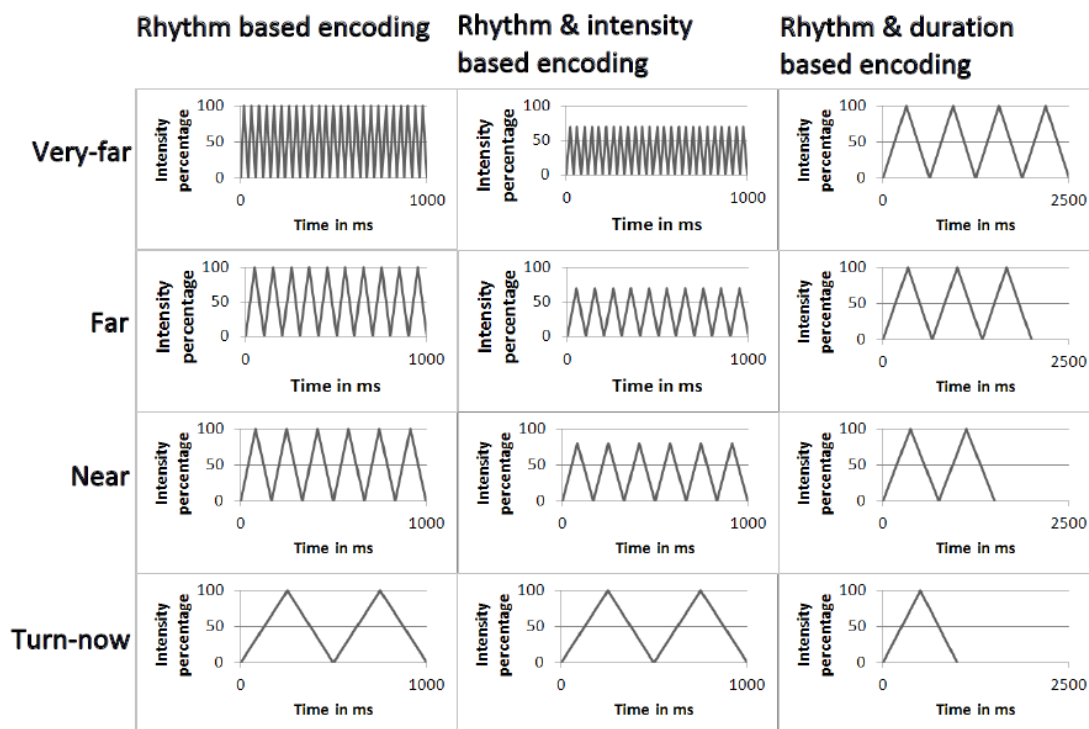


Figure 2.9 – Schématisation des différents patrons utilisés par Asif et al. (2010). Dans le premier codage, le rythme diminue à mesure que l'on s'approche du croisement. Dans le second, le rythme diminue et l'intensité augmente en fonction de la distance. Le dernier codage fait varier le nombre et la durée des vibrations.

Enfin, une étude récente a proposé une autre façon d'exploiter les caractéristiques temporelles de la stimulation pour spécifier la distance d'un élément de l'environnement. Hartcher-O'Brien, Auvray, & Hayward (2015) ont en effet proposé un feedback tactile (sollicité par le sujet par pression d'un bouton) qui déclenche une vibration avec un délai temporel proportionnel au temps de pré-contact (TTC). Ce principe de codage s'appuie sur la relation physique qui lie la distance et le TTC lors d'un mouvement d'approche. En prenant comme référence une vitesse d'approche d'1 m/s, le délai (en seconde) correspondait alors exactement à la distance (en mètre) séparant l'observateur de l'obstacle. Sans que cette relation ne leur soit explicitée, les participants étaient capables de juger la distance de l'obstacle avec une erreur d'environ 0.1 m (pour des distances initiales entre 0.5 et 3.5 m). Par ailleurs, l'absence de différence entre le pré-test et le post-test laisse supposer que cette relation entre le temps et la distance est spontanément appropriée.

3.1.2 Principes de codage basés sur l'intensité

La distance d'un obstacle peut aussi être spécifiée à travers une augmentation de l'intensité de vibration. Cardin et al. (2006) ont étudié la précision d'un jugement de distance lorsque ce paramètre est utilisé pour coder l'information. Les participants devaient estimer la distance absolue ou relative (i.e. identifier parmi deux objets celui étant le plus proche) de différents objets placés à 45, 90, 135 ou 180 cm. Leurs résultats montrent une précision de 57% pour le jugement absolu et 73% pour le jugement relatif. Ces résultats paraissent encourageants dans la mesure où les participants réalisaient ce jugement sans pouvoir déplacer le dispositif. Compte tenu de l'importance de l'action pour accéder à l'information lors de l'utilisation d'un dispositif tactile, on peut penser que le jugement serait plus précis si des mouvements d'exploration avaient été rendus possibles.

L'utilisation de ce paramètre est lié à l'efficacité des signaux auditifs pour réduire le risque de collision en situation d'approche et notamment durant la conduite automobile (e.g., Gray, 2011). Ces études utilisent des signaux auditifs de

type *looming*, dont l'intensité croît de manière exponentielle, tel que cela se produit naturellement lorsqu'une source sonore s'approche d'un individu (Hall & Moore, 2003; Shaw, McGowan, & Turvey, 1991). Compte tenu des résultats prometteurs obtenus avec la modalité auditive, ce type de patron lié à l'intensité a également été envisagée pour transmettre des informations sous forme vibrotactile. Dans une étude de Ho, Spence, & Gray (2013), plusieurs stimulations tactiles, d'intensité constante ou croissante (i.e. linéaire et *looming*) étaient utilisées pour avertir les sujets d'une collision à venir. Leurs résultats montrent que la présentation d'informations vibrotactiles en complément de la vision améliore significativement le temps réaction du freinage (d'environ 20%), en revanche aucune différence significative entre les différents types de relation n'a pu être observée. Gray, Ho, & Spence (2014) ont réalisé une étude similaire en comparant ces signaux de type *looming* à des signaux dont l'intensité est liée à la vitesse d'approche. A nouveau, bien que l'ajout d'informations tactiles réduise significativement le temps de réaction du freinage, les performances sont identiques quel que soit le type de relation utilisé. Les résultats de ces études montrent que les patrons d'intensité constante, même lorsqu'ils sont liés à la vitesse d'approche ou au TTC, permettent d'alerter le sujet sur la collision à venir (réduisant ainsi le temps de réaction) mais n'ont pas de caractère informatif pour la régulation de l'approche.

3.1.3 Comparaison entre les paramètres mobilisant un seul vibreur

Qu'il s'agisse des paramètres temporels ou de l'intensité de vibration, les résultats des différentes études font apparaître des résultats plutôt mitigés. Certes, lorsque la vision est occultée, ces deux paramètres permettent un jugement relativement précis de la distance d'un obstacle, mais ils ne semblent pas permettre d'amélioration dans des tâches de navigation lorsque la vision est disponible. Par ailleurs, la comparaison entre différents types de rythme / intensité n'a pas permis de mettre en évidence un principe de codage se distinguant des autres.

Certaines recherches ont établi des comparaisons à un autre niveau, en confrontant ces deux paramètres. Riener & Ferscha (2008) ont ainsi étudié le jugement de distance à partir de stimulations vibrotactiles basées sur une variation de rythme ou d'intensité, afin de déterminer si l'un de ces deux paramètres devait être privilégié. Dans cette étude, l'intensité était liée de façon linéaire à la distance, avec une intensité minimum (33%) à 4,35 m et plus d'un obstacle et une intensité maximum (100%) à son contact (**Figure 2.10**). Le rythme augmentait à l'approche de l'obstacle, sur la base d'une réduction de la durée de vibration et du délai inter-stimulus (**Équation 2.5**). Ces codages étaient ainsi présentés aux sujets dans une phase de familiarisation, avant que ceux-ci ne doivent estimer plusieurs distances présentées aléatoirement. Les auteurs ont ainsi montré que les réponses étaient plus précises avec une stimulation variant en intensité (écart moyen à la distance réelle de 0,299 m \pm 0,223) qu'en rythme (0,401 m \pm 0,321).

$$dv [ms] = isi [ms] = \frac{d * 2000}{2 * 4,35}$$

Équation 2.5 – Spécification de la durée de vibration (dv) et du délai inter-stimulus (isi) en fonction de la distance (d) (Riener & Ferscha, 2008).

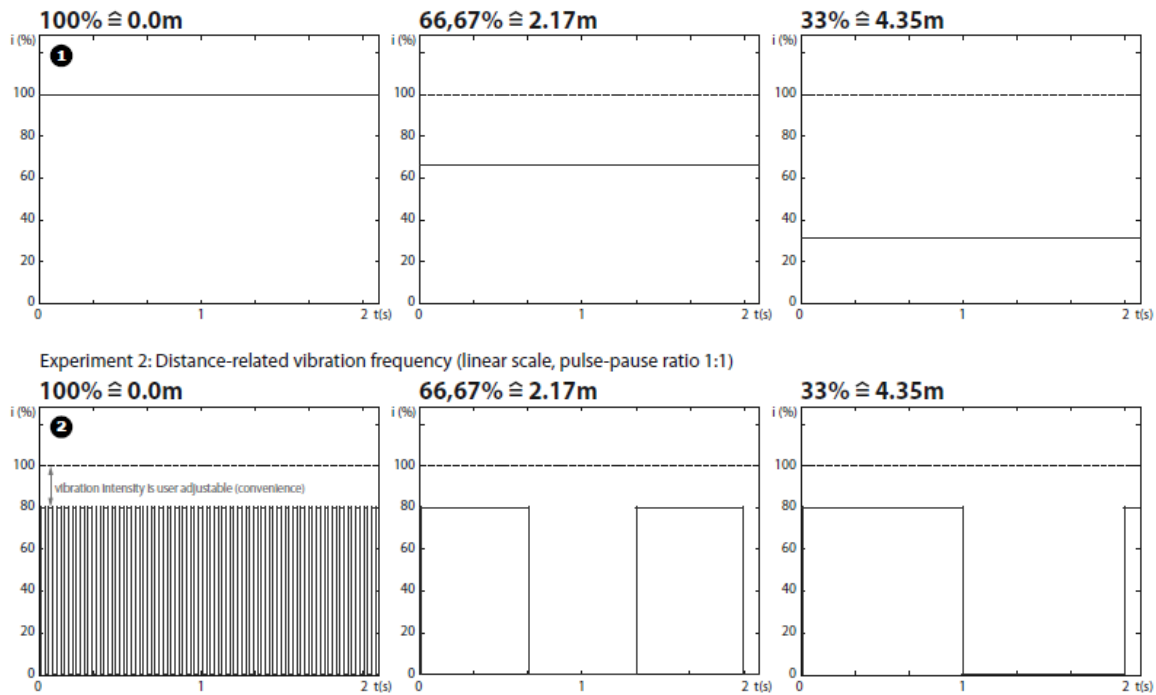


Figure 2.10 – Patrons variant en intensité (haut) et en rythme (bas) utilisés par Riemer et Ferscha (2008). Les six graphiques représentent, pour trois distances (4.35, 2.17, 0 mètres), le niveau d'activation (en 100% de l'intensité maximale) en fonction du temps.

Dans une étude de Lawson et al. (2015), les sujets étaient invités à déterminer parmi des patrons de stimulation variant en rythme ou en intensité, celui spécifiant le mieux un mouvement d'approche. Quel que soit le paramètre, le patron consistait en l'activation successive d'un seul vibreur (20 vibrations au total). Six types de patrons ont fait l'objet d'une tâche de jugement par comparaison, des patrons de contrôle avec une intensité constante (1A) ou aléatoire (1B), d'autres ayant une intensité croissante (2B) ou décroissante (2A), et deux derniers avec un rythme de vibration croissant (3A) ou décroissant (3B). Ces différents stimuli étaient présentés par paires (1A-1B, 2A-2B et 3A-3B) et les participants devaient alors indiquer celui qui, selon eux, spécifiait le mieux un mouvement d'approche ou d'éloignement. Les patrons augmentant en intensité (2B) étaient alors significativement plus associés à un mouvement d'approche que les autres patrons et les stimulations dont l'intensité était décroissante (2A) semblaient rendre compte d'un mouvement d'éloignement. Les autres patrons étaient jugés indifféremment les uns des autres et plutôt comme étant neutres, c'est-à-dire ne renvoyant pas spécifiquement à un mouvement d'approche ou de

recul. Cette étude confirme donc la possibilité de donner une impression d'approche à l'aide d'un seul vibreur, et ce en variant l'intensité de la stimulation. Elle montre cependant, que contrairement à l'intensité, le rythme n'est pas spontanément associé à ce type de mouvement.

Tableau 2.2 – Caractéristiques des stimulations utilisées par Lawson et al. (2015) dans les six conditions expérimentales. Chaque patron de stimulation consistait en 20 vibrations successives. Le tableau renseigne la fréquence de vibration et les caractéristiques temporelles de la première (1) et de la dernière (20) vibration, selon le type de codage.

| Condition | Fréquence de vibration (Hz) | | Durée (de) et délai entre chaque vibration (ms) | |
|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|---|----------|
| | Début (1) | Fin (20) | Début (1) | Fin (20) |
| Intensité constante (1A) | 250 | 250 | 30 | 30 |
| Intensité aléatoire (1B) | 30-250 (aléatoire) | 30-250 (aléatoire) | 30 | 30 |
| Intensité décroissante (2A) | 250 | 30 | 30 | 30 |
| Intensité croissante (2B) | 30 | 250 | 30 | 30 |
| Rythme croissant (3A) | 250 | 250 | 300 | 30 |
| Rythme décroissant (3B) | 250 | 250 | 30 | 300 |

Il semblerait donc que l'intensité soit à privilégier lorsque le dispositif ne peut mobiliser qu'un seul vibreur. Cela vient renforcer cette relation intuitive, entre l'intensité de vibration et la proximité d'un obstacle, proposée par plusieurs auteurs (Carton & Dunne, 2013; Gray et al., 2014; Ho et al., 2013) mais jusqu'alors non éprouvée expérimentalement. Les caractéristiques temporelles des stimulations, en particulier le rythme, bien qu'elles soient très bien discriminées par la peau, semblent peu appropriées pour transmettre des informations d'approche, notamment la distance. Si l'intensité semble offrir de meilleures perspectives, c'est sans doute que le nombre de niveaux discriminables est plus important que pour le rythme (Gill, 2003) et que les variations continues d'intensité facilitent l'accès à la relation entre information et stimulation. On peut

également s'interroger sur un possible lien naturel entre l'intensité et la distance au niveau vibrotactile, comme c'est le cas pour la modalité auditive (Shaw et al., 1991). Même si cela n'a pas été démontré empiriquement, cela expliquerait que l'on associe spontanément une stimulation augmentant en intensité à un mouvement d'approche – et inversement (Lawson et al., 2015). Cependant, il est important de noter que les études présentant des résultats favorables à l'utilisation de l'intensité s'appuient sur des tâches de jugement (Lawson et al., 2015; Riener & Ferscha, 2008). De ce fait, si les stimulations d'intensité croissante sont naturellement plus associées à un mouvement d'approche, ce résultat reste à être confirmé dans des tâches impliquant la régulation d'une approche.

3.2 Codage de l'information à l'aide de plusieurs vibrateurs : les patrons spatiotemporels

Considérant les limites liées à l'utilisation du rythme ou de l'intensité, plusieurs études récentes utilisent des principes de codage mobilisant plusieurs vibrateurs et exploitant des formes spatiotemporelles dont les variations renseignent sur la relation d'approche entre l'individu et les éléments de son environnement. Après des résultats décevants dans l'utilisation de l'intensité pour transmettre des informations d'approche (i.e. pas de différence entre différents codages variant en intensité), Ho, Spence, & Gray, (2013) ont notamment fait l'hypothèse que l'ajout d'une dimension spatiale à un patron de stimulation améliorerait la perception des informations d'approche (Gray et al., 2014; Ho, Gray, & Spence, 2014; Meng, Ho, Gray, & Spence, 2015).

Par définition, les patrons spatiotemporels offrent la possibilité d'exploiter deux dimensions pour coder l'information. Contrairement au rythme ou l'intensité, il ne s'agit pas simplement de faire varier le paramètre selon un continuum. La relation entre la variable informationnelle et les caractéristiques de la stimulation est, dans ce cas, plus complexe.

3.2.1 Une définition arbitraire du patron de stimulation

Les patrons spatiotemporels ont, entre autres, été utilisés dans le domaine du pilotage pour transmettre des informations relatives à l'altitude ou la vitesse d'approche. Van Erp et al. (2003) ont d'ailleurs utilisé ce type de patrons spécifiquement lors de vol en hélicoptère. Une version simple du dispositif permettait de transmettre des informations visant à corriger l'altitude du pilote. Plus précisément, deux vibrateurs au niveau de l'épaule et du poignet s'activaient pour indiquer la direction dans laquelle le mouvement devait être corrigé (vers le haut ou le bas). Une version complexe du dispositif permettait de fournir (en plus des informations relatives à l'altitude) des informations concernant la vitesse d'approche du pilote par rapport au sol. Cinq lignes de douze vibrateurs placées au niveau de l'abdomen étaient activées séquentiellement dans la direction du mouvement du sujet (vers le haut ou vers le bas). Dans chacun des dispositifs, le délai inter-stimulus et la durée des vibrations étaient liés aux caractéristiques cinématiques du mouvement (**Tableau 2.3**). Pour la version simple, le rythme et la durée des vibrations augmentaient à mesure que l'écart avec l'altitude souhaitée diminuait. Dans la version complexe du dispositif, la durée de vibration de chaque ligne et le délai entre chaque série de 5 vibrations augmentaient lorsque la vitesse diminuait. Les résultats ont montré en premier lieu qu'une tâche consistant à maintenir son altitude est significativement mieux réussie à l'aide du dispositif. En revanche, aucune différence significative n'a été observée entre les deux versions du dispositif (i.e. simple et complexe). Ce dernier résultat pourrait laisser penser que les informations sur le mouvement vertical du pilote par rapport au sol ne sont pas pertinentes dans ce type de tâche. Une telle conclusion est toutefois peu envisageable dans la mesure où les deux informations n'ont pas été comparées de manière isolée (le dispositif complexe intégrant les deux informations). L'explication la plus probable semble liée au codage (peut-être trop complexe) ou à une limite du système sensoriel et/ou cognitif rendant impossible le traitement simultané de ces deux informations.

Tableau 2.3 – Détails des paramètres temporels utilisés dans l'étude de van Erp et al. (2003) pour indiquer (a) l'amplitude de l'écart avec l'altitude idéale et (b) la vitesse verticale du pilote.

| (a) | Amplitude (m) | Durée de vibration (ms) | Durée inter-stimulus (ms) |
|-----|---------------|-------------------------|---------------------------|
| | <1 | - | - |
| | 1-3 | 100 | 200 |
| | >3 | 50 | 100 |

| (b) | Vitesse (m/s) | Durée de vibration (ms) | Durée inter-stimulus (ms) | Délai entre les signaux (ms) |
|-----|---------------|-------------------------|---------------------------|------------------------------|
| | <0.1 | - | - | - |
| | 0.1-1 | 5*100 | 0 | 200 |
| | >1 | 5*50 | 0 | 100 |

Un codage de l'information tel que celui utilisé par van Erp et al. (2003) permet de corriger l'altitude en indiquant au pilote quel mouvement de correction adopter (augmenter ou réduire l'altitude) sans fournir d'informations quantitatives sur l'altitude à laquelle il se situe. C'est dans cette optique que Jansen, Wennemers, Vos, & Groen (2008) ont mis en place un dispositif permettant à des pilotes d'hélicoptère de recevoir en continu des informations concernant leur altitude à travers une ligne de vibreurs placée verticalement au niveau du dos. Quelle que soit l'altitude, le tacteur le plus bas vibrait par pulsation de 200 ms et symbolisait le niveau du sol. En fonction de l'altitude du sujet, les tacteurs situés au-dessus vibraient en antiphase avec ce tacteur de référence ; le tacteur le plus haut vibrant pour une altitude de 42 mètres. Ces informations sur l'altitude, transmises en continu lors d'un atterrissage, permettaient de réduire significativement la durée de la manœuvre et le nombre d'oscillations latérales lorsque la vision était dégradée (de manière artificielle à l'aide de lunettes à filtres réduisant la luminosité).

Si l'utilisation des variations spatiotemporelles de la stimulation semble être un moyen efficace de transmettre des informations d'approche, il est intéressant de pouvoir préciser comment les caractéristiques de ce type stimulation influencent la perception de l'information. Une telle démarche fut entreprise dans une série d'études mettant en jeu des tâches de simulation de conduite et dans

lesquelles les sujets devaient freiner le plus rapidement possible lorsqu'un véhicule les précédant ralentissait brusquement (Gray et al., 2014; Meng, Gray, Ho, Ahtamad, & Spence, 2015; Meng, Ho, et al., 2015). Une stimulation vibrotactile consistant en l'activation successive de trois vibrateurs les informait de la collision imminente (**Figure 2.11**). Ces études ont montré que ces stimulations étaient plus efficaces pour réduire le temps réaction du freinage que de simples signaux d'alerte localisés (Ho et al., 2014), mettant ainsi en évidence les bénéfices liés à l'ajout d'une dimension spatiale aux stimulations tactiles.

De plus, ces études se sont intéressées aux caractéristiques de la stimulation qui pourraient être déterminantes pour de rendre compte d'une approche. Dans l'étude de Gray et al. (2014), les stimulations pouvaient être dépendantes ou non de la vitesse d'approche (VA) et décrire un mouvement vers le haut ou vers le bas (**Figure 2.11**, à gauche). Lorsque les stimulations étaient indépendantes de la VA, les trois vibrateurs s'activaient successivement pendant 215 ms, sans délai inter-stimulus. Les stimuli dépendants de la VA avaient une durée de vibration de 150 ms et un délai inter-stimulus variant entre 50 et 150 ms (en étant d'autant plus court que la vitesse d'approche au moment du départ de la stimulation est grande). Les résultats montrent que lier la stimulation à la vitesse d'approche n'améliore le BRT que lorsqu'on utilise un patron dont le mouvement va vers le sujet. Ces résultats apportent de précieuses informations concernant les paramètres d'une stimulation permettant de rendre compte d'une approche. Les aspects à la fois spatiaux et temporels de la stimulation semblent être déterminants. En effet, les stimulations dynamiques (i.e. fournies par l'activation successive de plusieurs vibrateurs) apparaissent plus efficaces pour rendre compte d'une approche lorsqu'elles décrivent un mouvement vers le torse. Cependant, cela semble être le cas uniquement lorsque l'ISI est lié à la vitesse d'approche. L'importance des facteurs spatiaux a été confirmée par une étude plus récente de Meng, Ho, Gray, & Spence (2014) montrant qu'une stimulation consistant en l'activation successive de deux vibrateurs (**Figure 2.11**, à droite) réduit significativement le BRT, uniquement lorsque la stimulation se déplace vers le torse.

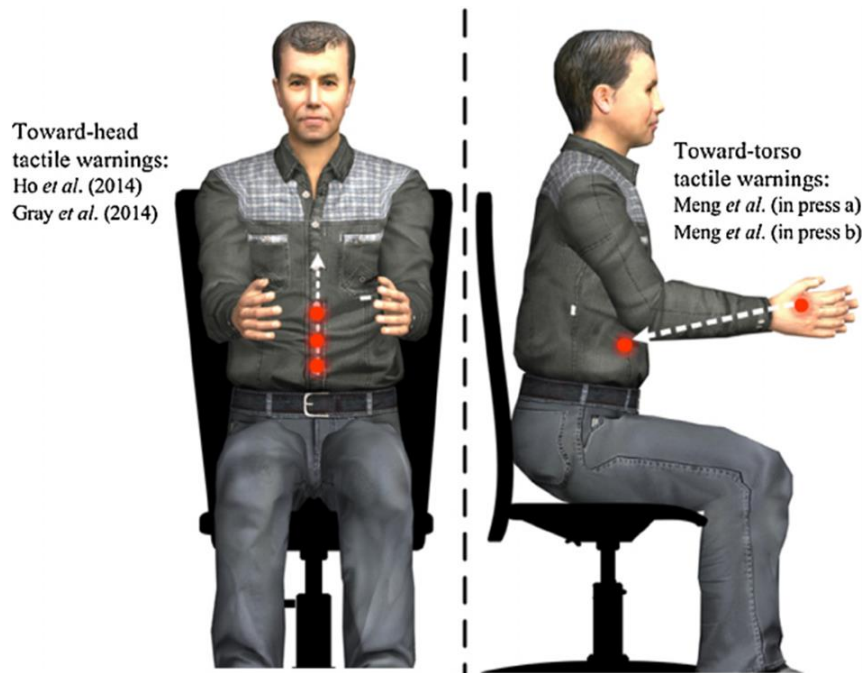


Figure 2.11 – Stimulations spatiales utilisées dans différentes études pour fournir des informations d'approche. Deux études ont utilisé trois vibreur avec une activation vers la tête, les deux autres ont utilisé deux vibreurs avec une activation vers le torse (d'après Meng *et al.*, 2015).

3.2.2 L'approche écologique comme support pour la définition des patrons de stimulation

Si de nombreuses études utilisent des principes de codage définis arbitrairement par les expérimentateurs, une seconde démarche consiste à s'appuyer sur les mécanismes naturels de la perception humaine, et notamment sur les processus visuels décrits par l'approche écologique de la perception (Gibson, 1979). Cancar, Diaz, Barrientos, Travieso, & Jacobs (2013) ont élaboré un patron de stimulation reproduisant, au niveau tactile, le patron d'expansion optique perçu au niveau visuel en situation d'approche et donnant accès à la variable tau (Lee, 1976). En activant successivement 4, 16 puis 36 vibrateurs placés de manière excentrique au niveau de l'abdomen, le dispositif stimulait une zone de plus en plus large à mesure que la distance entre le sujet et un obstacle (une balle) se réduisait (**Figure 2.12**). Dans un protocole de jugement d'arrivée (Schiff & Oldak, 1990), des approches de balles étaient simulées et la fin de la stimulation tactile occultée, les sujets devaient alors appuyer sur un bouton au moment où ils estimaient que la stimulation atteindrait sa taille maximale de 36 vibrateurs (correspondant au contact). Si les différences entre les conditions visuelle, tactile et bimodale ne sont pas significatives, les taux de corrélation entre les TTC réels et estimés dans la condition tactile (0,93 ; 0,97 en visuel et bimodal) montrent que les sujets peuvent accéder à des informations concernant le TTC à partir de ce type de stimulation.

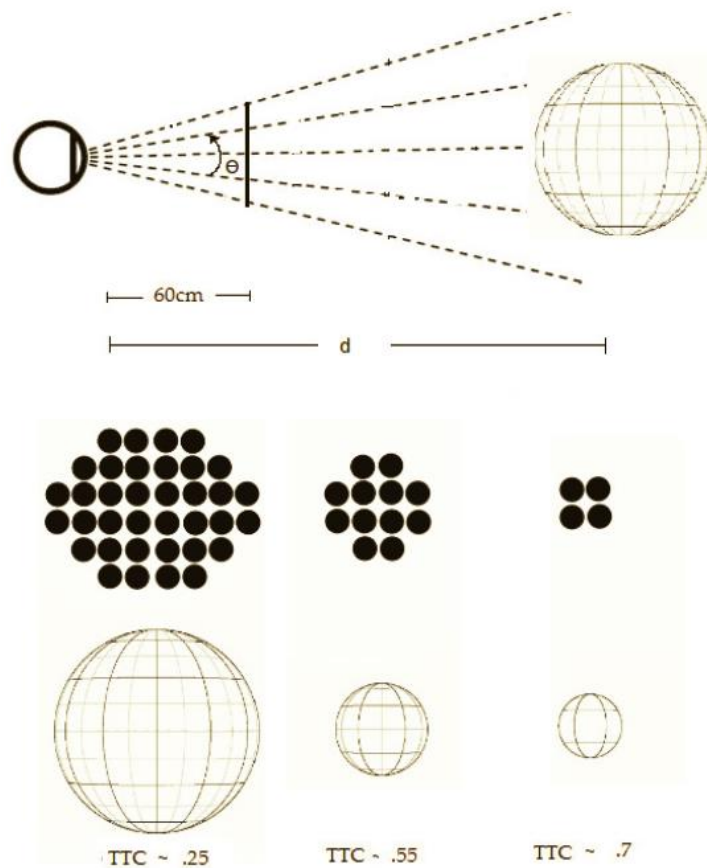


Figure 2.12 – Illustration des stimulations utilisées par Cancar et al. (2013) pour transmettre des informations sur la variable optique tau. La configuration de la stimulation tactile dépend de la taille angulaire de l'objet en approche.

La notion de flux optique est fondamentale au sein de l'approche écologique de la perception. Généré lors d'un déplacement dans l'environnement, il spécifie par sa structure les propriétés du système animal-environnement (Warren, 1988). C'est ainsi qu'a été envisagée la possibilité de transmettre un flux vibrotactile donnant accès à des propriétés de l'environnement comme la hauteur et la distance d'un obstacle (Díaz, Barrientos, Jacobs, & Travieso, 2012). Un dispositif consistant en vingt-quatre vibrateurs disposés verticalement était placé au niveau de l'abdomen, l'intensité de chaque vibrateur augmentait en fonction de la distance du premier obstacle dans une direction donnée (dans le plan sagittal avant, **Figure 2.13**). En l'absence d'obstacle, la différence d'intensité de deux vibrateurs adjacents était faible, voire nulle (A, B et C). Cependant lorsque le sujet rencontrait un obstacle, il percevait une différence d'intensité importante entre deux vibrateurs

adjacents (D). En fonction de son mouvement d'approche et de la modification du flux tactile qui en résultait, le sujet pouvait percevoir la distance d'un obstacle ainsi que sa hauteur approximative. Les auteurs ont repris ici un paramètre très utilisé, l'intensité, en le couplant à la localisation, puisqu'en fonction de sa position sur l'abdomen chaque vibreur renseignait sur la distance d'un obstacle dans une direction et l'ensemble permettait de fournir une information globale sur la structure de l'environnement. Les résultats des différentes études réalisées à l'aide de ce dispositif montrent qu'il peut être utilisé pour franchir des obstacles de différentes tailles (Lobo, Travieso, Barrientos, & Jacobs, 2014) et que les sujets sont capables de juger de la hauteur de l'obstacle (Díaz et al., 2012a). Ces études ont par ailleurs mis en avant un des principes fondamentaux de la suppléance perceptive, la nécessité de l'action. Leurs résultats montrent en effet que l'accès à l'information est conditionné par une perception active, puisque les sujets ne parviennent à réaliser ces différentes tâches que lorsqu'ils peuvent manipuler l'entrée sensorielle à travers leurs mouvements. Lorsqu'ils reçoivent des stimulations donnant accès aux mêmes propriétés, mais que les patrons tactiles proviennent de l'exploration d'autres sujets, il leur est impossible d'exploiter efficacement cette information.

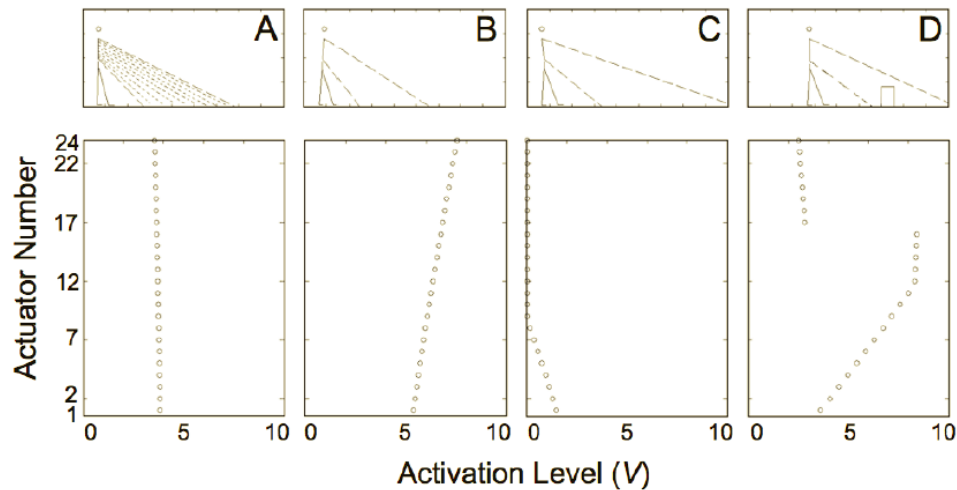


Figure 2.13 – Représentation schématique de la relation entre le niveau d'activation de tacteurs et la position du sujet dans l'environnement. La position A est celle de référence, tous les tacteurs ont le même niveau d'activation. En position B, l'inclinaison vers l'avant du sujet augmente le niveau d'activation, augmentation d'autant plus importante que les tacteurs sont situés vers le haut. La position C illustre le cas, où le sujet est incliné vers l'arrière et où la distance avec l'objet le plus proche (le sol) augmente, au-delà d'une certaine distance, les tacteurs sont à leur niveau d'activation le plus bas. La situation D représente la stimulation perçue lorsqu'un élément est présent au sol (d'après Diaz et al., 2011).

4 Intégration multisensorielle et dispositifs vibrotactiles

L'utilisation des informations vibrotactiles trouve son origine dans les études sur la substitution sensorielle où cette modalité était envisagée en remplacement de la vision. Depuis, cette modalité sensorielle est exploitée dans des situations où les informations visuelles sont trop nombreuses ou dégradées. Il est donc important de considérer la modalité tactile comme étant une composante d'un système perceptif multimodal. Si l'être humain a tendance à intégrer naturellement plusieurs sources d'informations sensorielles, l'utilisation de ces modalités dans les interfaces homme-machine n'est que très récente. Les connaissances sur les mécanismes perceptifs tactiles et auditifs s'enrichissent de plus en plus et l'intérêt de ces deux modalités pour communiquer des informations en complément de la vision est de plus en plus évident. Selon Sarter (2006), l'utilisation de plusieurs entrées sensorielles pour communiquer des informations présente trois avantages majeurs. Tout d'abord, les informations des différentes modalités peuvent présenter chacune un aspect différent d'une situation ou d'un

événement particulier. Par ailleurs, les informations peuvent être présentées de façon redondante entre les différentes modalités et ainsi renforcer une information provenant d'une modalité sensorielle. Enfin, les dispositifs multimodaux permettent d'augmenter le nombre d'informations pouvant être traitées simultanément, en transmettant par une modalité, des informations inaccessibles dans une autre. Les études réalisées en condition multimodale permettent de mieux comprendre comment transmettre des informations vibrotactiles en complément d'une vision normale ou dégradée. Nous présenterons ici de manière générale les processus pouvant intervenir lors de l'utilisation d'interfaces multimodales, tout en exposant les processus impliqués lors de l'utilisation de stimuli vibrotactiles.

4.1 Partage des ressources attentionnelles entre les modalités sensorielles

La majorité des dispositifs multimodaux semblent s'appuyer (implicitement ou explicitement) sur le modèle de Wickens, qui a permis de conceptualiser les mécanismes mis en jeu dans des contextes multitâches et à forte charge attentionnelle. Ces travaux (Wickens, 2002, 2008) ont abouti à un modèle en quatre dimensions dichotomiques (codage, modalité sensorielle, niveau de traitement cognitif et mode de réponse) qui déterminent le niveau d'interférence entre deux tâches simultanées (**Figure 2.14**). Chaque dimension possède deux niveaux et l'interférence entre deux tâches est plus importante si elles sollicitent des niveaux identiques. Dans ce modèle, chaque modalité sensorielle correspond à un niveau distinct. De ce fait, dans une tâche où de multiples informations sont à traiter, le risque d'interférence est plus élevé si la prise d'information met en jeu une seule modalité sensorielle. Wickens (2002) a ainsi montré que le partage des ressources attentionnelles entre différentes entrées sensorielles favoriserait les performances, permettant ainsi d'orienter les choix de conception d'une interface (type de contrôle, modalité(s) sensorielle(s) sollicitée(s), etc.).

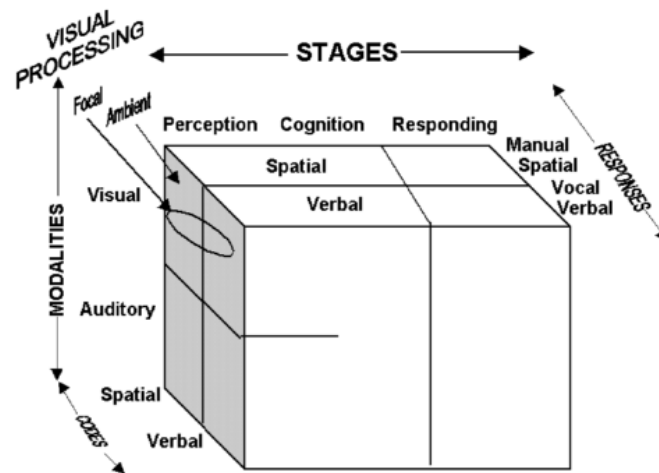


Figure 2.14 – Modèle de Wickens (2002). Le codage, la modalité, le stade et la réponse constituent 4 dimensions possédant chacune 2 niveaux.

Bien qu'elle ne soit pas considérée dans le modèle de Wickens, on peut supposer que la modalité tactile, dans la mesure elle reste relativement peu exploitée, pourrait également participer aux partages des ressources attentionnelles. Certaines études ont d'ailleurs obtenu des résultats permettant d'appuyer l'hypothèse selon laquelle l'utilisation de la modalité tactile permettrait de réduire la charge attentionnelle lorsque la vision est surchargée (van Erp, Veltman, & Oving, 2003; Sarter & Sklar, 1999; van Erp & van Veen, 2004). Dans une étude de van Erp et van Veen (2004), les participants devaient réaliser une tâche de simulation de conduite où les informations de navigation (direction et distance du prochain changement) étaient présentées via un dispositif visuel (affichage numérique sur un écran), tactile (localisation et rythme de vibration) ou bimodal. En parallèle, les participants réalisaient une tâche de détection dans laquelle il fallait répondre le plus rapidement possible dès l'apparition d'une cible. Ils ont ainsi pu montrer que le temps de réaction était plus rapide avec des informations multimodales, uniquement lorsque la charge attentionnelle est élevée.

4.2 Processus intermodaux

Bien que les travaux de Wickens (2002) suggèrent que nos modalités sensorielles fonctionnent de manière indépendante, plusieurs études remettent en cause cette séparation de nos différents sens (Stoffregen & Bardy, 2001). Par ailleurs, une des principales critiques faites au modèle des ressources multiples est de ne pas tenir compte des contraintes liées aux processus intermodaux, notamment au niveau de l'attention spatiale (Spence & Driver, 1997). De nombreux travaux ont ainsi montré comment les différentes modalités sensorielles interagissent lors de la perception d'un évènement, mettant en évidence l'intégration spatiale et temporelle des stimuli provenant de modalités différentes.

Les études spécifiques aux stimulations vibrotactiles ont mis en évidence des processus d'interaction avec la modalité visuelle au niveau de l'attention spatiale. De manière générale, celles-ci ont mis en évidence le fait qu'un stimulus vibrotactile dans une direction particulière attire l'attention visuelle dans cette même direction et réduit le temps de réponse à l'apparition d'un stimulus (Spence, 2002). Tan, Gray, Young, & Irawan (2001) ont utilisé un dispositif de 9 vibrateurs disposés sous forme matricielle dans le dos pour orienter l'attention visuelle vers une zone du champ visuel (**Figure 2.15**). Les participants devaient localiser un changement entre deux scènes visuelles présentées successivement. Juste avant l'affichage de la seconde scène, le dispositif activait un des 9 vibrateurs. Lorsque la localisation du stimulus vibrotactile correspondait à la zone du champ visuel où avait eu lieu le changement, le temps de réaction était significativement réduit. Ainsi, un stimulus vibrotactile permet, par ses caractéristiques spatiales, d'attirer rapidement l'attention visuelle vers un évènement particulier.

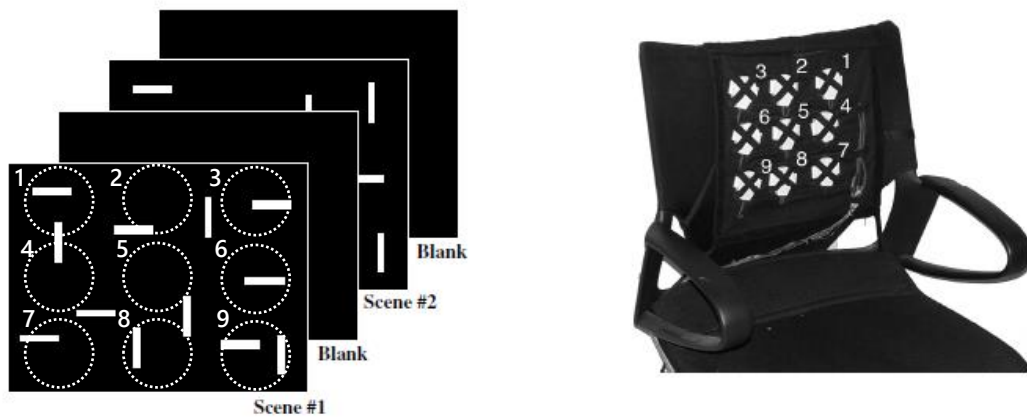


Figure 2.15 – Dispositif expérimental utilisé pour l'étude des processus intermodaux visuotactiles : à droite, le siège comprenant 9 vibreurs, à gauche, les zones de l'écran associé à chaque vibreur. Une première scène apparaît, puis disparaît brièvement. Durant cette interruption, un vibreur s'active pour indiquer la zone de la scène où un changement aura lieu. La scène réapparaît ensuite avec un élément dont l'orientation a changé.

Bien que la majorité des études se soient principalement intéressées aux stimuli «statiques», plusieurs études ont montré que les liens intermodaux entre la vision et le toucher concernaient également les patrons spatiotemporels (Amemiya, Hirota, & Ikei, 2013; Gray & Tan, 2002; Tan, Gray, Young, & Taylor, 2003). L'activation séquentielle de plusieurs vibreurs permet notamment d'attirer l'attention visuelle dans la même direction que le sens de vibration (Rob Gray & Tan, 2002; Tan et al., 2003). Amemiya, Hirota, & Ikei, (2013) se sont intéressés plus particulièrement à la perception de vitesse à partir d'informations visuelles et vibrotactiles. L'information tactile consistait en l'activation successive de quatre lignes de vibreurs intégrés sous le siège d'un simulateur de conduite, avec un délai inter-stimulus variable. Un affichage visuel simulait un flux optique spécifiant un mouvement vers l'avant à travers l'expansion radiale de plusieurs points répartis aléatoirement. Confrontés à différentes combinaisons de vitesses sur plan visuel et tactile², les participants étaient invités à donner une estimation globale de leur vitesse de déplacement. Il apparaît alors que les stimulations

² La vitesse optique était modulée en variant la vitesse angulaire des points aléatoires. Sur le plan tactile, la vitesse était définie par le délai de vibration entre deux lignes successives qui était d'autant plus court que la vitesse était importante.

tactiles modifient la perception globale de la vitesse, celles-ci étant surestimées pour les vitesses tactiles les plus rapides et sous-estimées pour les vitesses les plus faibles. Une étude similaire a par ailleurs permis de préciser que seuls les patrons spatiotemporels influencent la vitesse perçue du déplacement, soulignant ainsi l'importance de la dimension spatiale pour accéder à l'information (Amemiya, Hirota, & Ikei, 2016).

Enfin, il apparaît que l'intégration multisensorielle soit influencée par la compatibilité entre les stimuli des différentes modalités sensorielles. Les premières études dans ce domaine se sont concentrées sur la nature des correspondances entre vision et audition (Martino & Marks, 1999; Melara, 1989) mais des travaux plus récents se sont intéressés aux correspondances entre vision et toucher. Ceux-ci s'intéressent tout particulièrement à la correspondance synesthétique, c'est-à-dire lorsque des caractéristiques de ces deux modalités présentent des attributs communs. Ces attributs peuvent être communs d'un point de vue sémantique, métaphorique ou à travers certaines caractéristiques d'un stimulus pouvant être perçues à travers plusieurs modalités (taille, durée, nombre, etc). Martino & Marks (2000) ont par exemple mis en évidence une correspondance entre l'intensité lumineuse (vision) et la fréquence de vibration (toucher). Dans cette étude, les participants recevaient simultanément un stimulus visuel d'intensité lumineuse faible ou élevée et un stimulus vibrotactile de fréquence faible ou élevée. Ils identifiaient alors plus rapidement l'intensité et la fréquence (faible ou élevée) lorsque les stimuli présentaient des caractéristiques congruentes (i.e. intensité et fréquence faible ; intensité et fréquence élevée). D'autres études ont également montré que l'absence de congruence entre deux modalités sensorielles pouvait conduire à des erreurs de perception et/ou de jugement (Gallace & Spence, 2006; Marks, 1987).

Problématique générale

Depuis les premiers travaux de Geldard (1957, 1960) suggérant l'utilisation de la modalité tactile pour communiquer des informations, les études sur cette modalité sensorielle ont connu un essor considérable. Sur le plan fondamental, de nombreuses études psychophysiques ont permis de mieux comprendre la sensibilité de la peau aux stimuli vibrotactiles. De plus, un ensemble d'études réalisées dans un contexte appliqué ont fait apparaître l'intérêt des dispositifs vibrotactiles en particulier pour l'aide à la navigation. Dans ce domaine, les recherches se sont longtemps focalisées sur deux types d'informations, les signaux d'alerte et les informations directionnelles. L'efficacité de ce type d'information repose sur des principes de codage simples qui s'appuient notamment sur des mécanismes de l'attention spatiale. Un des enjeux majeurs actuels concerne la possibilité d'utiliser les dispositifs vibrotactiles pour communiquer des informations plus complexes. Parmi elles, les informations nécessaires à la régulation d'une approche (distance, vitesse, TTC, etc.) font l'objet de nombreuses recherches. Malgré leur nombre croissant, ces études ne permettent pas de dégager un principe de codage qui fasse consensus. Au regard des différentes études, deux aspects majeurs semblent être déterminants, la variable transmise par le dispositif et les paramètres utilisés pour la coder.

Quelle(s) variable(s) lier à la stimulation tactile ?

Une majorité des dispositifs vibrotactiles utilisés en situation d'approche renvoie des informations relatives à la distance qui sépare l'utilisateur d'un élément de l'environnement. Pourtant, des études récentes montrent qu'il reste important de considérer d'autres variables informationnelles pouvant informer d'une approche dans l'environnement. Dans une des premières études sur la substitution sensorielle, Bach-y-Rita et ses collaborateurs ont constaté qu'en zoomant avec la caméra du TVSS, les sujets adoptaient fréquemment un mouvement d'évitement. Les sujets semblaient ainsi sensibles à ce patron en expansion en l'interprétant comme l'approche d'un objet environnant. Cancar et

al. (2013) ont de leur côté montré qu'une stimulation variant selon la taille angulaire d'un objet permettait d'accéder à des informations sur le TTC à partir de stimulations vibrotactiles. Si les différentes études concernant l'utilisation de τ pour estimer un TTC se sont d'abord focalisées sur la modalité visuelle, certains auteurs ont avancé l'hypothèse selon laquelle cette variable pourrait être utilisée par d'autres modalités sensorielles (Savelsbergh & Chen, 1993; Schiff & Oldak, 1990). Lee, Weel, Hitchcock, Matejowsky, & Pettigrew (1992) ont fait de cette théorie un principe général concernant l'ensemble des modalités sensorielles où le quotient de n'importe quelle variable informationnelle et de sa dérivée temporelle permettrait d'avoir accès à τ . Savelsbergh (1993) a d'ailleurs montré que des informations sur τ pouvaient être extraites via la modalité haptique à partir des variations d'un flux d'air chaud approchant la main d'un sujet. Plusieurs études ont également mis en évidence l'utilisation de cette variable avec la modalité auditive, à partir de l'intensité perçue d'une source sonore en approche (Schiff & Oldak, 1990; Shaw et al., 1991). Les variables informationnelles spécifiant un contact imminent ou un mouvement d'approche sont multiples, mais aucune étude n'a véritablement comparé leur efficacité sur le plan tactile.

Quelles sont les caractéristiques de la stimulation tactile qui influencent la perception de l'information ?

L'état de l'art fait apparaître deux stratégies pour transmettre des informations d'approche. Une première, consistant à utiliser les paramètres d'un seul vibreur (paramètres temporels ou intensité) et une seconde qui utilise les caractéristiques spatiotemporelles de la stimulation en mobilisant plusieurs vibreurs. Malgré l'absence d'étude comparant ces deux approches, ce travail de recherche s'intéressera principalement à l'utilisation des patrons spatiotemporels pour réguler une approche. On observe globalement des résultats plus encourageants lors de l'utilisation de patrons spatiotemporels, bien que cette divergence puisse être imputée à la diversité des contextes dans lesquels ces informations ont été utilisées (navigation pédestre, conduite automobile, pilotage, etc). Certaines études ont montré que, par rapport à des

stimuli statiques (i.e. utilisant une seule dimension – spatiale ou temporelle), l'utilisation des caractéristiques spatiotemporelles de la stimulation offrait de meilleures perspectives pour transmettre des informations d'approche (Amemiya et al., 2013; Ho et al., 2014). Par ailleurs, l'ajout d'une dimension spatiale aux patrons vibrotactiles offre la possibilité d'exploiter certaines caractéristiques de la stimulation, telles que le sens de vibration, la vitesse de déplacement etc. En particulier, l'étude d'Amemiya et al. (2013) montre que l'estimation de la vitesse de son propre déplacement est influencée par la vitesse d'un flux vibrotactile se déplaçant à la surface de la peau.

S'il semble présenter plusieurs avantages, le recours aux patrons spatiotemporels nécessite de tenir compte de certaines contraintes de la modalité tactile. Il a notamment été souligné l'importance de tenir compte des aspects perceptifs (i.e. discrimination spatiale, phénomènes spatiaux temporels) avant d'exploiter un dispositif afin de s'assurer que les patrons conçus sont bien ceux perçus par les sujets (Self et al., 2008; Van Erp, 2005). Si de nombreux travaux évaluent les capacités de discrimination, la plupart concernent des stimuli de pression (Weber, 1834; Weinstein, 1968). Les études portant sur les capacités de discrimination de stimuli vibrotactiles sont plus rares et ont été réalisées avec des stimuli statiques et à partir de tâches de discrimination. Ainsi, les rares études qui ont mesuré le seuil de discrimination avec des stimuli vibrotactiles n'indiquent toutefois pas si les caractéristiques spatiales influencent l'accès à l'information.

En définitive, on dénombre aujourd'hui relativement peu d'études permettant d'expliquer comment ces différents aspects de la stimulation sont perçus et influencent la régulation du mouvement.

Problématique et hypothèses

La problématique générale de ce travail de recherche est de comprendre comment utiliser des informations vibrotactiles pour compléter et/ou suppléer la vision en situation d'approche. Celle-ci s'articulera autour des deux questions

principales qui viennent d'être présentées en les formalisant de manière plus précise dans le cadre de ce travail :

- **Quelle(s) variable(s) informationnelle(s), codée(s) sous forme tactile, permet(tent) de spécifier un mouvement d'approche ?**
- **Quelles sont les caractéristiques de la stimulation tactile qui permettent d'optimiser la perception des informations d'approche ?**

Pour répondre à cette problématique, nous adopterons une démarche dans laquelle la perception des informations d'approche sera d'abord étudiée dans un contexte fondamental, pour ensuite mettre en évidence l'intérêt de ces informations dans un contexte plus appliqué.

Dans un premier temps, nos études s'appuieront sur des tâches de jugement d'arrivée (Schiff & Oldak, 1990) que l'on retrouve de manière abondante dans les études sur la perception visuelle. Plusieurs études laissent à penser que l'estimation du TTC mobilise des mécanismes amodaux (Gibson, 1966; Stoffregen & Bardy, 2001), rendant cette variable accessible à travers différentes modalités sensorielles, mais ce paradigme reste très peu utilisé avec la modalité tactile (ou en condition bimodale). Nous faisons l'hypothèse qu'il est possible d'accéder à des informations sur le TTC à partir d'une stimulation tactile, en particulier lorsque celle-ci renvoie à des informations concernant la distance. Par ailleurs, nous estimons que la précision du jugement de TTC peut être améliorée en transmettant les informations de façon bimodale. De plus, en s'appuyant sur les études psychophysiques (Helson & King, 1931; Suto, 1952), nous attendons une estimation du TTC plus précise avec vibrations discontinues.

Dans un second temps, en s'appuyant sur les résultats de cette première phase expérimentale, nous étudierons dans quelle mesure les stimulations vibrotactiles peuvent compléter et/ou suppléer la vision, lorsque celle-ci est dégradée, lors d'une approche au sol. Plusieurs études ont montré que des informations sur l'altitude permettraient d'améliorer la régulation de la phase d'atterrissage dans des tâches de pilotage (Jansen et al., 2008; van Erp et al.,

2003). Notre hypothèse principale est que l'utilisation d'informations tactiles permettra d'améliorer la régulation de l'approche au sol lorsque la vision est dégradée. L'objectif de cette seconde phase expérimentale sera également de préciser comment différentes variables informationnelles influencent la régulation de l'approche. Des informations sur la vitesse, peu étudiées dans ce contexte, pourraient être particulièrement efficaces dans ce type de tâche, notamment lorsqu'elles sont transmises à partir d'un flux vibrotactile. Nous nous sommes intéressés également aux paramètres dynamiques de la stimulation en étudiant l'influence du sens de vibration. Cette caractéristique des patrons spatiotemporels est particulièrement bien perçue et semble transmettre efficacement les informations d'approche (Gray et al., 2014; Meng, Gray, et al., 2015). Nous faisons donc l'hypothèse que les participants seront plus performants lorsque le sens de la stimulation vibrotactile est congruent avec la direction et le sens du flux visuel.

DEUXIEME PARTIE

ETUDES EXPERIMENTALES

Chapitre 3

Principes généraux des dispositifs expérimentaux
utilisés

Pour répondre aux différentes questions posées dans la problématique, un dispositif expérimental, couplant un dispositif vibrotactile à un environnement virtuel simulant des situations d'approche entre un mobile et une cible (ou le sol), a été développé. Ce dispositif a été réalisé dans le cadre d'une collaboration avec le Centre Interdisciplinaire de Réalité Virtuelle (CIREVE), plateau technique de l'Université de Caen Normandie dédié à l'utilisation de la réalité virtuelle pour la recherche scientifique. Alexandre François et Nicolas Lefevre, deux ingénieurs du CIREVE spécialistes du développement d'environnements virtuels ont contribué à la réalisation de ce projet.

Le dispositif était composé d'un environnement virtuel, de différents moyens d'interaction (souris ou joystick) contrôlés par les participants et d'une matrice tactile, l'ensemble étant piloté par un PC (**Figure 3.1**). L'environnement virtuel était généré par le logiciel libre Unity (version 4.3.1), et affiché à l'aide d'un écran LCD de 23 pouces (fréquence d'affichage de 60 Hz). Les images de l'environnement virtuel étaient captées du point de vue d'une caméra virtuelle placée dans l'environnement. Celle-ci pouvait être placée en face de la scène ou à l'emplacement du mobile. Les données concernant la position du mobile (sur les 3 axes) étaient enregistrées tout au long de l'essai avec une fréquence de 1000 Hz.

Les différentes approches pouvaient être présentées via la modalité tactile à l'aide d'un dispositif spécifique. Les données concernant le mouvement du mobile (distance, vitesse, etc.) étaient transmises en continu au dispositif tactile qui les convertissait en stimuli vibratoires – selon le principe de codage défini par l'expérimentateur. Lorsque les tâches étaient réalisées sur la base d'informations tactiles seules, l'écran n'affichait aucune information, seuls les feedbacks étaient présentés visuellement en fin d'essai.

Deux applications, permettant de réaliser deux types de tâches expérimentales différentes, ont été développées à partir du logiciel libre Unity. En fonction de l'application utilisée, deux moyens d'interaction avec l'environnement étaient possibles. Dans la première application, les caractéristiques cinématiques

des approches (distance, vitesse, accélération, etc.) étaient programmées par l'expérimentateur et la tâche nécessitait une réponse discrète de la part du participant (fournit par l'appui sur un bouton de souris). Dans la seconde application, les approches étaient régulées par le participant à l'aide d'un joystick Saitek Pro Flight X52.

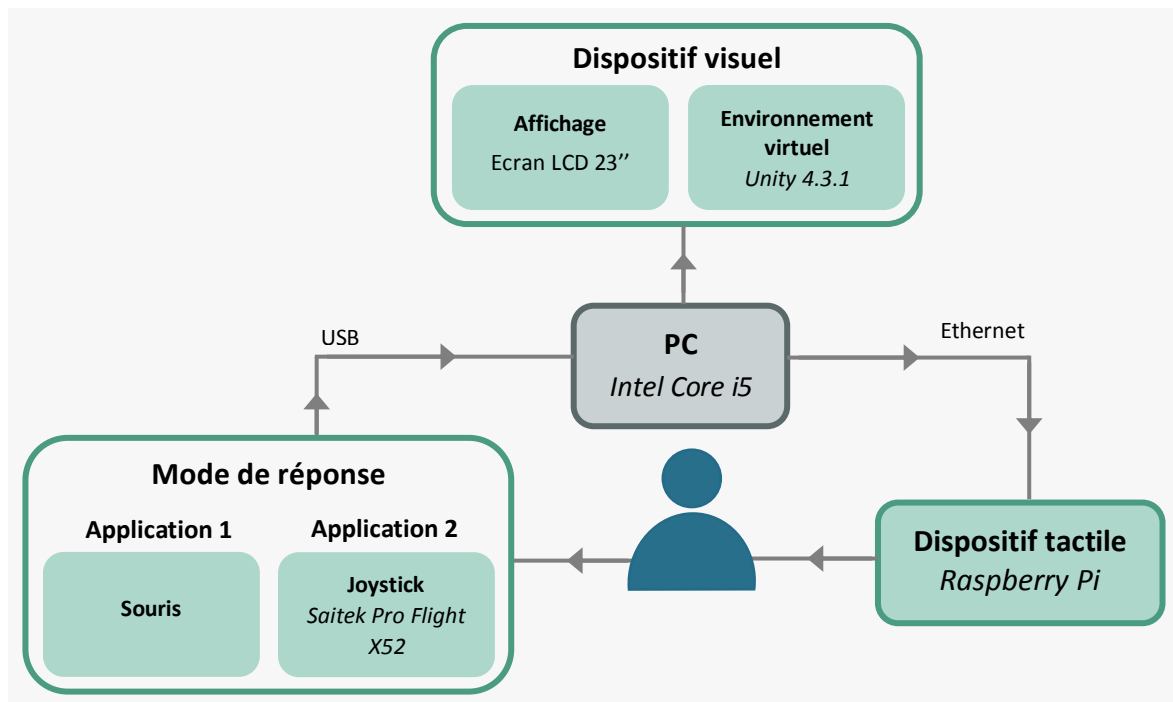


Figure 3.1 – Schéma du dispositif expérimental utilisé dans les différentes études expérimentales. En fonction des études, les dispositifs visuels et tactiles sont utilisés séparément ou simultanément.

1 Application n°1 : estimation du temps de pré-contact

Cette première application permettait de simuler des approches entre un mobile et une cible dans des tâches correspondant au paradigme de jugement d'arrivée (Schiff et Oldak, 1991). Il était possible de spécifier les conditions initiales de l'approche telles que la distance entre le mobile et la cible, les caractéristiques cinématiques du mobile (vitesse, accélération) et le point de vue de la caméra virtuelle (sur le mobile ou perpendiculairement à sa trajectoire).

En condition visuelle, le mobile était représenté par une sphère et la cible par un anneau. En condition tactile, le dispositif transmettait une stimulation informant sur une variable spécifiant le mouvement d'approche (TTC, distance, taille angulaire ou vitesse d'approche). En condition bimodale, les informations provenant des deux dispositifs (visuel et tactile) étaient transmises simultanément.

2 Application n°2 : régulation d'approche au sol

Cette seconde application permettait de simuler un environnement dans lequel les participants contrôlaient un engin ayant des propriétés similaires à un hélicoptère³. L'objectif de la tâche était de se poser au sol avec une vitesse verticale réduite afin de minimiser l'intensité du contact au sol. Les participants contrôlaient les mouvements verticaux de l'engin à l'aide d'une manette issue du kit de pilotage Pro Flight X52 de Saitek® (**Figure 3.2**). Celle-ci permettait des mouvements angulaires autour d'un seul axe, du haut vers le bas, sur environ 22,5°. Cette manette fonctionnait sur le même principe que le collectif d'un hélicoptère, c'est-à-dire que le joystick ne pouvait agir que sur les déplacements verticaux de l'appareil. Plus précisément, le joystick réduisait ou augmentait la puissance des « gaz » (qui opposent une force inverse à la gravité), produisant ainsi une accélération verticale orientée vers le haut ou le bas, selon la position du joystick. Lorsque celui-ci était dans sa position intermédiaire, l'appareil fournissait suffisamment de puissance pour maintenir son altitude. S'il était déplacé vers le bas, l'appareil subissait une chute (mouvement accéléré) d'autant plus rapide que l'amplitude du mouvement était importante. Inversement, si le joystick était placé entre sa position intermédiaire et sa position la plus haute, il permettait à l'appareil d'augmenter son altitude. La vitesse horizontale de l'engin était

³ Préalablement à la conception du dispositif, un travail de documentation a été réalisé afin de comprendre le fonctionnement mécanique d'un hélicoptère (Manuel de pilotage des hélicoptères du Ministère des Transports Canadiens, 2006). Un entretien a également été réalisé avec un pilote d'hélicoptère du CHR d'Alençon afin de mieux comprendre la tâche de pilotage et d'atterrissage (retranscription en Annexe n°1).

contrôlée par l'application, en fonction des paramètres définis par l'expérimentateur. De la même façon que la première application, celle-ci permettait de définir plusieurs conditions initiales de la tâche (altitude, texture du sol, luminosité, etc.).



Figure 3.2 – Joystick Pro Flight X52 de Saitek® utilisé dans les tâches de régulation d'approche au sol.

3 Dispositif vibrotactile

3.1 Matériel

Deux dispositifs tactiles différents ont été utilisés dans ce travail doctoral (**Figure 3.3**). Le premier dispositif, utilisé pour les expériences des Chapitres 4 et 5, fut développé par la société CAYLAR (Villebon-sur-Yvette, France). Un dispositif développé par Guillaume Hector au sein du laboratoire CesamS fut utilisé pour les expérimentations du Chapitre 6. Les deux dispositifs fonctionnaient selon le même principe et les vibrateurs possédaient des caractéristiques similaires. De type inertiel et de forme cylindrique, les vibrateurs mesuraient 20 mm de longueur pour 4 mm de diamètre, avec une forme d'activation de type sinusoïdale (cf. p.34). Leur fréquence de vibration était de $157,8 \pm 3,5$ Hz, cette moyenne pouvant légèrement

varier en fonction des vibreurs sélectionnés pour les différentes études, et sera précisée pour chacune des études expérimentales. Chaque vibreur était maintenu à sa base à l'aide d'un élastique fin cousu sur une bande de tissu, à une distance de 1 à 3 cm en fonction des études. L'ensemble était ensuite attaché à une ceinture en tissu élastique à l'aide d'un scratch.



Figure 3.3 – Dispositifs tactiles utilisés lors des différentes études (a. version de CAYLAR, b. version du CesamS).

3.2 Précision temporelle des stimulations

Des tests, réalisés à l'aide d'un oscilloscope, ont permis de s'assurer de la précision des informations tactiles transmises par le dispositif. Nous avons tout particulièrement vérifié la précision temporelle du dispositif, à savoir les durées de vibration et les délais entre les différentes stimulations (*stimulus onset asynchrony*, SOA). Concernant la durée de vibration, nous avons mesuré l'écart entre la durée spécifiée par l'expérimentateur et celle enregistrée par l'oscilloscope au cours d'un essai. Pour des durées de vibration de 150 ms (durée moyenne utilisée dans les différentes études expérimentales), les résultats ont montré une durée de vibration moyenne de 167.1 ± 10.7 ms (**Figure 3.4**). Nous avons procédé de même pour le SOA, en mesurant à l'aide de l'oscilloscope le délai entre deux vibrations successives, pour ensuite la comparer aux valeurs théoriques. Nous avons ainsi mesuré un délai moyen de 16.6 ± 9.9 ms (**Figure 3.5**). Ces écarts

minimes, inférieurs à 20 ms, ont permis d'avoir un dispositif avec une précision temporelle suffisante pour permettre une bonne discrimination des stimuli.

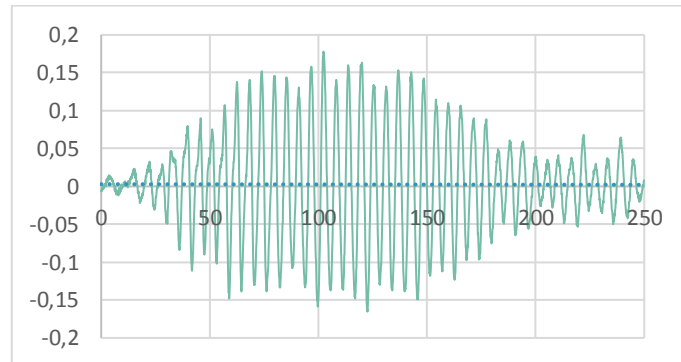


Figure 3.4 – Signal moyen obtenu pour des vibrations de 150 ms. Le début de la stimulation démarre au moment où le signal dépasse 50% de son amplitude maximale et se termine lorsqu'il franchit à nouveau ce seuil.

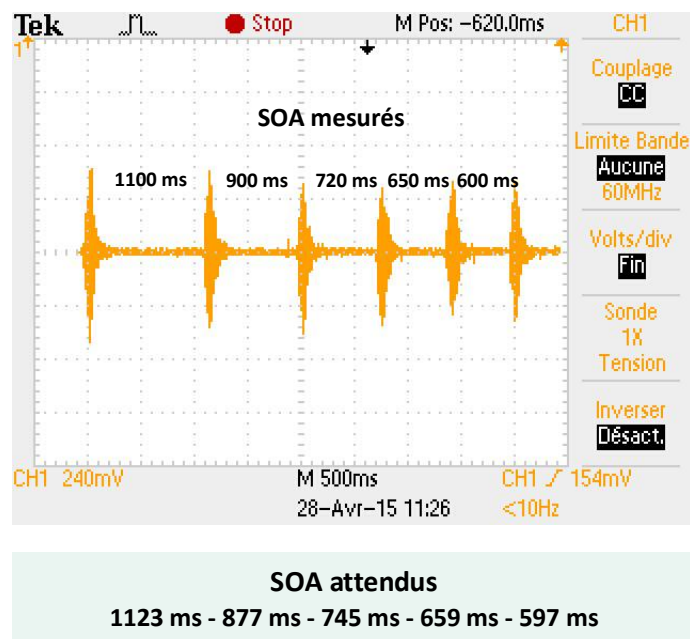


Figure 3.5 – Exemple de données recueillies par l'oscilloscope dans une tâche de jugement de TTC visuotactile. Chaque impulsion correspond à l'activation d'un vibreur en fonction de la distance entre le mobile et la cible. Le SOA (*stimulus onset asynchrony*) correspond au délai temporel entre le début de deux stimulations successives.

3.3 Codage de l'information tactile

Pour transmettre des informations d'approche, nous avons utilisé des patrons spatiotemporels dans lesquels différents vibrateurs étaient activés successivement en fonction d'une variable de l'environnement (distance/altitude, taille angulaire, TTC ou vitesse d'approche). Chaque vibrateur était associé à une valeur de cette variable et s'activait lorsque cette valeur était atteinte. Afin de faciliter la lecture par la suite, nous appellerons niveau d'information l'ordre dans lequel vibraient les différents vibrateurs d'un même patron. Ainsi, si plusieurs vibrateurs étaient associés à la même valeur et s'activaient donc au même moment, ils renvoyaient alors au même niveau d'information. Toujours par soucis de clarté, nous appellerons stimulation (ou vibration) l'activation d'un vibrateur à instant donné durant l'essai. Le patron (ou patron de stimulation), définit quant à lui, l'ensemble des stimulations et la dynamique globale qui les caractérise.

Quels que soient les patrons utilisés au cours des différentes expérimentations, nous avons opté pour un codage relatif, c'est-à-dire un codage où chaque niveau d'information correspondait à un pourcentage de la valeur maximale de la variable. Ce mode de codage permettait d'exploiter tous les niveaux d'information, c'est-à-dire de mobiliser tous les vibrateurs disponibles, quelle que soit la valeur maximale de la variable. Le **Tableau 3.1** montre l'altitude à la quelle vibrent les différents vibrateurs pour un codage basé sur 8 niveaux d'information.

Tableau 3.1 – Exemple de séquence d’activation des vibrateurs selon un codage relatif. Le pourcentage de la valeur maximale (colonne 2) associé à chaque vibrateur (colonne 1) dépend du nombre total de vibrateurs mobilisés. En fonction de la valeur maximale de la variable (altitude), chaque vibrateur s’active à une altitude donnée (colonnes 3 à 5).

| Niveau d’information | Pourcentage | Altitude initiale | | |
|----------------------|-------------|-------------------|-----------|-----------|
| | | 20 mètres | 30 mètres | 40 mètres |
| 1 | 100 | 20 | 30 | 40 |
| 2 | 85.7 | 17.14 | 25.71 | 34.28 |
| 3 | 71.4 | 14.28 | 21.42 | 28.56 |
| 4 | 57.1 | 11.42 | 17.13 | 22.84 |
| 5 | 42.9 | 8.58 | 12.87 | 17.16 |
| 6 | 28.6 | 5.72 | 8.58 | 11.44 |
| 7 | 14.3 | 2.86 | 4.29 | 5.72 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Chapitre 4

Effet des paramètres de la stimulation et du type
d'approche sur le jugement de TTC

1 Introduction

Comme l'a montré David Lee dans ces travaux (e.g. 1976), réguler une approche est une question de temps, celui restant avant qu'il y ait contact entre des éléments en approche (TTC). Sur le plan visuel, ce temps peut être estimé à partir de la variable tau, rendant directement compte du TTC, et qui entre en jeu dans de nombreuses actions motrices impliquant la régulation d'une approche (interception d'objet, régulation de la locomotion avant un obstacle, freinage, etc.). Pour étudier les facteurs qui influencent l'accès aux informations de temps de pré-contact, un grand nombre d'études a utilisé le paradigme du jugement d'arrivée (Schiff & Oldak, 1990). La tâche consiste à présenter des approches, entre un observateur et un objet ou entre deux objets de l'environnement, et à demander à l'observateur de déterminer le moment du contact entre les deux, en appuyant sur un bouton. L'étude récente de Cancar et al. (2013) est la première, et la seule à ce jour, à démontrer la possibilité d'estimer un TTC à partir d'une stimulation vibrotactile. S'inscrivant dans la continuité de ces travaux, la première étude de ce travail de recherche vise à définir plus précisément les caractéristiques d'une stimulation vibrotactile qui permettent de réaliser un jugement de TTC.

L'étude de Cancar et al. (2013) s'est appuyée sur un principe de codage de l'information inspiré des processus mis en jeu sur le plan visuel, en utilisant un patron spatiotemporel produisant une forme en expansion à la surface de la peau. Ainsi, la variable faisant varier la stimulation était la taille angulaire de l'objet en approche (captée à l'aide d'une caméra) – les auteurs supposant que le participant pourrait, comme c'est le cas pour la modalité visuelle, accéder à des informations sur tau. Ce type d'approche (lorsque l'objet se déplace vers l'observateur) correspond, dans la littérature sur la perception visuelle, à une trajectoire radiale. Les tâches d'estimation de TTC sont également étudiées à partir de trajectoires tangentielles, c'est-à-dire avec un objet se déplaçant vers un autre élément de l'environnement, avec un déplacement perpendiculaire à la direction du regard. Dans leur expérience sur le jugement d'arrivée visuel, Schiff & Oldak (1991)

avaient obtenu un pourcentage de précision significativement plus élevé avec des trajectoires tangentielles (90%) qu'avec des trajectoire radiales (66%), des résultats confirmés par la suite dans différentes études (Kaiser & Mowafy, 1993; Yakimoff, Mateeff, Ehrenstein, & Hohnsbein, 1993). L'étude préliminaire qui suit visait notamment à préciser si, au niveau tactile, l'estimation du TTC est possible lorsque l'approche est présentée selon une trajectoire tangentielle. Cette question semble essentielle, tant sur le plan fondamental, pour comprendre les processus de prise d'information tactile, qu'au niveau appliqué pour définir comment présenter des informations d'approche à l'aide d'un dispositif vibrotactile.

Par ailleurs, concernant les propriétés du patron de stimulation, plusieurs travaux ont montré une forte interrelation entre les facteurs spatiaux et temporels au niveau de la perception tactile (Cholewiak, 1999, 2000 ; Geldard & Sherrick, 1972). Les résultats de ces études laissent penser qu'un jugement temporel basé sur une stimulation tactile pourrait être influencé par la configuration spatiale du dispositif. Plus particulièrement, l'étude de Suto (1952) a mis en évidence l'effet kappa dans lequel la distance inter-stimuli perçue (liée à la distance physique) influence l'estimation de l'intervalle temporel entre deux stimulations. On peut donc supposer que le jugement d'un TTC à partir d'un patron vibrotactile spatiotemporel puisse être influencé par l'intervalle spatial entre les zones stimulées (i.e. distance entre les vibrateurs). D'autre part, Helson & King (1931) ont montré que la distance perçue entre deux stimuli pouvait être influencée par l'intervalle inter-stimuli (*inter-stimulus intervalle*, ISI). La présence d'un délai temporel entre deux vibrations successives (ISI) pourrait donc également influencer un jugement temporel basé sur des stimuli vibrotactiles, dans la mesure où l'ISI influence la distance perçue (et donc possiblement la durée estimée).

Cette étude préliminaire visait à définir, pour des trajectoires tangentielles et radiales, les paramètres de la stimulation tactile qui permettent l'accès au TTC. Etant dans l'impossibilité d'avoir à la fois des durées d'approches et des temps d'occultation identiques (cf. p.124), ces deux types d'approche ont dans un premier temps été étudiés dans deux expérimentations distinctes (avec des TTC identiques). L'expérience 1 mettait en jeu des trajectoires radiales alors que

l'expérience 2 s'appuyait sur des trajectoires tangentielles. Dans ces deux expérimentations, nous avons étudié les paramètres spatiotemporels de la stimulation pouvant influencer la prise d'information (i.e. distance inter-vibrateurs et mode de stimulation, avec ou sans ISI). Premièrement, Helson & King (1931) ayant montré que la perception de l'espace entre deux stimuli successifs était meilleure en présence d'un intervalle temporel entre les stimuli, nous avons émis l'hypothèse que l'estimation du TTC serait meilleure avec des patrons de stimulation discontinus. En second lieu, le jugement de TTC étant possiblement influencé par l'effet kappa (Suto, 1952), nous attendions un effet de la distance inter-vibrateur sur la précision du jugement. A la suite de ces deux expérimentations, nous avons comparé la précision du jugement de TTC basé sur les deux types d'approche (tangentielle et radiale), avec des temps d'occultation identiques. Compte tenu de ce qui a été observé dans la modalité visuelle (Schiff & Oldak, 1991 ; Kaiser & Mowafi, 1993 ; Yakimoff et al., 1993), notre principale hypothèse était que le jugement de TTC tactile serait plus précis lorsque les approches étaient présentées selon une trajectoire tangentielle.

2 Expérience 1 : effet de l'écartement des vibrateurs et de la continuité de la stimulation sur le jugement de TTC pour des approches radiales

2.1 Méthode expérimentale

2.1.1 Participants

L'expérience a été réalisée avec 12 participants (six hommes et six femmes), âgés en moyenne de $26,08 \pm 3,4$ ans. Parmi les participants, sept avaient rapporté avoir déjà participé à une expérience impliquant l'utilisation d'un dispositif vibrotactile. Aucun des participants ne présentait de troubles sensoriels particuliers et tous avaient été avertis des conditions de passation de l'expérimentation à travers un formulaire de consentement (Annexe n°II).

2.1.2 Caractéristiques générales de tâches

Les participants recevaient des informations tactiles concernant le mouvement d'approche (radial) d'un mobile hypothétique vers une cible. Les patrons de stimulation comportaient six niveaux d'information. Lors de l'expérimentation, seuls les cinq premiers niveaux étaient présentés au participant, le dernier niveau étant « occulté ». La tâche consistait alors à appuyer le plus précisément possible sur le bouton d'une souris au moment du contact, c'est-à-dire dès lors que le participant estimait que le sixième niveau devrait s'activer. Les approches simulées pouvaient durer 4, 6 ou 8 secondes (selon la distance initiale) et correspondaient au mouvement d'un mobile, ayant une vitesse constante de 0.5 m/s, vers une cible.

Il faut noter que la durée du dernier intervalle, correspondant à la durée « occultée » (entre les niveaux 5 et 6), variait selon la durée de l'approche (**Tableau 4.1**). En effet, l'utilisation d'un codage relatif (mobilisant tous les vibrateurs quelle que soit la distance initiale de l'approche), impliquait que le délai entre deux

stimulations (et donc la durée du dernier intervalle) soit d'autant plus long que la durée totale de l'approche était élevée. De ce fait, en supprimant un niveau d'information pour reproduire une forme d'occultation, la durée de cette occultation variait en fonction de la durée de l'approche simulée (4, 6 ou 8 sec).

Tableau 4.1 – Caractéristiques cinématiques des approches simulées dans l'expérience 1. Les stimulations tactiles correspondant à des approches simulées (dans un environnement virtuel), les distances et vitesses indiquées dans le tableau correspondent à des variables virtuelles.

| Distance initiale (m) | Vitesse (m/s) | Temps de stimulation (sec) | Durée du dernier intervalle temporel (ms) |
|-----------------------|---------------|----------------------------|---|
| 2 | 0,5 | 4 | 260 |
| 3 | 0,5 | 6 | 375 |
| 4 | 0,5 | 8 | 445 |

2.1.3 Matériel

Dans la mesure où le but principal de cette expérience était de déterminer la sensibilité des participants aux paramètres d'écartement et de continuité du stimulus, ces derniers avaient accès uniquement aux informations provenant du dispositif vibrotactile pour percevoir les approches et répondre à la tâche de jugement. Ce dispositif comprenait 23 vibrateurs disposés sous forme de ligne mais seuls 16 de ces vibrateurs étaient activés au cours d'un même patron (**Figure 4.1**). Les vibrateurs ainsi mobilisés étaient différents selon l'écartement entre les vibrateurs (**Figure 4.2**). En effet, nous avons utilisé pour ces deux expériences, trois conditions d'écartement spatial entre les vibrateurs (1, 2 ou 3 cm).

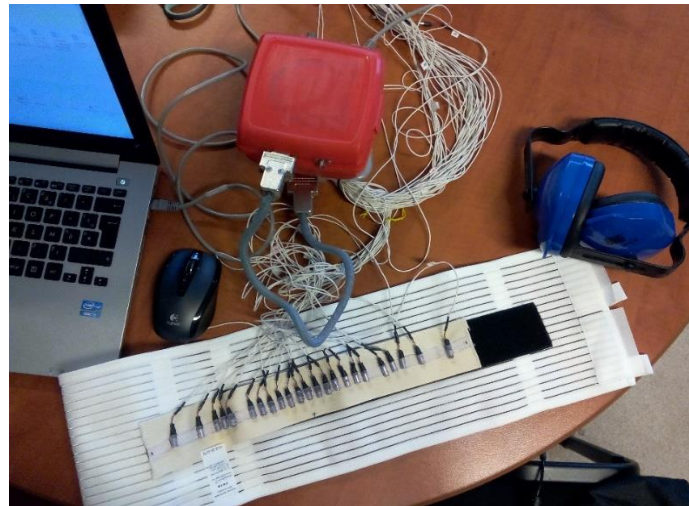


Figure 4.1 – Dispositif expérimental de la première étude (expériences 1, 2 et 3). Le boîtier rouge contient le PC central du dispositif tactile contrôlant les moteurs. La souris est utilisée pour répondre à la tâche.

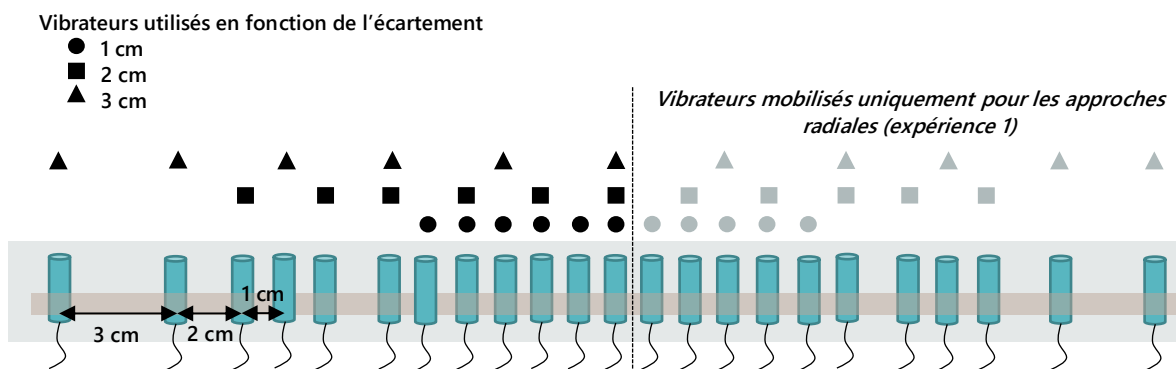


Figure 4.2 – Configuration du dispositif tactile utilisée lors de l'expérience n°1. Les symboles noirs et gris indiquent les vibrateurs utilisés au cours d'un patron selon la variable informationnelle et l'écartement spatial.

L'expérience mettait en jeu des approches radiales. Afin de simuler ce type de trajectoires via la modalité tactile, nous avons utilisé des patrons stimulation tactiles variant selon la taille angulaire (θ) d'un mobile hypothétique lors d'une approche vers l'observateur. A chaque instant t d'une phase d'approche (avec une trajectoire rectiligne dirigée vers l'observateur), cette variable est fonction du rayon de l'objet (R) et de la distance séparant le sujet de l'objet en approche (**Équation 4.1**). Ces patrons fournissant des informations sur la taille angulaire mobilisaient deux vibrateurs par niveau d'information (à l'exception du premier

niveau) et décrivaient un mouvement en expansion avec une activation du centre vers les extrémités (**Figure 4.3**).

$$\theta(t) = 2 \times \tan^{-1}\left(\frac{R}{2D(t)}\right) \approx \tan^{-1}\left(\frac{R}{D(t)}\right)$$

Équation 4.1 – Taille angulaire d'un objet en fonction de son rayon (R) et de sa distance par rapport au point d'observation (D). Lorsque l'angle visuel est inférieur à 10 degrés, on utilise la seconde formule, simplifiée.

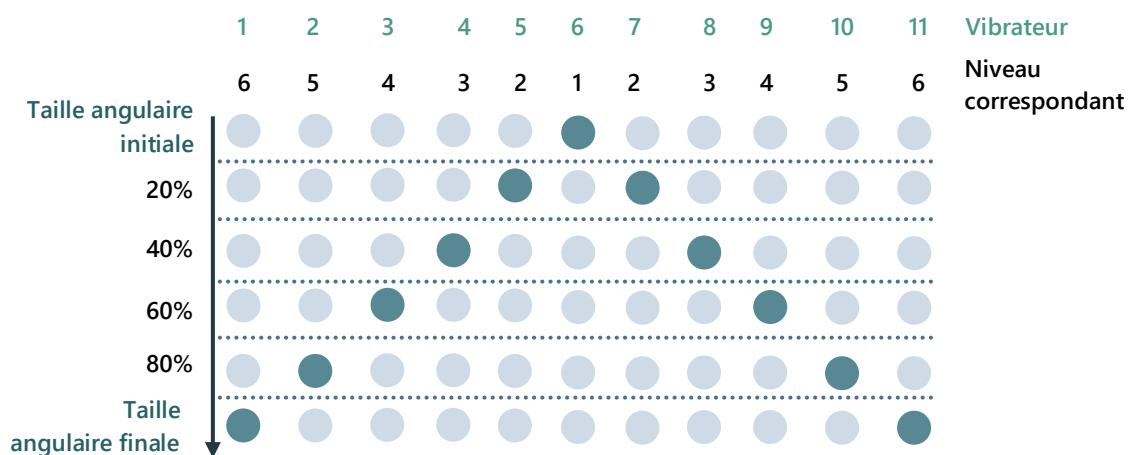


Figure 4.3 – Représentation schématique des formes de stimulations en expansion. Les cercles bleus foncés indiquent les niveaux activés, pour chaque valeur de la taille angulaire.

Les participants pouvaient être confrontés à des patrons de stimulation impliquant des vibrations continues ou discontinues (**Figure 4.4**). Avec un mode de vibration continu, chaque vibreur restait activé jusqu'à l'activation du niveau suivant. Lorsque le mode de vibration était discontinu, chaque vibreur restait activé durant 150ms, laissant ainsi un intervalle temporel (ISI) d'une durée variable entre deux stimulations successives.

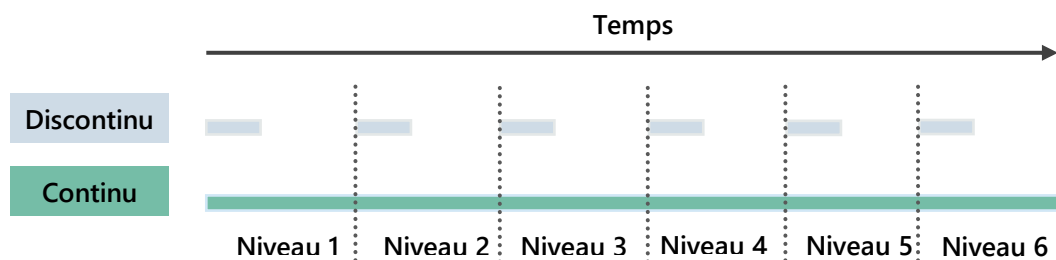


Figure 4.4 – Modes de vibration utilisés lors de l'expérience 1. Les espaces colorés (gris ou bleus) représentent, sur la ligne temporelle, les périodes d'activation de chaque niveau.

2.2 Procédure

Les expériences 1 et 2 étaient passées à la suite (avec une interruption de 5 minutes entre les deux protocoles) par les mêmes participants en contrebalançant l'ordre de passation. Les différents essais du protocole expérimental étaient répartis en deux blocs : l'un comprenant des stimulations continues et l'autre des stimulations discontinues. L'ordre de passation des différents blocs était contrebalancé entre les participants. Chaque bloc comprenait 9 essais différents (3 temps d'occultation * 3 écartements spatiaux) répétés 5 fois, soit 45 essais au total.

Les participants étaient équipés du dispositif tactile avec la ligne de vibreurs placée horizontalement au niveau de l'abdomen et centrée au-dessus du nombril. De plus, les participants portaient, durant toute l'expérience, un casque anti-bruit afin de ne pas entendre le son émis par les vibrations. Ils étaient ensuite invités à s'asseoir en face de l'écran positionné à environ 60 cm et placé à hauteur des yeux.

Au début de chaque bloc, une phase de familiarisation était proposée aux participants afin de leur présenter les stimulations auxquelles ils seraient confrontés et s'assurer de la bonne compréhension de la tâche. Ces essais de familiarisation consistaient à présenter en premier lieu les patrons de stimulation complets (i.e. six niveaux d'information, le dernier vibreur étant activé) avec les trois écartements proposés (1, 2 et 3 cm). Lors des trois essais suivants, de la même manière qu'il leur était demandé durant l'expérimentation, seuls les cinq premiers

niveaux étaient présentés et les participants devaient appuyer sur la souris lorsqu'ils pensaient que le dernier vibreur devait s'activer.

Lors de la passation d'un bloc, les participants déclenchaient le démarrage de l'essai dès qu'ils le souhaitaient, à l'aide de la souris. A la fin de chaque essai, un feedback indiquait au participant la différence (en ms) entre le TTC réel et le TTC qu'il venait d'estimer. Ainsi, un résultat négatif indiquait qu'il avait répondu trop tôt et un résultat positif correspondait à une réponse trop tardive.

2.3 Analyses statistiques

Cette expérience a fait l'objet d'une analyse de variances (ANOVA) à mesures répétées suivant le plan expérimental : *mode de vibration* (continu – discontinu) * *écartement spatial* (1 – 2 – 3 cm) * *Temps d'occultation* (260 – 375 – 445 ms). Les résultats ont été analysés au regard des variables dépendantes classiquement utilisées pour les tâches de jugement d'arrivée :

- **L'erreur constante**, qui indique un possible biais et correspond à la moyenne des réponses du participant en tenant compte du signe : une erreur positive indique une réponse tardive et une erreur négative à une réponse survenue trop tôt.
- **L'erreur absolue**, qui correspond classiquement à un score de précision et prend en compte l'écart absolu entre la réponse du participant et le TTC réel.
- **L'erreur variable**, qui permet d'apprécier la dispersion des réponses du participant et correspond à l'écart-type des erreurs constantes.

Pour cette expérience et celles qui suivront, le seuil de significativité retenu était de $p < .05$ et des tests post-hoc de Tukey ont été réalisés chaque fois que nécessaire afin de préciser la nature des effets significatifs.

2.4 Résultats

Erreur constante (EC). Premièrement, l'EC était significativement plus faible ($F(1,11)=11.40$, $p<.05$, $\eta^2=.49$) lorsque les patrons de stimulation étaient discontinus ($139,1\pm 169,3$ ms) que lorsqu'ils étaient continus ($250,8\pm 238,2$ ms). De plus, l'analyse a également permis d'observer un effet significatif du temps d'occultation ($F(2,22)=18.37$, $p<.05$, $\eta^2=.60$), avec une EC plus élevée lorsque l'occultation était de 260 ms, comparativement aux deux autres conditions d'occultation (**Figure 4.5**). L'écartement spatial entre les vibrateurs avait également un effet significatif sur l'EC ($F(2,22)=3.66$, $p<.05$, $\eta^2=.23$), celle-ci étant plus faible pour un écartement de 3 cm que pour un écartement de 1 cm (**Figure 4.6**). Enfin, l'analyse a montré un effet d'interaction entre le temps d'occultation et l'écartement spatial ($F(4,44)=3.88$, $p<.05$, $\eta^2=.24$). Dans la condition où l'occultation était de 445 ms, l'EC était significativement plus élevée lorsque l'écartement était de 1 cm que lorsqu'il était de 2 cm (**Figure 4.7**).

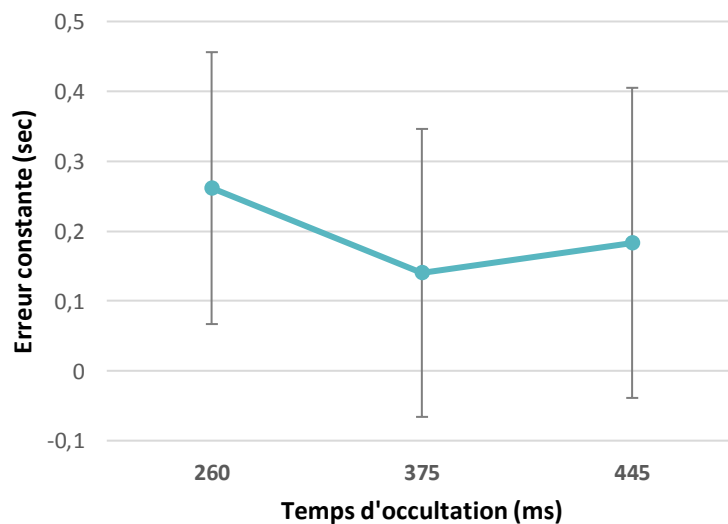


Figure 4.5 – Moyenne des erreurs constantes en fonction du temps d'occultation (expérience 1).

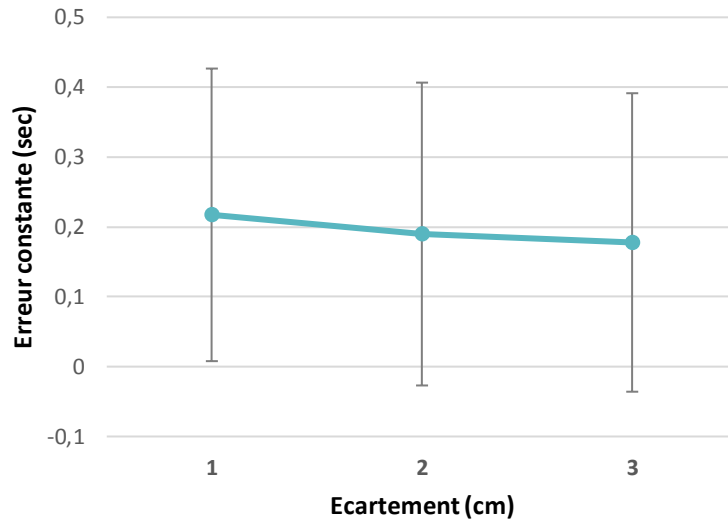


Figure 4.6 – Moyenne des erreurs constantes en fonction de l'écartement spatial (expérience 1).

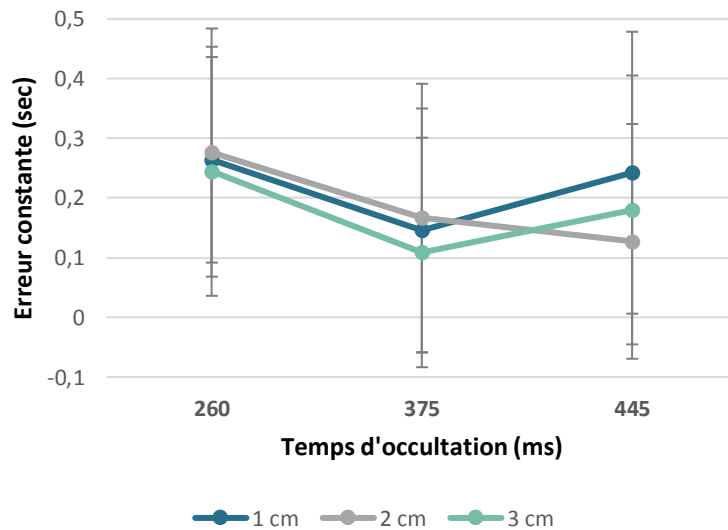


Figure 4.7 – Moyenne des erreurs constantes en fonction de l'écartement spatial et du temps d'occultation (expérience 1). Avec une occultation de 445 ms, l'EC était significativement plus élevée lorsque l'écartement était de 1 cm que lorsqu'il était de 2 cm.

Erreur absolue (EA). L'analyse de variance a montré un effet significatif du mode de vibration ($F(1,11)=7.76$, $p<.05$, $\eta^2=.41$) et du TTC ($F(2,22)=11.30$, $p<.05$, $\eta^2=.51$). L'EA était significativement plus faible lorsque les vibrations étaient discontinues ($198,1\pm 145,2$ ms) comparativement aux vibrations continues ($295,6\pm 210,7$ ms). Concernant le temps d'occultation, l'EA était significativement

plus faible lorsque l'occultation était de 375 ms que pour l'occultation de 260 ou 445 ms (Figure 4.8).

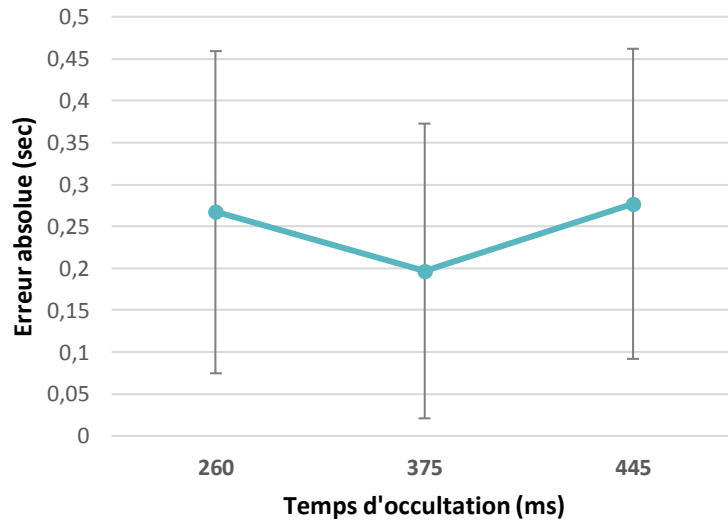


Figure 4.8 – Moyenne des erreurs absolues en fonction du temps d'occultation (expérience 1).

Erreur variable (EV). D'après l'analyse statistique, le TTC avait un effet significatif sur l'EV ($F(2,22)=12.97$, $p<.05$, $\eta^2=.54$), celle-ci étant plus importante dans la condition où l'occultation était de 445 ms que lorsqu'elle était de 260 ou 375 ms (Figure 4.9).

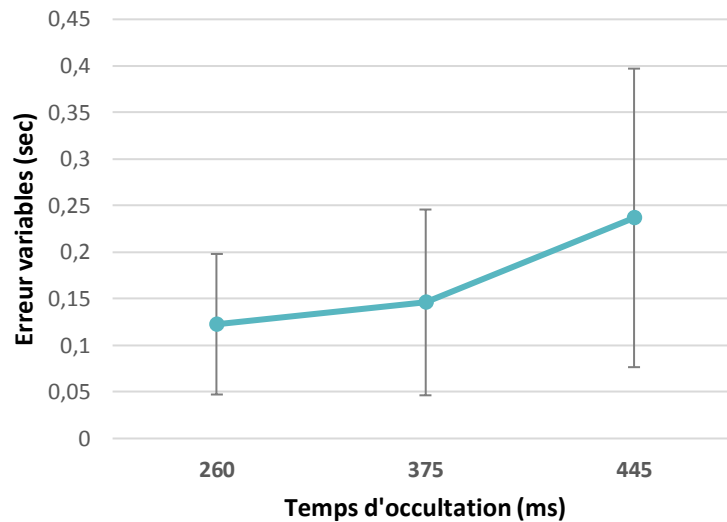


Figure 4.9 – Moyenne des erreurs variables en fonction du temps d'occultation (expérience 1).

2.4.1 Discussion

Cette première expérience mettait en jeu une tâche d'estimation de TTC à partir de trajectoires radiales, afin de préciser les caractéristiques de la stimulation qui influencent la précision de tels jugements. Compte tenu des phénomènes spatiotemporels impliqués dans la perception des stimuli vibrotactiles (Helson & King, 1931 ; Sherrick & Rogers, 1966 ; Suto, 1952), cette expérimentation visait à déterminer l'effet des paramètres spatiaux (écartement inter-vibrateur) et temporels (mode de vibration) sur la précision du jugement de TTC.

Concernant l'influence des facteurs spatiaux, nous avons observé que l'erreur constante était moins importante lorsque l'écartement spatial entre les vibrateurs était de 3 cm. Cet écartement spatial correspond au seuil de discrimination spatiale mesuré par van Erp (2005). Ainsi, dans notre étude, il est tout à fait probable que lorsque l'intervalle spatial entre les vibrations était inférieur à 3 cm (i.e. 1 ou 2 cm), les participants parvenaient plus difficilement à discriminer la localisation de deux vibrations successives, augmentant ainsi l'erreur absolue (**Figure 4.6**). Suto (1952) a montré que l'effet Kappa, décrivant l'influence de la

distance inter-vibrateur sur le jugement temporel entre deux stimuli, apparaissait lorsque la distance perçue entre des vibrations successives était différente. Si la distance physique entre les stimulations est différente mais perçue comme étant identique, cet effet Kappa n'est pas observé et il n'y a aucune incidence sur le jugement temporel. Ainsi, dans notre étude, lorsque les intervalles spatiaux étaient inférieurs au seuil de discrimination de l'abdomen (i.e. 1 et 2 cm), les participants pourraient les avoir perçus comme étant identiques. Cela expliquerait, au regard de l'effet Kappa, que la précision du jugement de TTC soit plus faible dans ces conditions.

Concernant le mode vibration des stimulations, nous attendions des performances supérieures lorsque le patron impliquait des stimulations discontinues. Cette hypothèse s'appuyait sur les travaux d'Helson & King (1931) montrant que la discrimination spatiale entre deux stimuli est favorisée par la présence d'un intervalle temporel entre ces deux stimuli. Nos résultats vont dans le sens de ces travaux puisque le jugement du TTC était plus précis et plus consistant avec des patrons impliquant des vibrations discontinues. Conformément à l'effet tau (Helson & King, 1931) les vibrations discontinues permettent une meilleure discrimination spatiale. Compte tenu de l'importance des facteurs spatiaux pour estimer le TTC (i.e. effet significatif de l'écartement spatial), en améliorant la discrimination spatiale, les vibrations discontinues permettent une estimation plus précise du TTC. Ce phénomène, mis en évidence dans des tâches de jugement de comparaison par paire, est également mis en jeu lorsque le jugement s'appuie une stimulation globale impliquant l'activation successive de plusieurs vibrateurs.

De manière générale, ces résultats ont mis en avant l'importance de prendre en compte les paramètres spatiaux (i.e. discrimination spatiale) et temporels (i.e. caractère discontinu des vibrations), lorsque l'on utilise un patron spatiotemporel pour transmettre des informations vibrotactiles. L'expérimentation qui suit s'intéressait plus particulièrement aux approches tangentiels, c'est-à-dire, entre un mobile et une cible (différente de l'observateur) et visait à confirmer que l'effet des facteurs spatiotemporels était identique pour ce type de trajectoires.

3 Expérience 2 : effet de l'écartement des vibrateurs et de la continuité de la stimulation sur le jugement de TTC pour des approches tangentielles

L'expérience 2 suivait globalement le même protocole expérimental que l'expérience 1. Celle-ci a été réalisée sur la même population qui a passé les deux expériences à la suite (dans un ordre contrebalancé). Les principales différences concernaient les caractéristiques des stimuli vibrotactiles. Cette expérience mettait en jeu des approches tangentielles, les patrons de stimulation variaient alors selon la position du mobile. De plus, ayant fait le choix de conserver des temps d'approche identiques entre les deux expériences, les temps d'occultation étaient plus longs que dans l'expérience 1. Seuls ces éléments qui diffèrent du protocole précédent sont présentés dans la partie suivante.

3.1 Méthodologie expérimentale

3.1.1 Caractéristiques générales de la tâche

Les participants devaient réaliser une tâche d'estimation de TTC à partir de stimulations vibrotactiles renvoyant des informations sur la position d'un mobile en approche vers une cible (approche tangentielle). Comme dans l'expérience précédente, les trajectoires étaient occultées en supprimant l'activation du 6^{ème} niveau d'information. De ce fait, les temps de stimulation étaient également différents selon le temps d'occultation (**Tableau 4.2**). De plus, la durée du dernier intervalle (correspondant au temps d'occultation) des patrons de stimulation était différente de celle de l'expérience 1. Cela était dû aux variables informationnelles utilisées dans chaque type d'approche. Pour des approches tangentielles (expérience 2), l'information transmise était la position du mobile par rapport à la cible qui varie de façon linéaire lorsque la vitesse est constante. Ainsi, l'intervalle temporel entre deux stimulations était toujours identique pour type ce d'approche. En ce qui concerne les approches radiales (expérience 1), celles-ci étaient simulées

au niveau tactile en transmettant une stimulation variant selon la taille angulaire du mobile. Pour une vitesse constante, la taille angulaire du mobile varie de façon exponentielle. De ce fait, la durée entre deux stimulations était d'autant plus courte que le mobile était proche de la cible. Pour un TTC identique, la durée du dernier intervalle était donc plus courte pour les approches radiales que pour les approches tangentielles. Des approches tangentielles et radiales, dans lesquelles le dernier intervalle a une durée équivalente, seront par la suite étudiées lors de l'expérience 3.

Tableau 4.2 – Caractéristiques cinématiques des approches simulées dans l'expérience 2 (les distances et vitesses correspondent à des variables virtuelles).

| Distance initiale (m) | Vitesse (m/s) | Temps de stimulation | Durée du dernier intervalle temporel (ms) |
|-----------------------|---------------|----------------------|---|
| 2 | 0,5 | 4 | 800 |
| 3 | 0,5 | 6 | 1200 |
| 4 | 0,5 | 8 | 1600 |

3.1.2 Matériel

Pour transmettre des approches tangentielles sur le plan tactile nous nous sommes appuyés sur l'étude de van Erp et al. (2003), avec un dispositif transmettant des informations sur la position du mobile par rapport à la cible. Le patron tactile consistait en l'activation successive de six vibreurs, renvoyant chacun à un niveau d'information distinct (**Figure 4.10**). Le déplacement de la stimulation correspondait ainsi au déplacement du mobile vers la cible, tel qu'il serait perçu par un observateur lors d'une approche tangentielle.

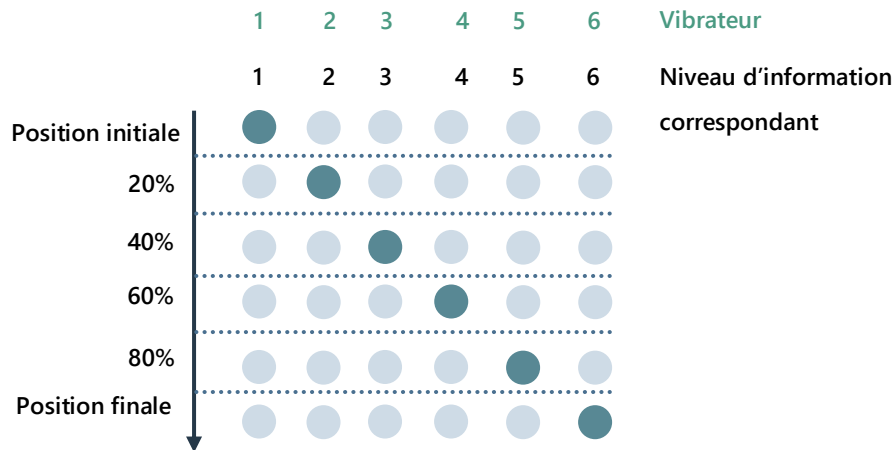


Figure 4.10 – Représentation schématique des formes de stimulations linéaires. Les cercles bleus indiquent les niveaux activés en fonction de la position du mobile.

3.1.3 Analyses statistiques

Cette expérience a fait l'objet d'une analyse de variances (ANOVA) à mesures répétées suivant le plan expérimental : *mode de vibration* (continu – discontinu) * *écartement spatial* (1 – 2 – 3 cm) * *Temps d'occultation* (800 – 1200 – 1600 ms).

3.2 Résultats

Erreur constante (EC). L'analyse de variance a montré dans un premier temps un effet significatif du temps d'occultation ($F(2,22)=15.41$, $p<.05$, $\eta^2=.58$). L'analyse post-hoc indiquait que l'EC était plus faible lorsque le temps d'occultation était de 1600 ms par rapport aux conditions avec une occultation de 800 ou 1200 ms (**Figure 4.11**). De plus, l'ANOVA a mis en évidence un effet d'interaction entre le mode de vibration et le temps d'occultation ($F(2,22)=5.78$, $p<.05$, $\eta^2=.34$). Les participants avaient une EC significativement plus faible avec un mode de vibration discontinu, uniquement dans les conditions avec un temps d'occultation de 800 ou 1200 (**Figure 4.12**).

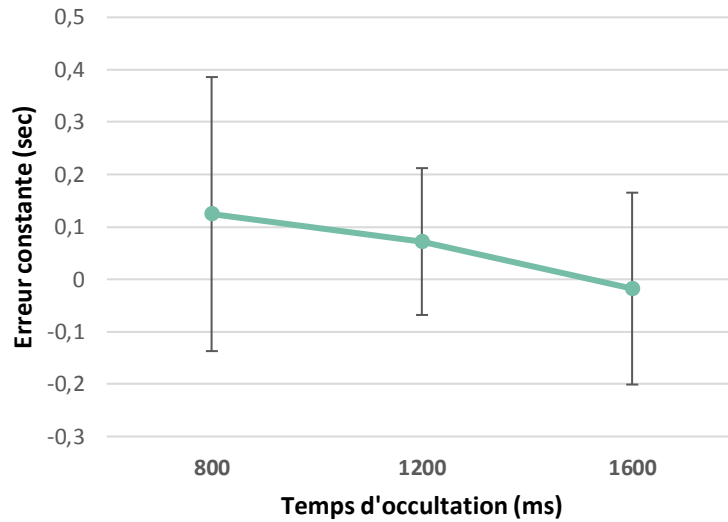


Figure 4.11 – Moyenne des erreurs constantes en fonction du temps d'occultation (expérience 2).

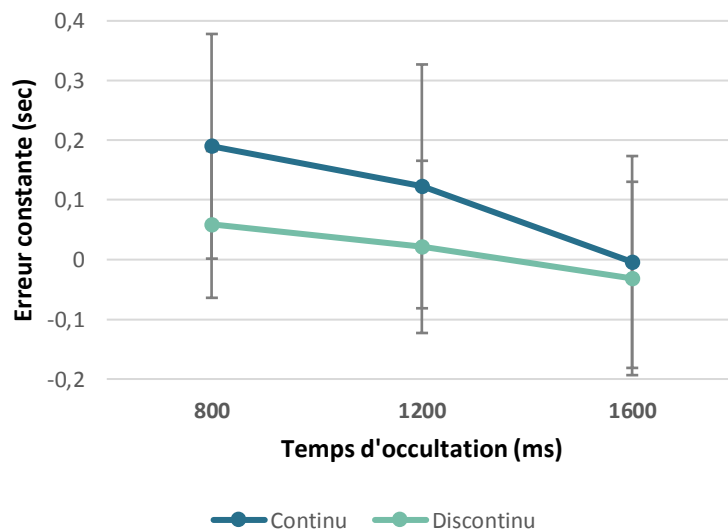


Figure 4.12 – Erreur constante moyenne en fonction du temps d'occultation et du mode de vibration (expérience 2). Dans les conditions avec un temps d'occultation de 800 ou 1200, l'EC était significativement plus faible avec un mode de vibration discontinu.

Erreur absolue (EA). D'après les analyses, le mode de vibration avait un effet significatif sur l'EA ($F(1,11)=5.64$, $p<.05$, $\eta^2=.32$), celle-ci étant plus faible avec des vibrations discontinues ($145,3\pm 93,7$ ms) qu'avec des vibrations continues ($213,3\pm 135,3$ ms). De plus, les résultats indiquaient un effet d'interaction entre le mode de vibration et le temps d'occultation ($F(2,22)=6.38$, $p<.05$, $\eta^2=.37$).

L'utilisation de vibrations discontinues conduit à une EA plus faible lorsque l'occultation est de 800 ou 1200 ms (**Figure 4.13**).

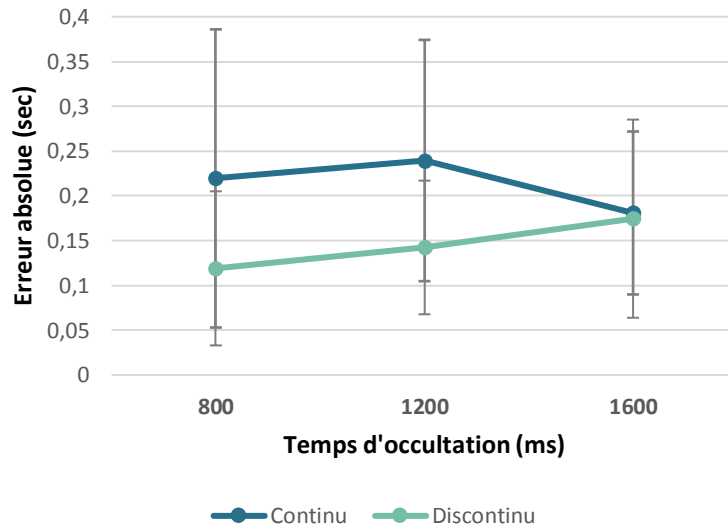


Figure 4.13 – Erreur absolue en fonction du mode de vibration et du temps d'occultation (expérience 2). Dans les conditions avec un temps d'occultation de 800 ou 1200, l'EC était significativement plus faible avec un mode de vibration discontinu.

Erreur variable (EV). L'analyse a permis d'observer un effet du mode de vibration ($F(1,11)=11.94$, $p<.05$, $\eta^2=.52$) et du temps d'occultation ($F(2,22)=5.55$, $p<.05$, $\eta^2=.33$). L'EV était plus faible lorsque les participants étaient confrontés à des vibrations discontinues ($135,5\pm 101,3$ ms) comparativement à la condition impliquant des vibrations continues ($194,0\pm 141,8$). De plus, l'EV était significativement plus élevée avec une occultation de 1200 ms qu'avec une occultation de 800 ms (**Figure 4.14**). Un effet d'interaction entre le mode de vibration et le temps d'occultation a également été observé ($F(2,22)=4.14$, $p<.05$, $\eta^2=.27$). D'après les analyses post-hoc, le temps d'occultation avait un effet significatif sur l'EV uniquement avec un mode de vibration continu (**Figure 4.15**).

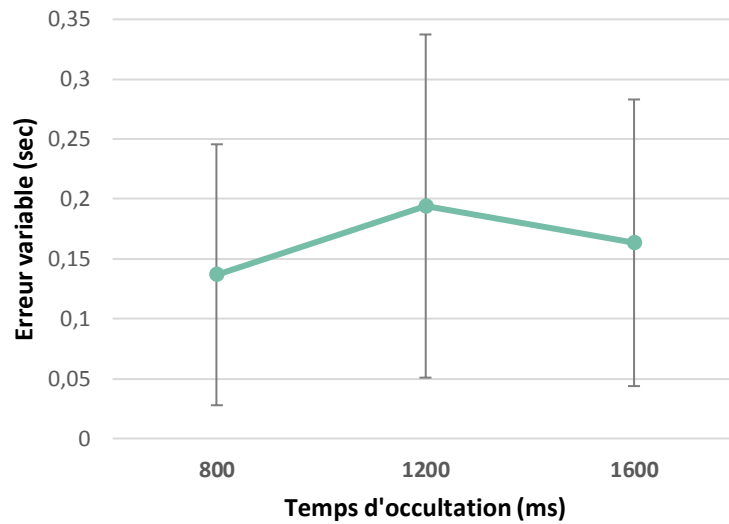


Figure 4.14 – Erreur variable en fonction du temps d'occultation (expérience 2).

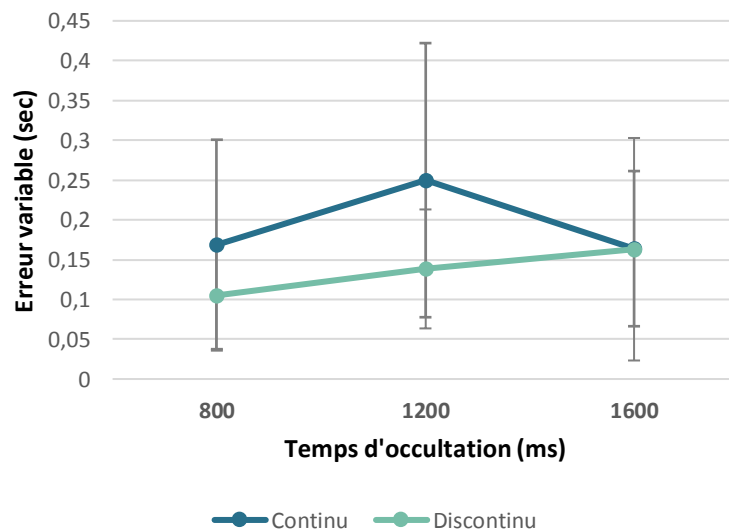


Figure 4.15 – Erreur variable en fonction du mode de vibration et du temps d'occultation (expérience 2). Le temps d'occultation avait un effet significatif sur l'EV uniquement avec un mode de vibration continu

3.2.1 Discussion

Contrairement à l'expérience précédente, les résultats n'ont montré ici aucun effet de l'écartement spatial sur la précision du jugement. Lorsque l'approche est présentée selon une trajectoire tangentielle, il est possible que les participants

s'appuient principalement sur les caractéristiques temporelles (i.e. rythme) de la stimulation pour estimer le TTC. En effet, contrairement aux patrons de stimulations mis en jeu avec des trajectoires radiales, dans cette expérience, la stimulation changeait de localisation selon un rythme constant. Comme nous l'avions évoqué, ces dynamiques différentes selon le type d'approche sont liées aux variables informationnelles utilisées dans chaque type d'approche (position ou taille angulaire du mobile). En effet, la vitesse des approches simulées étant constante, lorsque le patron de stimulation est lié à la position du mobile (i.e. approche tangentielle), le délai entre chaque vibration est identique au cours d'un essai. En revanche, la taille angulaire augmentant d'une façon quasi-exponentielle (même à une vitesse constante), plus l'objet (simulé) est proche du contact, plus le délai entre deux stimulations est court. Cela induit un rythme croissant entre les vibrations successives pour ce type d'approche. Si les participants sont ainsi sensibles au rythme de vibration, cela suppose qu'ils s'appuient principalement sur les caractéristiques temporelles de la stimulation (i.e. le rythme) pour estimer le TTC, celle-ci étant plus facilement accessible avec ce type d'approche. Les rythmes irréguliers étant moins bien reproduits que les rythmes réguliers, ils pourraient également être moins bien perçus et conduire ainsi à une estimation temporelle moins précise (Kosonen et Raisamo, 2006).

Les résultats de cette expérience affichent globalement des erreurs plus faibles que pour l'expérience précédente. A titre d'exemple, avec des vibrations discontinues, qui permettent le jugement le plus précis, l'EA moyenne est de $145,3 \pm 93,7$ ms avec des trajectoires tangentielles et de $198,1 \pm 145,2$ ms avec des trajectoires radiales. D'après les résultats des deux premières expériences (1 et 2), le jugement de TTC serait donc, comme dans la modalité visuelle, plus précis lorsque l'approche est présentée selon une trajectoire tangentielle. Cependant, ces résultats pourraient être liés à la durée du dernier intervalle qui, comme nous l'avions précisé, était différente pour les deux types d'approche (cf. **Tableau 4.1** et **Tableau 4.2**). L'objectif de l'expérience qui suit est précisément de traiter cette question en contrôlant la durée de l'occultation.

4 Expérience 3 : précision du jugement de TTC selon le type d'approche simulé (radiale vs tangentielle)

L'objectif de l'étude était de déterminer, pour une durée d'occultation similaire, quel type d'approche (tangentielle ou radiale) permet le jugement de TTC le plus précis. Compte tenu des résultats des expériences 1 et 2, et des résultats observés dans la modalité visuelle (Schiff & Oldak, 1991 ; Kaiser & Mowafi, 1993 ; Yakimoff et al., 1993), nous faisons ici l'hypothèse d'un jugement plus précis avec des trajectoires tangentielles. La méthodologie expérimentale utilisée étant similaire à celles des expériences 2 et 3, la partie qui suit ne mentionnera que les éléments du protocole qui différaient par rapport à ces deux études.

4.1 Méthode expérimentale

4.1.1 Participants

L'expérience 3 a été réalisée sur huit participants âgés de $24,1 \pm 1,73$ ans. Trois des participants avaient participé aux expériences 1 et 2. Aucun des participants ne présentait de troubles sensoriels particuliers et tous avaient été avertis des conditions de passation de l'expérimentation à travers un formulaire de consentement.

4.1.2 Caractéristiques générales de la tâche

Les participants devaient réaliser une tâche d'estimation de TTC avec des trajectoires radiales et tangentielles. Ces trajectoires étaient occultées durant les 600 ou 950 ms précédant le contact. Les occultations étant simulées en supprimant l'activation du sixième vibreur (comme lors des deux expériences précédentes), la durée globale de la stimulation (correspondant au TTC) était ainsi différente selon le type d'approche (**Tableau 4.3**).

Tableau 4.3 – Caractéristiques cinématiques des approches simulées dans l'expérience 2. Pour les deux types d'approche, la distance initiale était de 2 mètres (virtuels).

| | Type d'approche | TTC (sec) | Vitesse du mobile (m/s) |
|--------|-----------------|-----------|-------------------------|
| 600 ms | Tangentielle | 3 | 0,67 |
| | Radiale | 15 | 0,12 |
| 900 ms | Tangentielle | 5 | 0,40 |
| | Radiale | 22,5 | 0,08 |

4.1.3 Matériel

Pour cette expérience, compte tenu de l'effet de l'écartement spatial sur la précision du jugement de TTC pour des trajectoires radiales (expérience 1), nous avons utilisé un écartement de 3 cm entre les vibrateurs. En s'appuyant également sur les résultats précédents, les patrons de stimulation vibraient selon un mode discontinu.

4.1.4 Procédure

Les essais étaient répartis en deux blocs, un bloc avec des trajectoires tangentielles et un second pour les approches radiales. Chaque bloc comprenait 15 essais par durée d'occultation (30 au total) présentés dans un ordre aléatoire. L'ordre de passation des blocs expérimentaux était contrebalancé entre les participants.

4.1.5 Analyses statistiques

Une analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées a été réalisée selon le plan expérimental suivant : *type d'approche* (tangentielle – radiale) * *temps d'occultation* (600 – 950 ms). Ces analyses ont porté sur l'erreur constante, l'erreur

absolue et l'erreur variable des estimations de TTC. Pour chacune de ces variables, le seuil de significativité retenu était de $p < .05$ et des tests post-hoc de Tukey ont été réalisés chaque fois que nécessaire afin de préciser la nature des effets significatifs.

4.1.6 Résultats

Erreur constante (EC). Les résultats ont montré un effet significatif du type d'approche ($F(1,7)=8.30$, $p<.05$, $\eta^2=.54$), avec une EC plus élevée lorsque les participants étaient confrontés à des approches tangentielle ($49,5\pm 27,3$ ms) comparativement aux approches radiales ($74,3\pm 88,6$ ms). De plus, l'EC était significativement plus importante ($F(1,7)=34.78$, $p<.05$, $\eta^2=.83$) dans la condition avec une occultation de 600 ms ($101,3\pm 53,5$ ms) que celle avec occultation de 950 ms ($22,5\pm 52,4$ ms). Enfin, un effet d'interaction entre ces deux variables (type d'approche et durée d'occultation) a également pu être observé ($F(1,7)=29.61$, $p<.05$, $\eta^2=.81$). Les EC étaient moins élevées dans la condition tangentielle seulement pour l'occultation de 600 ms (**Figure 4.16**).

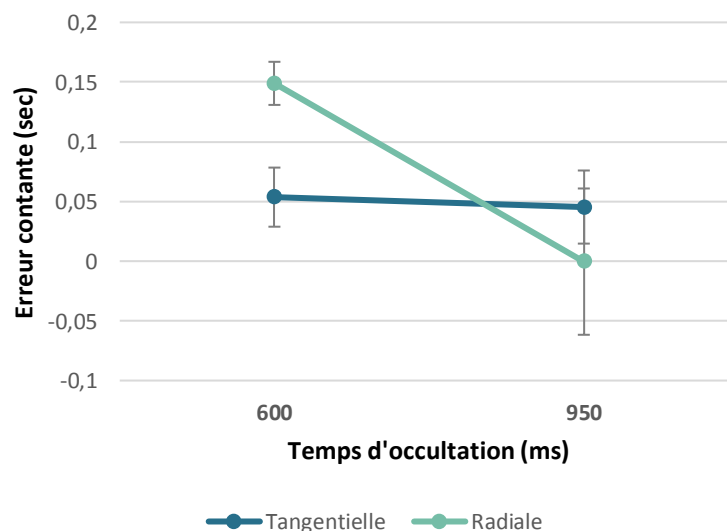


Figure 4.16 – Moyenne des erreurs constantes en fonction du type d'approche et de la durée d'occultation (expérience 2). Les EC étaient moins élevées dans la condition tangentielle seulement pour l'occultation de 600 ms

Erreur absolue (EA). L'analyse de variance sur l'EA a montré un effet significatif du type d'approche ($F(1,7)=42.26$, $p<.05$, $\eta^2=.86$). Les participants étaient plus précis lorsque l'approche suivait une trajectoire tangentielle ($78,2\pm 24,2$ ms) que lorsqu'elle suivait une trajectoire radiale ($125,5\pm 35,1$ ms). Un effet d'interaction entre le type d'approche et la durée d'occultation ($F(1,7)=13.55$, $p<.05$, $\eta^2=.66$) a permis de préciser que l'EA était significativement moins élevée avec des trajectoires tangentielles lorsque l'occultation était de 600 ms (**Figure 4.17**).

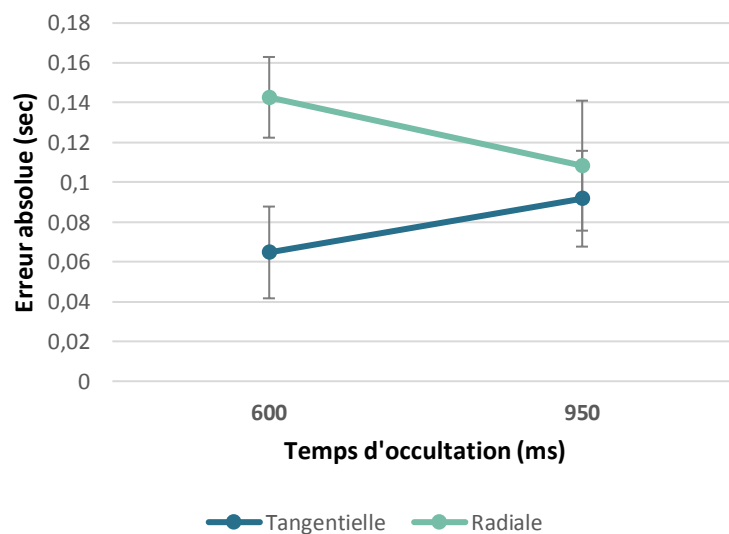


Figure 4.17 – Moyenne des erreurs absolues en fonction du type d'approche et de la durée d'occultation (expérience 2). L'EA était significativement moins élevée avec des trajectoires tangentielles lorsque l'occultation était de 600

Erreur variable (EV). Les résultats concernant l'EV ont montré un effet significatif du type d'approche ($F(1,7)=11.76$, $p<.05$, $\eta^2=.63$) et du temps d'occultation ($F(1,7)=6.92$, $p<.05$, $\eta^2=.50$). L'EV était plus importante pour des approches radiales ($73,4\pm 25,8$ ms) que pour des approches tangentielles ($50,2\pm 17,8$ ms). Par ailleurs, l'EV était plus élevée lorsque l'occultation était de 950 ms ($68,4\pm 27,8$ ms) que lorsqu'elle était de 600 ms ($55,1\pm 20,1$ ms).

4.2 Discussion

La troisième expérience de cette étude visait à déterminer quel type d'approche (i.e. tangentielle ou radiale) permettait le jugement de TTC le plus précis dans la modalité tactile. Tenant compte des résultats des deux premières expériences et des résultats obtenus dans la modalité visuelle (Schiff & Oldak, 1991 ; Kaiser & Mowafi, 1993 ; Yakimoff et al., 1993), nous attendions des performances de jugement plus précises avec les trajectoires tangentielles. Conformément à cette hypothèse, les réponses des participants étaient plus précises (EC et EA) et plus consistantes (EV) lorsque les approches étaient présentées selon une trajectoire tangentielle. Ces résultats confirment ainsi les tendances observées dans les expériences 1 et 2 mais dans lesquelles la durée du dernier intervalle était différente selon le type d'approche. Ces différences entre les approches tangentielles et radiales sont généralement expliquées dans les études sur le jugement de TTC visuel par la mise en jeu de stratégies anisotropiques. C'est-à-dire qu'en fonction de la direction de la trajectoire, les participants anticipent différemment les conséquences de l'approche et du contact. La perception d'une collision imminente dirigée vers l'observateur, en cas d'approche radiale, inciterait les participants à répondre de façon plus anticipée afin d'éviter le contact. Ainsi, dans ces études, on observe généralement une sous-estimation du TTC pour les deux types d'approche, mais des réponses plus anticipées (et donc moins précises) pour les trajectoires radiales. Cette hypothèse est difficilement envisageable concernant la modalité tactile puisque l'on a observé une erreur constante positive pour les deux types d'approche et que l'erreur constante était plus importante dans le cas d'approches radiales.

Ce résultat nous amène donc à proposer une autre piste d'explication, selon laquelle le jugement temporel serait plus précis avec des informations sur la position du mobile en raison du caractère régulier des vibrations, à l'inverse du codage basé sur la taille angulaire. Plusieurs études ont montré la capacité de la peau à discriminer de façon relativement précise les caractéristiques temporelles des stimulations tactiles et notamment le rythme de vibration (Brewster & Brown,

2004; Töyssy, Raisamo, & Raisamo, 2008). Ce paramètre, généralement utilisé à l'aide d'un seul vibreur, est perçu à travers l'ISI entre deux stimulations successives. Nos résultats suggèrent ainsi que le rythme fait partie des caractéristiques de la stimulation vibrotactile qui, en plus des caractéristiques spatiales, influencent le jugement de TTC. Ils viennent également soutenir l'idée que ce paramètre, et plus largement les paramètres temporels, offrent de très bonnes perspectives en terme de codage de l'information tactile (Asif et al., 2010; Gray et al., 2014). Des résultats, obtenus dans le cadre d'une recherche conduite dans un contexte plus appliqué, vont également dans ce sens. En effet, Gray et al. (2014) ont montré que le temps de réaction au freinage était réduit lors de l'utilisation d'informations spatiotemporelles dont le délai est proportionnel à la vitesse d'approche.

Il faut cependant noter une limite au codage utilisé dans notre étude pour transmettre les approches radiales. Dans notre cas, le dispositif fournissait des informations sur la taille angulaire à travers l'expansion spatiale d'une paire de vibreurs. Or sur le plan visuel, l'expansion optique se traduit par une augmentation de la surface de l'objet sur la rétine. Dans l'étude Cancar et al. (2013), les informations tactiles étaient transmises sur un principe similaire. Le patron en expansion variait d'un point de vue spatiotemporel mais également au niveau du nombre de vibreurs activés. Autrement dit, les vibreurs, une fois activés, continuaient de vibrer jusqu'au contact (augmentant progressivement le nombre total de vibreur actifs). Avec cette forme de stimulation, les participants pouvaient donc s'appuyer à la fois sur les variations spatiotemporelles et sur l'intensité globale de la stimulation. En effet, Cholewiak (1979) a montré que l'augmentation du nombre de vibreurs activés augmentait l'intensité globale de la stimulation perçue. Le jugement de TTC à partir de trajectoires radiales (tactiles) pourrait donc être plus précis lorsque l'information est présentée avec une variation spatiotemporelle combinée à une augmentation de l'intensité globale de la stimulation.

En dépit de cette question intéressante à traiter, nos résultats suggèrent sur le plan appliqué que les informations d'approche devraient être présentées, sur le plan tactile, selon une trajectoire tangentielle. Bien que la stimulation visuelle spécifiant un contact imminent soit une expansion optique (i.e. trajectoire radiale), dans la modalité tactile, ce type d'approche permet une estimation moins précise du TTC. Ainsi, les dispositifs tactiles devraient privilégier une présentation des informations selon une approche tangentielle, c'est-à-dire en fournissant des informations sur la distance du mobile, par rapport à l'observateur, plutôt que des informations sur la taille angulaire.

Chapitre 5

Comparaison et combinaison d'informations visuelles et
tactiles pour le jugement de TTC

1 Introduction

En vue de déterminer comment transmettre des informations d'approche via la modalité tactile, une première étape (étude 1) a consisté à définir, parmi plusieurs paramètres de la stimulation (l'écartement spatial entre les vibrateurs et le mode de vibration), ceux qui permettaient d'accéder au jugement de TTC le plus précis. Les sujets recevaient des informations tactiles concernant le mouvement d'approche (tangentielle ou radiale) d'un mobile et devaient juger de son moment d'arrivée sur une cible en appuyant sur un bouton. Les participants étaient plus performants avec des stimulations impliquant des vibrations discontinues et renvoyant à des informations concernant la position du mobile (approche tangentielle). Ces informations tactiles ayant vocation à suppléer ou compléter les informations visuelles, il convient désormais (1) de comparer les performances de jugement obtenues avec la modalité tactile à celles observées avec la modalité visuelle et (2) de déterminer si l'ajout d'informations vibrotactiles permet d'améliorer le jugement de TTC.

Les erreurs obtenues dans notre première étude ($EC \approx 50$ ms et $EA \approx 180$ ms) étaient assez comparables à celles observées dans les tâches visuelles de jugement d'arrivée. Cette comparaison reste néanmoins à faire d'autant que les erreurs sont fortement influencées dans les tâches de jugement d'arrivée par des facteurs telles que l'âge, le sexe ou encore la vitesse du stimulus (Benguigui, Broderick, & Ripoll, 2004; Schiff & Oldak, 1990). L'étude de Cancar et al. (2013) est à ce jour la seule à avoir exploré les modalités visuelles et tactiles en termes de précision du jugement de TTC. Cependant, comme nous l'avons exposé dans notre problématique, la portée de leurs résultats reste limitée en raison du type de stimuli présenté sur le plan visuel. D'une part, cette étude s'appuyait sur des approches radiales, or la première étude a montré une meilleure précision avec des approches tangentielles. D'autre part, l'information consistait en une représentation visuelle des vibrateurs activés au niveau du dispositif tactile. Autrement dit, il ne s'agissait pas d'une approche continue mais d'une succession de trois images de taille croissante en fonction de la proximité de l'objet. Dans ces conditions, la précision des informations, et donc du

jugement visuel, est considérablement réduite par rapport à la richesse des informations visuelles naturellement présentes dans l'environnement. En effet, Van Erp et Verschoor (2004) ont montré, dans une tâche de poursuite, que si les performances étaient souvent meilleures dans la modalité visuelle, cette différence était en partie due à la différence de résolution entre le dispositif visuel et le dispositif tactile. Lorsque la précision des informations visuelles est ramenée à celle de la modalité tactile, les performances des deux modalités sont comparables. De plus, dans notre première expérience, comme dans celle de Cancar et al. (2003), les informations tactiles étaient occultées. Ces informations étant destinées à être transmises en continue pour informer d'une approche, il paraît utile de connaître la précision du jugement basé sur des stimulations tactiles complètes (i.e. non occultées).

L'objet de ce deuxième chapitre expérimental était donc de comparer la précision du jugement de TTC dans la modalité tactile à celle de la modalité visuelle, tout en précisant si ces deux sources d'informations peuvent être combinées pour améliorer la précision du jugement (bimodale). Dans ce cadre, la première expérience consistait en une tâche de jugement de TTC, avec des approches tangentielles présentées de façon unimodale (visuelle ou tactile) ou bimodale (visuotactile) et dans deux conditions d'occultation différentes (avec ou sans). Nous avons fait l'hypothèse que la modalité tactile pouvait suppléer efficacement la modalité visuelle et qu'elle pouvait aussi la compléter en permettant d'obtenir des résultats meilleurs qu'en modalité visuelle seule. Plusieurs études expérimentales attestent en effet de l'amélioration des performances lors de l'utilisation des modalités tactiles et visuelles dans une interface multimodale (par rapport à une utilisation exclusive de la modalité visuelle), notamment dans des tâches de navigation (Oskarsson et al., 2013 ; van Erp, Veltman et van Veen, 2003 ; van Erp et van Veen, 2004).

2 Expérience 4 : précision d'un jugement de TTC réalisé à partir d'informations visuelles, tactiles ou bimodales

2.1 Méthode expérimentale

2.1.1 Participants

L'étude a été réalisée avec 12 participants (trois femmes et neuf hommes), tous étudiants de l'université de Caen Normandie. L'âge moyen des participants était de $20,67 \pm 2,47$ ans et quatre d'entre eux avaient déjà participé à au moins une expérience impliquant l'utilisation d'un dispositif vibrotactile. Aucun des participants ne présentait de troubles sensoriels particuliers et tous avaient été avertis des conditions de passation de l'expérimentation à travers un formulaire de consentement.

2.1.2 Caractéristiques générales de la tâche

Les participants recevaient des informations provenant de différentes modalités sensorielles (visuelle – tactile – visuotactile) et spécifiant un mouvement d'approche entre un mobile et une cible. Ils devaient alors appuyer sur le bouton gauche d'une souris, le plus précisément possible, au moment du contact entre les deux objets. Cette tâche de jugement de TTC était réalisée selon deux conditions d'occultation (avec ou sans) et dans trois conditions sensorielles (i.e. visuelle, tactile et bimodale).

2.1.3 Matériel

Le dispositif utilisé dans cette étude était identique à celui présenté dans la première étude (dispositif vibrotactile CAYLAR). Pour transmettre les informations tactiles nous avons utilisé 11 vibrateurs, avec une fréquence moyenne de $162,8 (\pm 4,7)$ Hz (**Figure 5.1**).

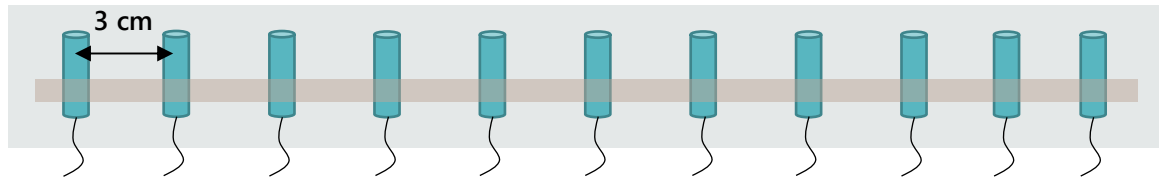


Figure 5.1 – Configuration du dispositif tactile utilisé pour l'expérience n°4.

Pour tous les essais simulés, la distance initiale entre le mobile et la cible était de 30 cm. Cette distance correspondait à la fois à la distance entre les deux objets à l'écran et à la distance physique entre le premier et le dernier vibreur (correspondant respectivement à la position initiale du mobile et la position de la cible). La durée d'un essai était de 1,67, 2,5 ou 5 secondes selon que la vitesse d'approche (V) était de 6 (V1), 12 (V2) ou 18 cm/s (V3). En cas d'occultation, le mobile disparaissait une seconde avant le contact. En fonction de sa vitesse, la distance parcourue par le mobile durant cet intervalle temporel (entre l'occultation et le contact) pouvait varier de 6 à 26 cm (**Tableau 5.1**). Dans la condition tactile, la trajectoire était occultée en supprimant l'activation des 2, 4 ou 6 derniers vibreurs, selon la vitesse du mobile (**Tableau 5.2**).

Tableau 5.1– Caractéristiques cinématiques des différentes approches simulées.

| | Début occultation | | Fin de l'essai | |
|---------------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| | <i>Temps (sec)</i> | <i>Distance (cm)</i> | <i>Temps (sec)</i> | <i>Distance (cm)</i> |
| V1 (6 cm/s) | 4.00 | 24.00 | 5.00 | 30 |
| V2 (12 cm/s) | 1.50 | 18.00 | 2.50 | 30 |
| V3 (18 cm/s) | 0.67 | 4.00 | 1.67 | 30 |

Tableau 5.2 – Caractéristiques cinématiques et moment d'occultation des stimulations tactiles. Les trois dernières lignes représentent les vibrateurs activés (noir) ou non (gris) dans la condition avec occultation.

| | <i>Niveaux</i> | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | <i>Cm</i> | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 |
| ISI | <i>V1</i> | 0.00 | 0.50 | 1.00 | 1.50 | 2.00 | 2.50 | 3.00 | 3.50 | 4.00 | 4.50 | 5.00 |
| | <i>V2</i> | 0.00 | 0.25 | 0.50 | 0.75 | 1.00 | 1.25 | 1.50 | 1.75 | 2.00 | 2.25 | 2.50 |
| | <i>V3</i> | 0.00 | 0.16 | 0.33 | 0.50 | 0.66 | 0.83 | 1.00 | 1.16 | 1.33 | 1.50 | 1.66 |
| Patron | <i>V1</i> | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| | <i>V2</i> | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| | <i>V3</i> | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |

Afin d'éviter que les participants n'établissent ce lien constant entre la vitesse et la distance occultée (et le nombre de vibrateurs « occultés » dans la modalité tactile), 6 essais supplémentaires ont été ajoutés dans chaque condition sensorielle (tactile, visuelle et bimodale) :

- En V1, deux essais avec une occultation de 3 ou 2 secondes (correspondant à l'inactivation des 6 et 4 derniers vibrateurs).
- En V2, deux essais avec une occultation de 1,5 ou 0,5 secondes (correspondant à l'inactivation des 6 et 2 derniers vibrateurs).
- En V3, deux essais avec une occultation de 0,67 ou 0,33 secondes (correspondant à l'inactivation des 4 et 2 derniers vibrateurs).

Ces différents essais ont par la suite été écartés de l'analyse des résultats.

Caractéristiques des stimuli vibrotactiles. En s'appuyant sur les résultats de la première étude expérimentale, nous avons utilisé ici des informations tactiles sur la position du mobile par rapport à la cible, c'est-à-dire en présentant une approche tangentielle. Un mode de vibration discontinu a été privilégié, avec une durée de vibrations de 120 ms (réduite par rapport à l'étude n°1, afin de garder une discontinuité même lorsque le délai de vibration entre deux niveaux était court). Les 11 vibrateurs étaient placés horizontalement au niveau de l'abdomen, avec un écartement spatial de 3 cm. Le vibrateur le plus à droite correspondait à la position initiale du mobile, le plus à gauche à la position de la cible (et donc à la position du mobile au moment du contact). Dans cette modalité sensorielle, le contact

correspondait donc au moment où démarrait l'activation du dernier vibreur. Au début de chaque essai, ce dernier vibreur était activé durant 500 ms afin de permettre au participant d'identifier la localisation correspondant au contact. L'essai démarrait ensuite automatiquement 1,5 secondes après la fin de cette stimulation.

Caractéristiques des stimuli visuels. Le dispositif visuel affichait un mobile, représenté par une sphère rouge, en mouvement vers une cible représentée par un anneau jaune. Les diamètres respectifs du mobile et de la cible étaient de 3,2 et 4,2 cm. Le contact entre les deux objets correspondait au moment où le centre du mobile arrivait au centre de la cible, et non pas au premier contact entre les deux (**Figure 5.2**). Afin de présenter les approches dans les mêmes conditions que la modalité tactile, les approches impliquant la modalité visuelle (conditions visuelle et bimodale) démarraient 2 secondes après que le participant ait lancé l'essai.



Figure 5.2 – Stimulation visuelle correspondant au moment du contact (gauche). La figure de droite correspond à une réponse anticipée (sachant que le mobile arrive par la droite).

2.1.4 Procédure

L'expérience a été réalisée dans six conditions expérimentales (**Figure 5.3**), chacune ayant été passée dans un bloc expérimental distinct composé de 36 essais (10 pour chaque vitesse et les 6 essais supplémentaires), soit 180 essais au total. L'ordre de passation des différents blocs était contrebalancé entre les participants, tout en s'assurant que deux blocs d'une même condition sensorielle soient toujours passés à la suite et en conservant une alternance entre les conditions avec et sans occultation.

Les participants étaient équipés d'un casque anti-bruit et du dispositif tactile. La ligne de vibreur était placée horizontalement au niveau de l'abdomen et centrée au-dessus du nombril. Au début de chaque bloc, six essais de familiarisation permettaient au participant de réaliser la tâche dans les mêmes conditions que le bloc à suivre et de s'assurer de la bonne compréhension des consignes de la tâche. Comme dans l'expérience n°1, les participants recevaient à la fin de chaque essai un feedback leur indiquant l'écart entre le TTC estimé et le TTC réel.

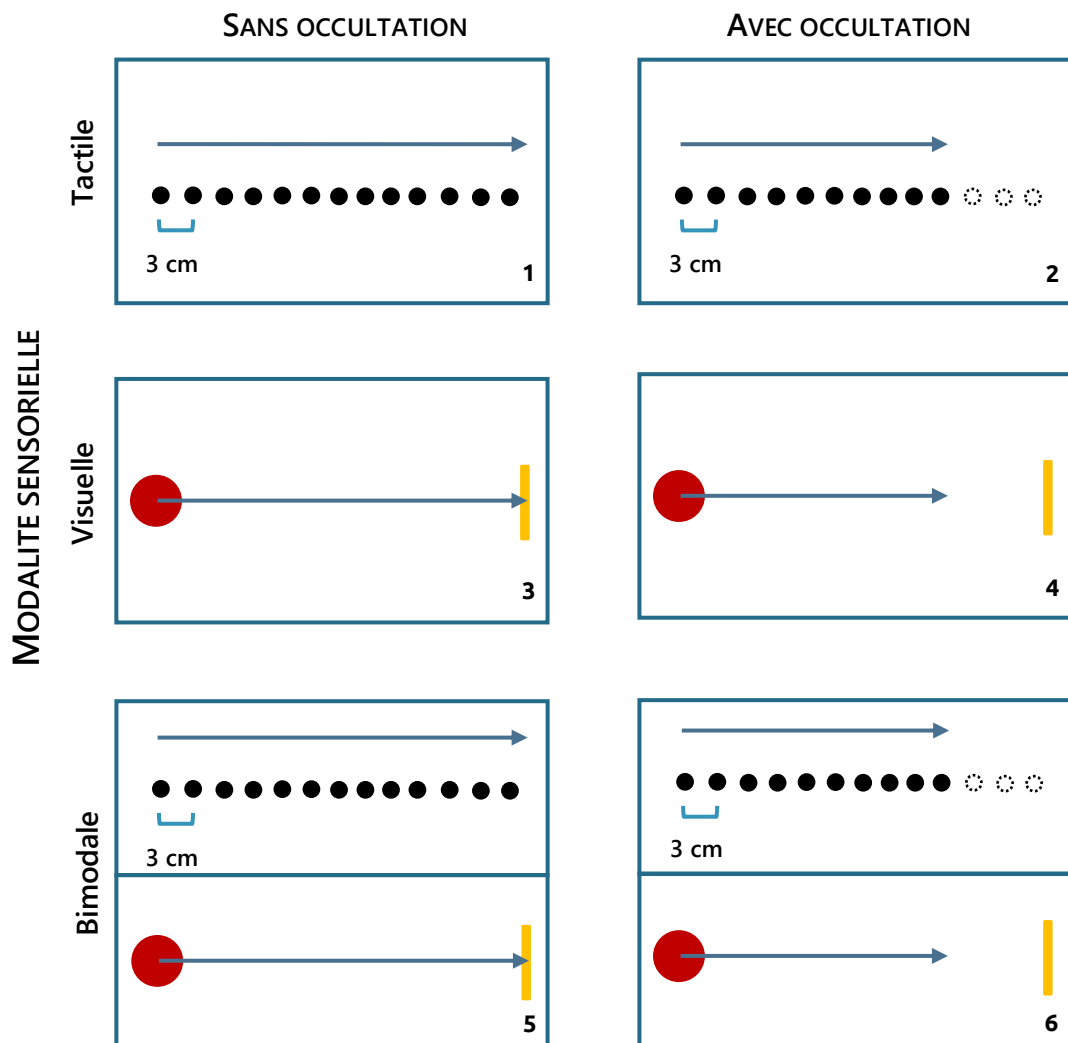


Figure 5.3 – Les six conditions expérimentales dans lesquelles était passée la tâche de jugement de TTC (expérience 4). Les trajectoires étaient présentées, au niveau tactile ou visuel, dans leur totalité (1 et 3) ou avec une occultation d'une seconde (2 et 4). Dans la condition bimodale (5 et 6), les informations des deux modalités sensorielles étaient présentées simultanément.

2.1.5 Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont reposé sur des ANOVA suivant le plan expérimental : *condition sensorielle* (visuelle – tactile – bimodale) * *occultation* (sans – avec) * *vitesse* (V1, V2, V3). Les résultats ont été analysés au regard des variables dépendantes classiquement utilisées dans les tâches de jugement d'arrivée et utilisées lors de la première étude (p.118).

2.2 Résultats

2.2.1 Erreur constante (EC)

L'analyse statistique a montré un effet significatif de la condition sensorielle ($F(2,22)=3.48$, $p=.049$, $\eta^2=.24$.) avec une EC significativement plus importante dans la condition tactile que dans la condition bimodale (**Figure 5.4**). La vitesse avait également un effet significatif sur l'EC ($F(2,22)=32.9$, $p<.001$, $\eta^2=.75$). Nous avons observé une EC significativement plus importante pour une vitesse faible (V1, 6 m/s) que pour une vitesse moyenne (V2, 12 m/s) ou forte (V3, 18 m/s) – **Figure 5.5**.

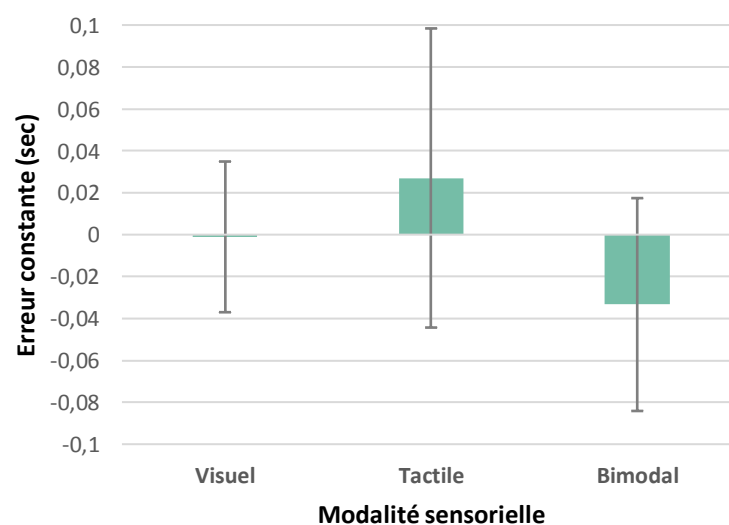


Figure 5.4 – Erreur constante en fonction de la condition sensorielle (expérience 4).

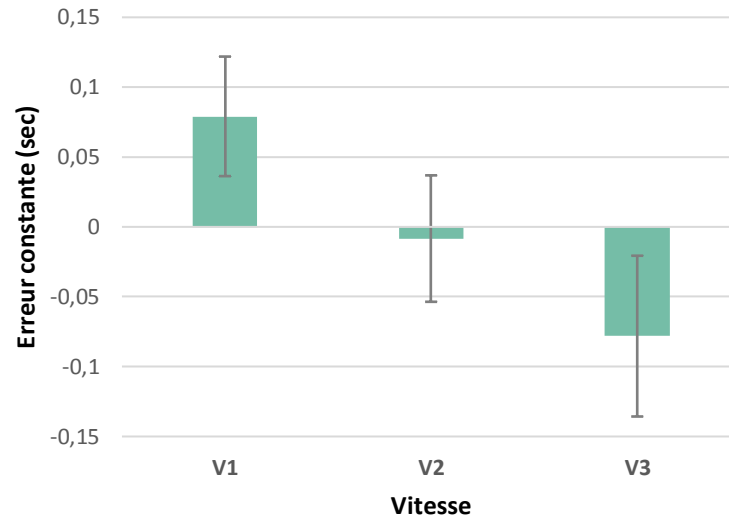


Figure 5.5 – Erreur constante en fonction de la vitesse d'approche du mobile (expérience 4).

Plusieurs effets d'interaction entre les variables ont également été observés. L'interaction entre l'occultation et la vitesse ($F(4,44)=20.9$, $p<.001$, $\eta^2=.66$) a révélé que dans la condition avec occultation, les trois conditions de vitesse étaient significativement différentes les unes des autres alors qu'en l'absence d'occultation, seules les vitesses V1 et V3 présentaient une différence significative (**Figure 5.6**).

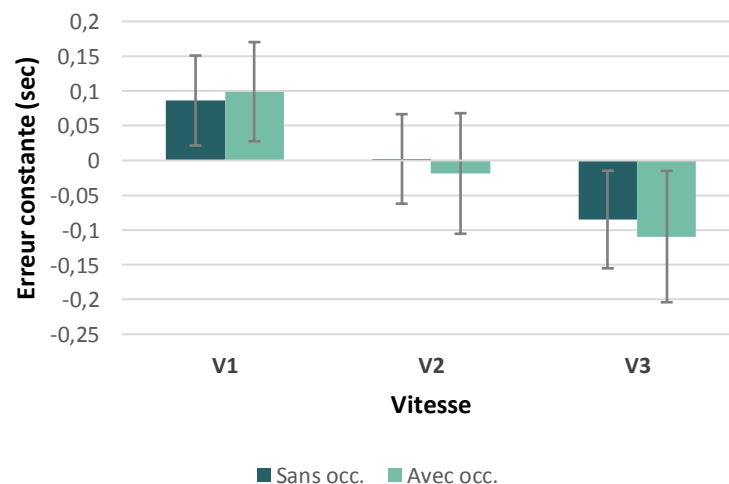


Figure 5.6 – Erreur constante en fonction de la vitesse et de l'occultation (expérience 4). Dans la condition avec occultation, les trois conditions de vitesse étaient significativement différentes les unes des autres alors qu'en l'absence d'occultation, seules les vitesses V1 et V3 présentaient une différence significative.

De plus, nous avons observé un effet d'interaction entre la condition sensorielle et la vitesse ($F(4,44)=20.9$, $p<.001$, $\eta^2=.66$). Selon l'analyse post-hoc, l'effet de la vitesse n'était présent que dans la modalité tactile. En effet, dans cette modalité, l'EC était significativement différente entre les trois conditions de vitesse, alors que dans les conditions visuelle et bimodale aucune différence entre les trois vitesses n'a été observée (**Figure 5.7**).

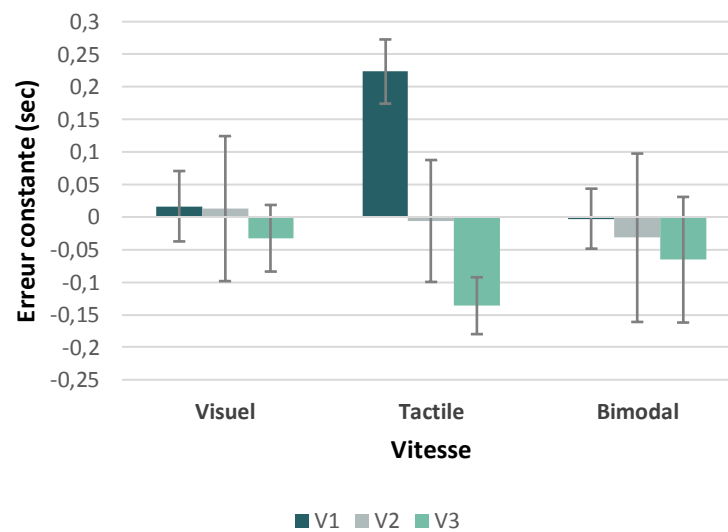


Figure 5.7 – Erreur constante en fonction de la condition sensorielle et de la vitesse (expérience 4). L'effet de la vitesse n'était présent que dans la modalité tactile.

Enfin, les résultats ont montré un effet d'interaction entre la condition sensorielle, l'occultation et la vitesse ($F(4,44)=5.59$, $p<.001$, $\eta^2=.66$). Dans les conditions visuelle et bimodale, nous avons pu observer une interaction entre la vitesse et l'occultation. Dans ces deux conditions, l'EC était significativement différente entre les deux conditions d'occultation que dans la condition V3 (**Figure 5.8**). Cet effet n'était pas présent dans la condition tactile où, quelle que soit la vitesse, les performances ne différaient pas statistiquement entre les deux conditions d'occultation.

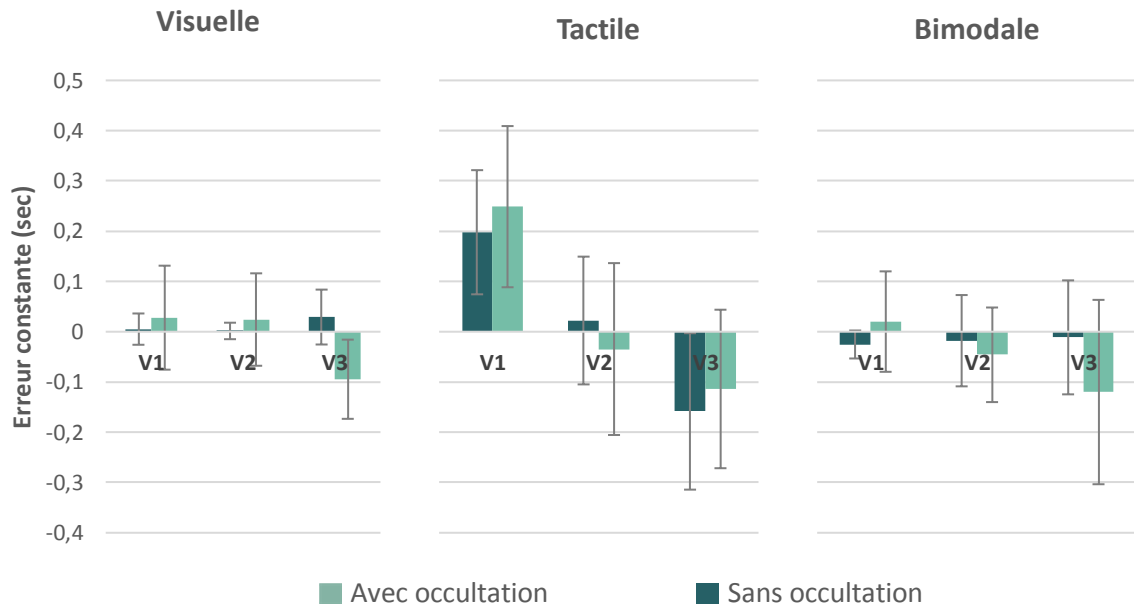


Figure 5.8 – Erreur constante en fonction de la vitesse et de l'occultation dans chacune des conditions sensorielles (expérience 4). Dans les conditions visuelle et bimodale, nous avons pu observer une interaction entre la vitesse et l'occultation.

2.2.2 Erreur absolue (EA)

La condition sensorielle avait un effet significatif sur l'EA ($F(2,22)=58.4, p<.001, \eta^2=.66$) qui était plus importante lorsque les informations étaient présentées via la modalité tactile (**Figure 5.9**). Les performances étaient également significativement plus faibles en l'absence d'occultation ($97,6\pm 13,3$ ms) qu'en présence d'une occultation ($189,1\pm 40,1$ ms) – $F(1,11)=64.3, p<.001, \eta^2=.66$. L'effet significatif de la vitesse ($F(2,22)=58.4, p<.001, \eta^2=.66$) a montré que l'erreur absolue était moins importante dans la condition V2 par rapport aux deux autres (**Figure 5.10**).

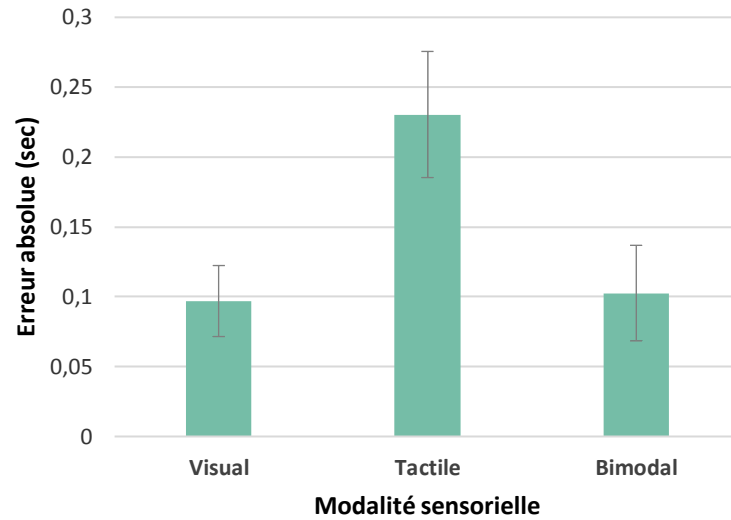


Figure 5.9 – Erreur absolue en fonction de la condition sensorielle (expérience 4).

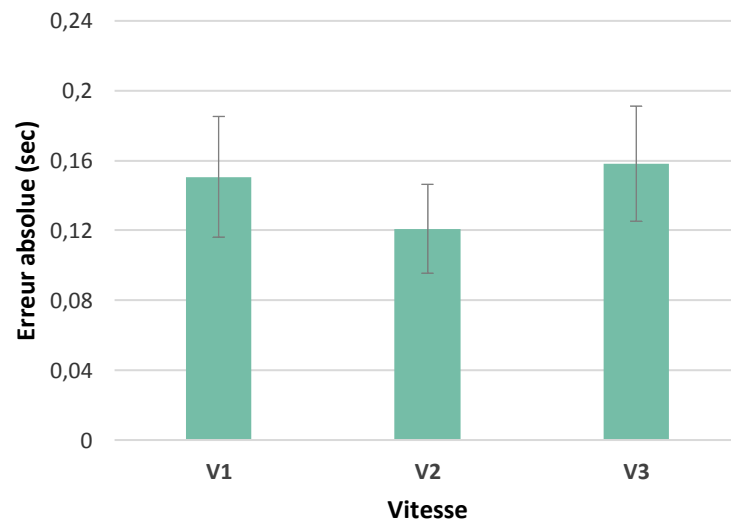


Figure 5.10 – Erreur absolue en fonction de la vitesse (expérience 4).

Enfin, un effet d'interaction entre l'occultation et la condition sensorielle ($F(2,22)=6.20$, $p=.007$, $\eta^2=.66$) a été observé. L'EA était significativement plus importante en cas d'occultation, mais uniquement dans les conditions visuelle et bimodale (Figure 5.11).

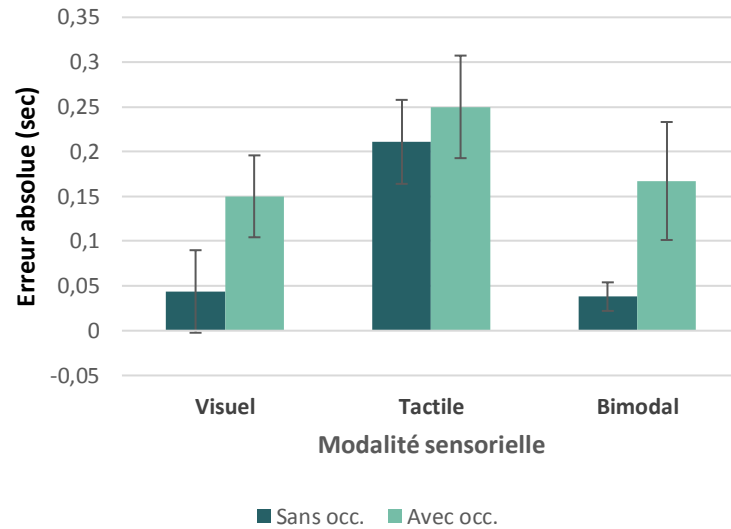


Figure 5.11 – Erreur absolue en fonction la condition sensorielle et de l'occultation (expérience 4).

2.2.3 Erreur variable (EV)

La variabilité des réponses était significativement plus importante pour la condition tactile comparativement aux deux autres ($F(2,22)=26.9$, $p<.001$, $\eta^2=.66$, **Figure 5.12**). L'occultation avait également un effet significatif sur l'EV ($F(1,11)=34.8$, $p<.001$, $\eta^2=.66$), qui était plus importante lorsque les informations étaient occultées ($189,4\pm 41,7$ ms) qu'en l'absence d'occultation ($92,4\pm 31,9$ ms).

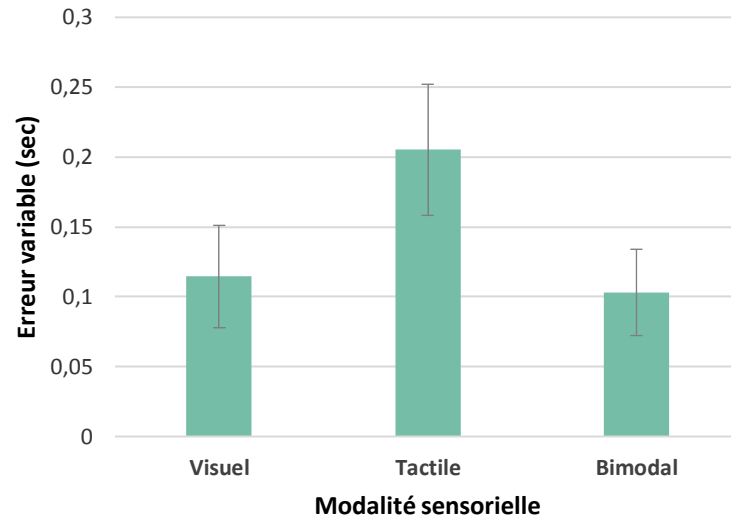


Figure 5.12 – Erreur variable en fonction de la condition sensorielle (expérience 4).

L'analyse des résultats a également permis d'observer une interaction entre les facteurs occultation et vitesse ($F(2,22)=9.05$, $p=.001$, $\eta^2=.66$). En cas d'occultation, l'EV était identique entre les trois vitesses alors qu'en l'absence d'occultation celle-ci était significativement plus importante pour la condition V3 que pour les conditions V1 et V2. Par ailleurs, l'EV était significativement plus importante en cas d'occultation dans chacune des conditions de vitesse (Figure 5.13).

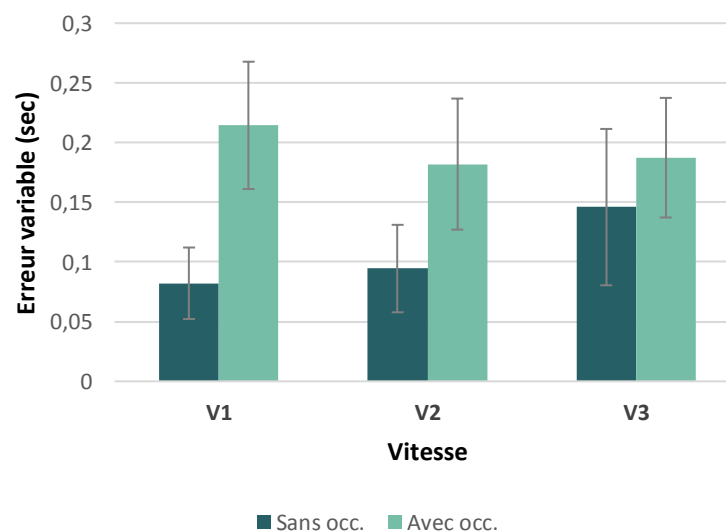


Figure 5.13 – Erreur variable en fonction de la vitesse et de l'occultation (expérience 4).

2.3 Discussion

Cette quatrième expérience visait d'une part à comparer les modalités visuelles et tactiles en termes de précision du jugement TTC, et d'autre part, à déterminer si la combinaison de ces deux entrées sensorielles permettait d'améliorer les performances par rapport aux conditions unimodales (visuelle et tactile). On peut noter en premier lieu, à la fois en termes d'erreur constante et d'erreur absolue, que les jugements de TTC étaient significativement moins précis avec la modalité tactile. Comme dans l'étude précédente (expériences 1, 2 et 3), les jugements basés sur des informations tactiles seules conduisent à une surestimation, alors que dans les conditions visuelle et bimodale la tendance est plutôt une sous-estimation du TTC. Dans ces deux conditions, l'erreur constante est relativement proche de 0. Pour la modalité visuelle, cette valeur correspond à ce que l'on observe généralement avec ce type de trajectoire et pour une occultation d'une seconde (e.g. Yakimoff et al., 1993). L'amplitude (EA) et la variabilité (EV) des erreurs dans la modalité tactile est également plus importante que dans les deux autres conditions (visuelle et bimodale). Les erreurs (EA, EC et EV) plus importantes observées dans la modalité tactile pourraient s'expliquer par le fait que les participants sont peu habitués à utiliser cette modalité pour effectuer des jugements de TTC, au contraire de la modalité visuelle. En plus de posséder une très bonne acuité, la modalité visuelle est, depuis la naissance, utilisée pour le traitement de ce type d'informations. Même si cette démarche est très peu évoquée dans le domaine des interfaces vibrotactiles, l'utilisation des stimuli vibrotactiles, notamment pour accéder à des informations aussi précises, pourraient nécessiter une phase d'apprentissage plus conséquente. Des analyses ont été réalisées afin de comparer les performances au début et à la fin de chaque bloc, sans que celles-ci ne mettent en évidence de différence significative. Cependant, dans les premiers travaux sur le TVSS (Bach-y-Rita, 1979), certaines tâches pouvaient nécessiter un apprentissage d'une quarantaine d'heures avant de pouvoir être réalisées. Même sur le plan visuel, les processus impliqués dans l'estimation du TTC se développent

tout au long de l'enfance pour devenir de plus en plus précis (Benguigui et al., 2004).

Les performances de jugement de TTC avec la modalité tactile se distinguent de celles observées dans les conditions visuelle et bimodale selon plusieurs points. D'une part, pour cette modalité sensorielle, l'occultation ne semble pas avoir d'effet sur les performances (**Figure 5.11**). Une première explication pourrait reposer sur le fait que les stimuli vibrotactiles sont, ici, partiellement « occultés ». En effet, avec 11 niveaux d'information, le dispositif ne transmet que 11 positions successives du mobile entre sa position initiale et le contact. Les participants n'ont donc aucune information sur la position du mobile entre deux niveaux d'information. D'autre part, l'effet d'interaction entre la vitesse et la modalité sensorielle (**Figure 5.7**), ainsi que la triple interaction entre la vitesse, la modalité sensorielle et l'occultation (**Figure 5.8**) montrent que seules les performances dans la modalité tactile sont également affectées par le facteur vitesse. On observe généralement dans les tâches de jugement de TTC visuel, que les performances des jeunes enfants sont affectées par la vitesse du mobile, contrairement à celle des adultes (Benguigui, Broderick, Baurès, & Amorim, 2008). Cette similarité entre les performances obtenues avec la modalité tactile et celles obtenues avec la modalité visuelle chez les jeunes enfants laisse à nouveau penser que la précision du jugement à partir d'informations tactiles pourrait être considérablement améliorée avec l'expérience. L'utilisation précise des informations sur le TTC nécessite le développement de processus perceptivo-moteurs qui s'acquiert au cours du développement, nos résultats pourraient donc s'expliquer par le manque d'expérience perceptive dans la modalité tactile pour accéder à ce type d'information.

Nos résultats apparaissent différents de ceux de Cancar et al. (2013) qui, dans une tâche de jugement de TTC similaire, n'avaient trouvé aucune différence entre les modalités tactile et visuelle. Plusieurs raisons peuvent expliquer ces dissemblances. En premier lieu, les analyses opérées dans l'étude de Cancar et al. (2013) qui reposaient essentiellement sur des taux de corrélation entre le TTC estimé et le TTC réel et les erreurs absolues mesurées, n'ont fait pas fait l'objet

d'une analyse de variance. Par ailleurs, si Cancar et al. (2013) n'ont observé aucune différence entre les modalités visuelle et tactile, c'est probablement en raison de la résolution du dispositif visuel utilisé dans cette étude. Dans une étude de van Erp et Verschoor (2004), les participants devaient réaliser une tâche de poursuite avec une cible et un curseur présentés via la modalité tactile (plusieurs vibrateurs placés horizontalement au niveau de l'abdomen) ou visuelle (une demi-sphère projetée virtuellement au sol, devant le participant). Lorsque les deux sont présentés visuellement, le RMS de l'erreur absolue est d'environ 9° , alors qu'il varie de 19 à 31° lorsque la cible et/ou le curseur sont présentés via la modalité tactile. Si la résolution du dispositif visuel est réduite à celle du dispositif tactile (en affichant autant de positions que le dispositif tactile compte de vibrateurs), le RMS est alors significativement plus élevé (14°) qu'avec une résolution normale, mais reste largement inférieur à ce que l'on observe dans la modalité tactile. La résolution du dispositif pourrait donc expliquer, pour une part, nos résultats dans ces deux modalités sensorielles.

Enfin, cette deuxième étude visait également à déterminer dans quelle mesure la combinaison d'informations visuelle et tactile pouvait améliorer la précision du jugement de TTC. Sur cette question, l'expérience n°4 a montré que les performances de jugement de TTC étaient similaires dans les conditions visuelles et bimodales, et ce, contrairement à nos hypothèses. Dans cette expérience, les deux modalités étaient utilisées simultanément et fournissaient des informations redondantes sur la trajectoire du mobile (tout au long de l'approche ou jusqu'au moment d'occultation). Les résultats similaires observés dans les modalités visuelle et bimodale suggèrent que les informations tactiles ne sont pas ou peu exploitées en condition bimodale. Lorsque les deux modalités renvoient des informations identiques, la modalité visuelle, plus précise dans ce type de jugement, constitue alors la principale source d'information. La modalité tactile pourrait toutefois être envisagée pour suppléer la vision lors des périodes d'occultation. Or, dans cette expérience, les informations tactiles étaient occultées en même temps que les informations visuelles. Les participants n'avaient donc aucune information concernant la fin du mouvement du mobile. Une seconde expérience a donc été réalisée afin de préciser si des informations tactiles,

transmises durant l'occultation visuelle, permettent d'améliorer la précision du jugement.

3 Expérience 5 : utilisation des informations tactiles pour suppléer la vision durant une occultation

L'objectif de cette expérience était de déterminer si les performances de jugement de TTC avec des informations visuelles occultées pouvaient être améliorées par l'ajout d'informations tactiles durant la phase d'occultation. En effet, les dispositifs tactiles sont envisagés pour transmettre des informations lorsque la vision est occultée. Ainsi, deux façons d'utiliser la modalité tactile ont été comparées, afin de préciser comment celle-ci doit être combinée à la vision lorsqu'elle est momentanément occultée. La première consistait à transmettre les informations tactiles tout au long de l'approche, alors que les informations visuelles étaient occultées une seconde avant le contact. La seconde consistait à transmettre les informations tactiles uniquement durant la phase d'occultation visuelle. Notre principale hypothèse était que l'ajout d'informations vibrotactiles sur la position du mobile durant la période d'occultation devrait permettre d'améliorer la précision du jugement de TTC. L'expérience 5 suivait le même protocole expérimental que la précédente, à l'exception des éléments présentés ci-après.

3.1 Méthode expérimentale

3.1.1 Participants

Cette seconde étude a été réalisée auprès de 12 participants (4 femmes et 8 hommes) âgés d'en moyenne $25,1 \pm 3,4$ ans. Aucun des participants ne présentait de troubles sensoriels particuliers et tous avaient été avertis des conditions de passation de l'expérimentation à travers un formulaire de consentement.

3.1.2 Caractéristiques cinématiques de la tâche

Dans cette expérience, seules les vitesses V2 (12 m/s) et V3 (18 m/s) ont été conservées afin de s'affranchir de l'effet de la vitesse sur la précision du TTC (cf. résultats des expériences 2). Pour des raisons identiques à celles mentionnées précédemment, des essais supplémentaires ont été intégrés dans chaque bloc.

3.1.3 Procédure

Les tâches de jugements de TTC étaient ici présentées dans quatre conditions expérimentales. Deux conditions visuelles, identiques à l'expérience 4, avec une vision complète (VC) ou occultée (VO) et deux conditions bimodales dans lesquelles les informations visuelles étaient occultées (**Figure 5.14**). Dans la première condition bimodale, les informations tactiles étaient transmises tout au long de l'essai, du départ du mobile jusqu'au contact (i.e. informations tactiles complètes, ITC). Dans la seconde, les informations tactiles n'étaient transmises que lorsque le mobile était occulté (i.e. informations tactiles durant l'occultation, ITO). Chaque bloc présentait de manière aléatoire 28 essais (10 essais par vitesse et les 8 essais supplémentaires). L'ordre de passation des blocs expérimentaux était contrebalancé, cependant les deux blocs d'une même modalité (bimodale ou visuelle) étaient toujours présentés successivement.

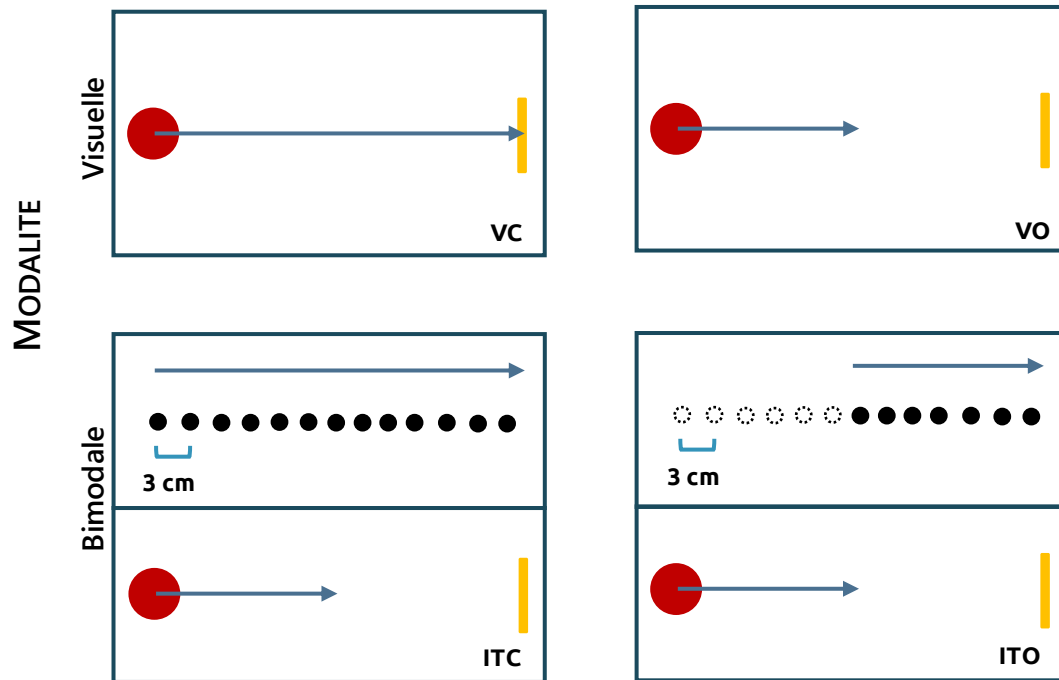


Figure 5.14 – Illustration des quatre conditions expérimentales. Dans la condition visuelle sans occultation (VC), la trajectoire complète du mobile est présentée visuellement. Dans la condition vision occultée (VO), la trajectoire est présentée visuellement et occultée 1 sec avant le contact. Dans les deux conditions bimodales, la trajectoire du mobile est également présentée visuellement avec une occultation de 1 sec. L'approche était également présentée via la modalité tactile, tout au long de la trajectoire du mobile (ITC) ou uniquement durant l'occultation visuelle (ITO).

3.1.4 Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont reposé sur des ANOVA suivant le plan expérimental : modalité de présentation (VC – VO – ITC – ITO) * vitesse (V1 – V2). Nos résultats ont été analysés au regard des variables dépendantes classiquement utilisées dans les tâches de jugement d'arrivée et utilisées lors de la première étude (p. 118).

3.2 Résultats

3.2.1 Erreur constante (EC)

L'analyse a montré un effet significatif de la modalité de présentation sur l'EC ($F(3,24)=3.42$, $p<.05$, $\eta^2=.30$). Les performances étaient significativement plus faibles dans la condition VO que dans les conditions VC, ITO et ITC (**Figure 5.15**). Nous avons également observé un effet d'interaction entre la modalité et la vitesse ($F(3,24)=3.71$, $p<.05$, $\eta^2=.32$, **Figure 5.16**). L'analyse post-hoc a montré que la vitesse n'avait d'effet significatif sur l'EC que dans la condition bimodale avec les informations tactiles transmises de manière continue (ITC).

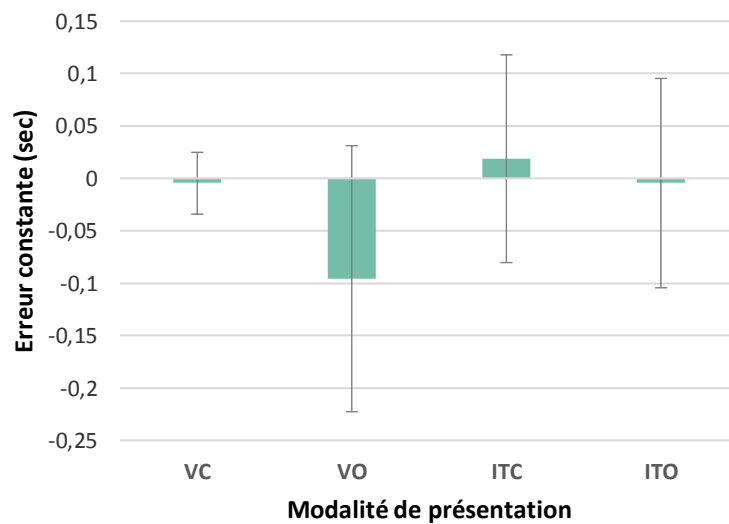


Figure 5.15 – Erreur constante moyenne en fonction de la modalité de présentation (expérience 5).

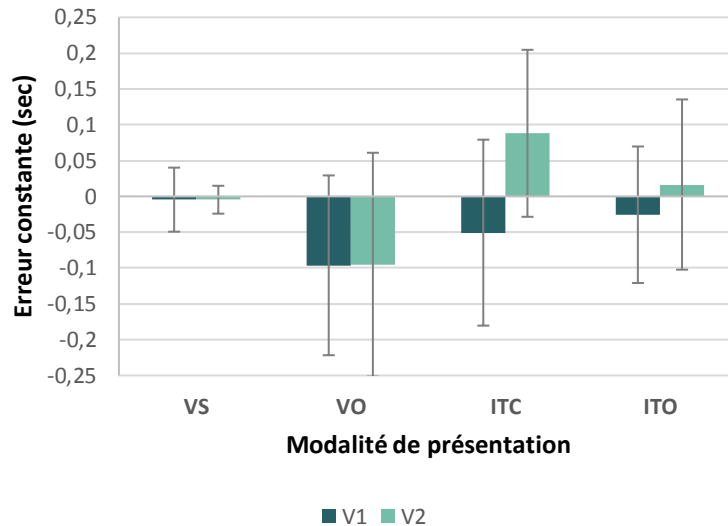


Figure 5.16 – Erreur constante en fonction de la vitesse pour chaque modalité de présentation (expérience 5). La vitesse n'avait d'effet significatif sur l'EC que dans la condition bimodale avec les informations tactiles transmises de manière continue (ITC).

3.2.2 Erreur absolue

L'analyse des données au regard de l'EA a montré un effet significatif de la modalité de présentation ($F(3,24)=18.12$, $p<.05$, $\eta^2=.69$). L'analyse post-hoc a permis de constater que les performances étaient meilleures dans la condition où les informations visuelles n'étaient pas occultées (VC) comparativement aux trois autres conditions (**Figure 5.17**). De plus, l'ajout d'informations tactiles, uniquement après l'occultation (ITO) permettait d'améliorer significativement les performances par rapport à la condition sans informations tactiles (VO).

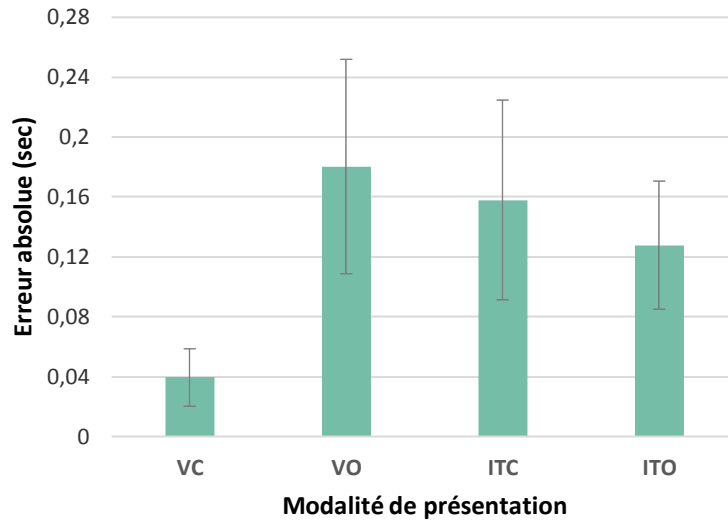


Figure 5.17 – Erreur absolue moyenne dans les quatre modalités de présentation (expérience 5).

3.2.3 Erreur variable

Les réponses des participants présentaient une variabilité significativement différente en fonction de la modalité de présentation ($F(3,24)=24.50$, $p<.05$, $\eta^2=.75$, **Figure 5.18**). L'EV était plus faible dans la condition VC ($29,1\pm 10,2$ ms) que dans les trois autres. De plus, l'erreur variable était plus faible dans la condition ITO ($90,5\pm 28,5$ ms) que dans les conditions VO ($126,7\pm 31,5$ ms) et ITC ($121,3\pm 57,1$ ms).

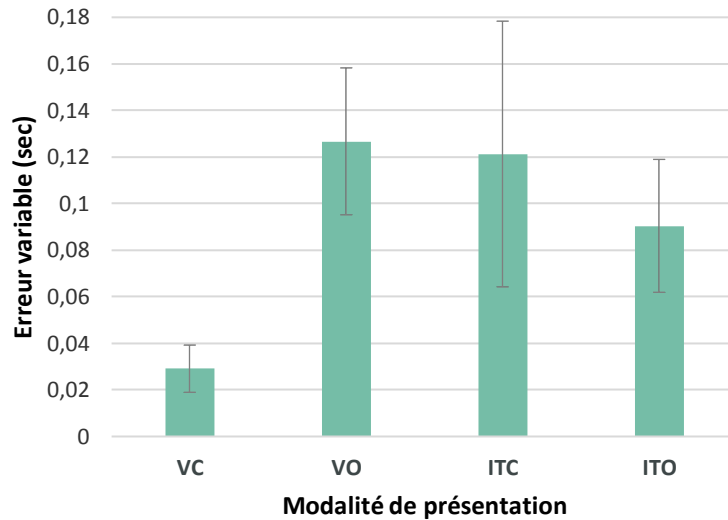


Figure 5.18 – Erreur variable en fonction de la modalité de présentation (expérience 5).

3.3 Discussion

Pour cette expérience, nous avons émis l'hypothèse que l'ajout d'informations tactiles lorsque la modalité visuelle n'est pas disponible (car occultée) permettait d'améliorer le jugement de TTC. Nos résultats confirment cette hypothèse et montrent que transmettre des informations tactiles, uniquement lors de l'occultation des informations visuelles (ITO), réduit significativement l'erreur constante, l'erreur absolue et l'erreur variable (**Figure 5.17**, **Figure 5.15** et **Figure 5.18**), par rapport aux performances observées sans l'utilisation du dispositif tactile (VO). En revanche, transmettre les informations tactiles tout au long de la trajectoire du mobile n'influence que l'erreur constante. L'ajout d'informations tactiles ne permet donc pas systématiquement une amélioration des performances. Dans cette condition (ITC), la modalité tactile donnait accès à des informations sur l'ensemble de la trajectoire du mobile, contrairement aux informations visuelles qui, étant occultées, ne fournissaient qu'une information partielle sur le mouvement du mobile. La modalité tactile pourrait dans ce cas être la source d'information dominante et être ainsi privilégiée à la modalité visuelle pour estimer le TTC. En effet, on peut observer que l'effet de la vitesse sur l'erreur

constante n'est présent que dans cette condition (**Figure 5.16**). Or, dans les expériences 1, 2 et 4, rappelons que l'effet de la vitesse sur l'erreur constante n'a été observé que lorsque les participants estiment le TTC à partir d'informations tactiles seules. Ainsi, si les informations tactiles sont privilégiées dans la condition ITC, cela expliquerait l'absence d'amélioration significative par rapport à la condition VO (contrairement à la condition ITO) puisque le jugement de TTC est moins précis dans cette modalité.

Plusieurs recherches ont montré des liens intermodaux entre les modalités tactile et visuelle, notamment au niveau de l'attention spatiale (Gray & Tan, 2002; Tan et al., 2001) et de la perception de la vitesse de mouvement (Amemiya et al., 2013). Nos résultats montrent quant à eux que pour l'estimation de TTC, l'une ou l'autre de ces modalités sensorielles est privilégiée par rapport à la seconde, qui n'est pas ou peu utilisée. Lorsque les deux modalités fournissent des informations équivalentes (même portion de trajectoire), la modalité visuelle, plus précise, est principalement utilisée (expérience 4). En revanche, si la modalité tactile fournit des informations plus complètes sur la trajectoire du mobile, celle-ci semble être privilégiée (expérience 5).

Les deux expériences de ce chapitre ont ainsi permis de mieux comprendre les processus impliqués dans l'accès aux informations de TTC à partir de différentes modalités sensorielles. Si les informations tactiles semblent ne pas être exploitées lorsque la vision transmet des informations similaires, cette modalité sensorielle (i.e. tactile) offre la possibilité d'améliorer la précision du jugement de TTC lorsqu'elle transmet des informations non disponibles visuellement. Le troisième et dernier chapitre de ce travail de recherche, s'appuyant sur des tâches de régulation d'approche, visait à confirmer la possibilité d'améliorer, grâce à un dispositif vibrotactile, l'accès aux informations d'approche en situation de vision dégradée.

Chapitre 6

Informations tactiles pour la régulation d'une
approche lors d'un atterrissage simulé en hélicoptère

1 Introduction

Dans la première partie de ce travail doctoral, nous avons démontré que si la précision du jugement de TTC à partir d'informations vibrotactiles était moindre, ces dernières pouvaient améliorer la précision du jugement lorsque la vision est ponctuellement occultée. Le jugement de TTC est une tâche d'estimation discrète intéressante pour comprendre les sources d'information utilisées mais qui ne correspond pas à des tâches de navigation à proprement parler et nécessitant la régulation d'une approche. Dans ces cinq premières expérimentations, nous avons utilisé des stimulations tactiles correspondant à des informations spatiotemporelles sur la position du mobile. L'objectif de cette seconde partie est de déterminer si ce principe de codage peut être utilisé pour améliorer la régulation d'une approche au sol lorsque la vision est dégradée. Dans le domaine du pilotage, de nombreuses études utilisent des dispositifs transmettant des informations d'orientation spatiale ou sur l'attitude de l'appareil (Albery, 2012 ; Oskarsson et al., 2013). Seules quelques études se sont intéressées aux informations vibrotactiles concernant l'altitude (Cheung & Bouak, 2009; Jansen, Wennemers, Vos, & Groen, 2008; van Erp, Veltman, & van Veen, 2003). Ces études se sont appuyées sur des principes de codage différents et aucune n'a permis de préciser les paramètres de la stimulation qui peuvent influencer l'accès aux informations d'approche, et ainsi de définir la façon la plus efficace de coder ce type d'information sous forme tactile. A travers deux expériences, nous avons étudié l'influence de certains paramètres de la stimulation sur la régulation d'une approche lors d'un atterrissage simulé en hélicoptère, le sens de la stimulation dans un premier temps (expérience 6), puis la variable informationnelle transmise au niveau tactile (expérience 7).

2 Expérience 6 : régulation d'un atterrissage simulé en hélicoptère à partir d'informations tactiles variant selon différents sens de stimulation

Dans des situations de conduite automobile, plusieurs études récentes (Gray et al., 2014; Meng, Gray, et al., 2015; Meng, Ho, et al., 2015) ont suggéré que le sens de la stimulation pouvait être un facteur déterminant pour transmettre des informations d'approche. Dans ces études, les informations tactiles étaient fournies par l'activation successive de trois vibrateurs placés un niveau du poignet, de l'abdomen, et du torse. Les patrons décrivant un mouvement vers le torse (i.e. activation successive du poignet, de l'abdomen et du torse) réduisaient significativement le temps de réaction du freinage, lorsque le délai entre les stimulations était lié à la vitesse d'approche. L'efficacité de ces patrons de stimulations pourrait s'expliquer par le fait que la zone stimulée se rapproche de plus en plus du torse et décrit donc un mouvement vers le participant. Ainsi, la transmission d'informations d'approche par un patron spatiotemporel serait facilitée lorsque la stimulation décrit elle-même un mouvement d'approche vers le participant. Une seconde hypothèse serait que la prise d'information serait facilitée lorsque le mouvement de la stimulation tactile est couplé au flux d'information visuelle. En effet, dans les études de Gray et ses collaborateurs, le sens d'activation des vibrateurs correspondait également au sens du flux optique généré par le mouvement vers l'avant.

Dans cette première expérience, nous avons cherché à déterminer si des informations vibrotactiles pouvaient améliorer la régulation d'une approche au sol dans une tâche simulée d'atterrissage en hélicoptère. Cette dernière visait principalement à étudier l'effet de la direction du flux vibrotactile sur les performances de régulation. Nous attendions ainsi une réduction significative de la vitesse d'impact au sol avec l'utilisation du dispositif, par rapport à une condition sans informations tactiles. Nous faisons, par ailleurs, l'hypothèse que cette amélioration serait plus importante lorsque le sens du flux vibrotactile coïncidait avec celui du flux visuel.

2.1 Méthode expérimentale

2.1.1 Participants

L'étude fut réalisée avec une population de 12 participants (8 hommes et 4 femmes), âgés en moyenne de 25,4 ans ($\pm 2,6$). Trois des participants avaient déjà participé à une expérience impliquant l'utilisation d'un dispositif tactile. Aucun des participants ne présentait de troubles sensoriels particuliers et tous avaient été avertis des conditions de passation de l'expérimentation à travers un formulaire de consentement.

2.1.2 Caractéristiques générales de la tâche

Les participants évoluaient en vue subjective dans un environnement virtuel affiché à l'écran et démarraient l'essai à une altitude variable au-dessus du sol (30, 45 ou 60 m). L'objectif de la tâche était de réaliser un atterrissage au sol, dans des conditions similaires au pilotage d'hélicoptère, en ayant une vitesse verticale au moment du contact aussi faible que possible afin de minimiser l'intensité du contact. Les participants recevaient un feedback sur la vitesse de contact à la fin de chaque essai. La durée de chaque essai était limitée à 25 secondes et les participants étaient avertis verbalement par l'expérimentateur lorsqu'un essai dépassait cette limite de temps.

2.1.3 Matériel

Cette étude expérimentale a été réalisée à l'aide de la seconde application du dispositif expérimental développé dans le cadre de ces travaux de recherche et permettant de simuler des approches similaires à celles rencontrées dans le pilotage d'hélicoptère. Le dispositif tactile utilisé était la version développée au sein du laboratoire CesamS et configuré sous la forme d'une ligne de 8 vibrateurs (**Figure 6.1**). Le dispositif tactile était utilisé, dans certaines conditions

expérimentales, afin de transmettre aux participants des stimulations spécifiant leur altitude par rapport au sol. Le principe de codage utilisé était identique à celui de la deuxième étude (pour les approches tangentielles), à savoir un patron spatiotemporel où chaque vibreur s'active en fonction de la position par rapport au sol (durée de vibration de 120 ms).

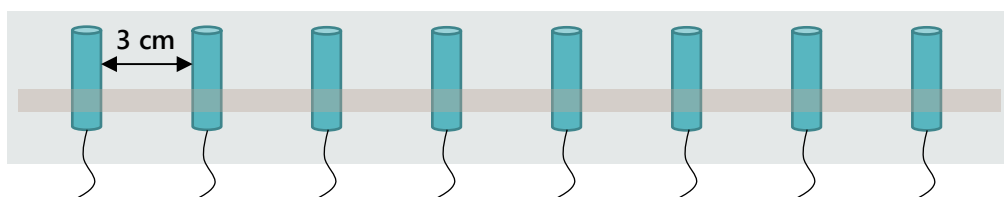


Figure 6.1. Configuration du dispositif tactile lors de l'expérience 6.

Pour la présente étude, deux types d'environnements virtuels ont été créés (Figure 6.2). Un premier environnement, correspondant à une vision normale, simulait un atterrissage de jour sur un sol de type « gazon ». Le second environnement était identique mais en condition « de nuit ». Dans cette configuration, le fond était uni à haute altitude (Figure 6.2, gauche) et à mesure que les participants se rapprochaient du sol, apparaissaient quelques éléments de textures (Figure 6.2, droite) qui constituent une des sources d'information visuelle pour réguler l'altitude. Quel que soit le type d'environnement, aucun autre élément n'était présent au sol.

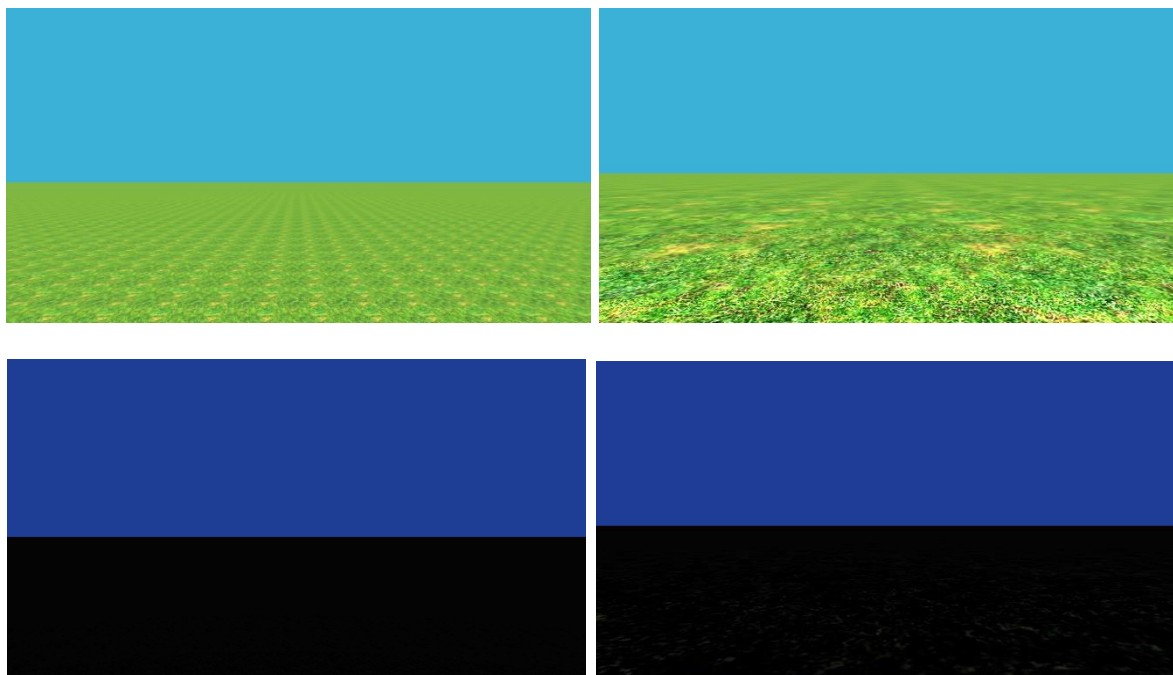


Figure 6.2 – Environnements virtuels simulés pour la vision normale (haut) et dégradée (bas), à environ 40 m (gauche) et 5 m (droite) du sol.

Les participants ne pouvaient se déplacer dans l'environnement que sur l'axe vertical, en utilisant un joystick contrôlant l'accélération (verticale) de l'engin virtuel (p. 103). Dans sa position intermédiaire, dans laquelle était placé le joystick au début de chaque essai, l'engin fournissait une accélération de valeur égale mais opposée à la gravité, permettant à l'engin de maintenir son altitude. Déplacer le joystick vers le haut entraînait une accélération supérieure à la gravité, augmentant ainsi l'altitude. Un déplacement du joystick vers le bas réduisait l'accélération verticale, permettant alors de réduire l'altitude.

2.1.4 Procédure

Le protocole expérimental de cette étude était divisé en deux phases. Une première phase, réalisée au début de l'expérimentation, consistait à réaliser l'atterrissage sans l'aide du dispositif tactile et avec des informations visuelles normales (environnement de type « jour ») ou dégradées (environnement de type « nuit »). Dans une deuxième phase, les participants réalisaient la tâche avec l'aide d'informations vibrotactiles dans six conditions différentes. En effet, outre

les deux conditions sensorielles (tactile – bimodal), trois sens de stimulation ont été testés :

- Horizontal
- Vertical vers le haut (vertical-haut)
- Vertical vers le bas (vertical-bas)

Afin de proposer ces trois sens de stimulation, différentes localisations ont été exploitées (**Figure 6.3**). Pour le sens de vibration horizontal, la ligne de vibrateurs était disposée horizontalement au niveau de l'abdomen et s'activait du flanc droit⁴ vers le dernier vibrateur situé au-dessus du nombril. Pour les deux sens de vibration verticaux, le dispositif était placé verticalement au niveau du dos, à environ 3 cm de la colonne vertébrale.

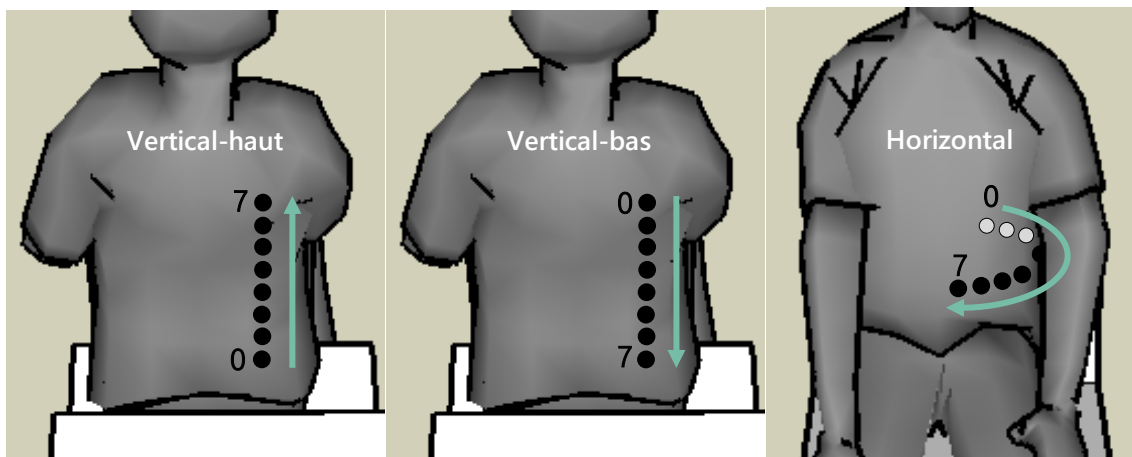


Figure 6.3 – Localisation et sens de vibration des patrons tactiles. Le niveau 7 correspond à l'altitude maximale (activation au lancement de l'essai) et le niveau 0 au sol (activation au moment du contact).

Les participants étaient équipés du dispositif tactile et du casque avant le démarrage de l'expérimentation. Ils réalisaient ensuite successivement les deux phases du protocole expérimental (**Figure 6.4**).

⁴ Localisation approximative en raison de différences morphologiques.

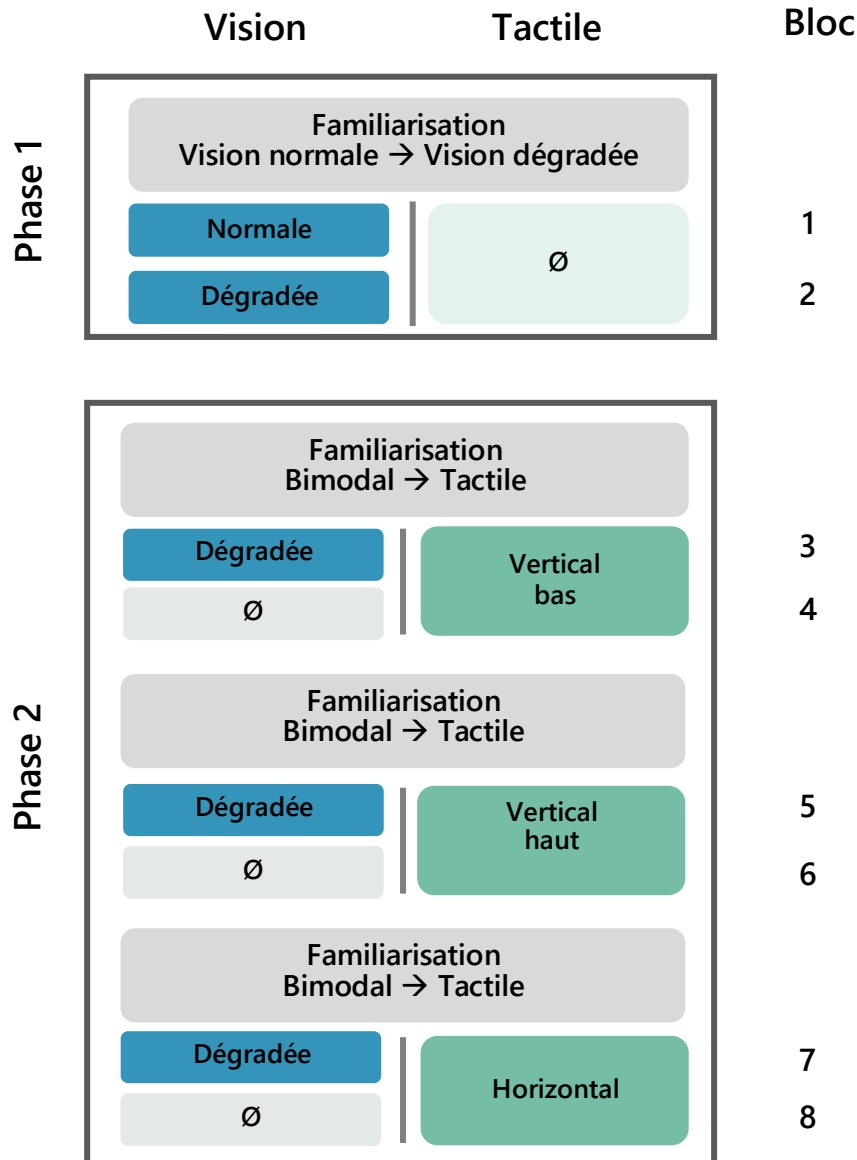


Figure 6.4 – Organisation des deux parties du protocole expérimental.

Phase 1. Les participants démarraient cette première phase de l'expérimentation par une phase de familiarisation dans laquelle ils pouvaient explorer le contrôle de l'altitude dans l'environnement virtuel. Ils réalisaient ainsi 6 essais de la condition « vision normale » suivis de 6 essais de la condition « vision dégradée ». A la suite de cette phase de familiarisation, l'expérimentation comprenait la passation de deux blocs de 15 essais (5 essais pour chaque altitude initiale). L'ordre de passation des blocs « vision normale » (1) et « vision dégradée » (2) était contrebalancé entre les différents participants.

Phase 2. Après une brève pause, la suite de l'expérimentation comprenait la passation des six conditions de la deuxième phase expérimentale (bimodal et tactile), passées dans des blocs expérimentaux distincts. L'ordre de passation des trois sens de stimulation (horizontal, vertical-haut et vertical-bas) était contrebalancé entre tous les participants tout en passant systématiquement le bloc « bimodal » en premier. Avant chacun de ces blocs « bimodaux », les participants se familiarisaient avec le dispositif (et les stimulations tactiles induites par les changements d'altitude) lors de 5 essais en condition « bimodale » suivis de 5 essais en condition « tactile ». Entre chaque groupe de blocs (3-4, 5-6, 7-8), les participants bénéficiaient d'un temps de pause, permettant notamment de changer la disposition du dispositif tactile.

Les essais étaient lancés par l'expérimentateur une fois que le joystick ait été placé dans sa position intermédiaire par le participant. Ensuite, un décompte de trois secondes était présenté à l'écran afin de préparer le participants au lancement de l'essai.

2.1.5 Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont reposé dans un premier temps sur des ANOVA à mesures répétées, réalisées de façon distincte pour les deux parties de l'étude. La première partie fut analysée selon le plan expérimental suivant : *type d'information visuelle* (normale – dégradée) * *altitude initiale* (30 – 45 – 60 m). La seconde partie fut quant à elle analysée selon le plan expérimental suivant : *altitude initiale* (30 – 45 – 60 m) * *sens de stimulation* (vertical-haut – vertical-bas – horizontal) * *modalité sensorielle* (visuotactile – tactile). Par la suite, nous avons réalisé des comparaisons planifiées entre la condition « vision dégradée » et chacune des conditions bimodales afin de tester notre hypothèse concernant l'amélioration des performances avec des informations tactiles.

Les résultats ont été observés selon deux variables dépendantes : la vitesse d'impact au moment du contact au sol (en m/s) et la vitesse moyenne au cours d'un essai (en m/s). Des analyses complémentaires ont également été effectuées sur la cinématique des essais (accélération, variations de vitesses, etc.) mais celles-ci n'ont pas présenté de différences significatives.

2.2 Résultats

2.2.1 Vitesse d'impact au sol

Phase 1. Sur cette première phase expérimentale nous avons pu constater un effet significatif de l'altitude initiale ($F(2,22)=5.75$, $p<.001$, $\eta^2=.34$) et du type d'information visuelle ($F(1,11)=14.24$, $p<.001$, $\eta^2=.56$) sur la vitesse d'impact. Les participants étaient moins performants lorsque l'altitude initiale était de 60 mètres que lorsqu'elle était de 30 ou 45 m (**Figure 6.5**). De plus, la vitesse d'impact était significativement plus faible avec des informations visuelles de jour ($1,10 \pm 1,14$ m/s) que de nuit ($3,22 \pm 2,11$ m/s).

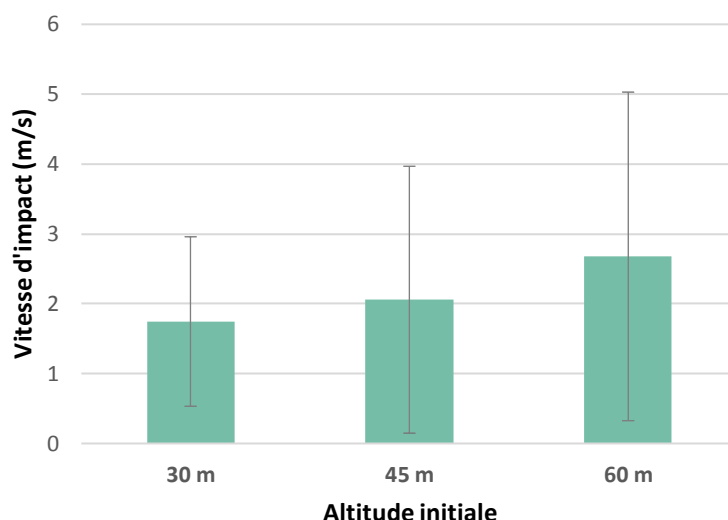


Figure 6.5 – Vitesse d'impact en fonction de l'altitude initiale (expérience 6 – phase expérimentale 1).

Phase 2. L'ANOVA révélait également que l'altitude initiale influençait significativement la vitesse d'impact ($F(2,22)=20.49$, $p<.001$, $\eta^2=.65$). L'analyse post-hoc indiquait que la vitesse d'impact était plus élevée lorsque l'essai démarrait à 60 mètres d'altitude qu'à 30 ou 45 m (**Figure 6.6**). De plus, les participants avaient une vitesse d'impact significativement plus faible dans la condition bimodale – $1,39 (\pm 1,20)$ m/s – que dans la condition tactile ($5,70 \pm 2,35$ m/s – $F(1,11)=91.86$, $p<.001$, $\eta^2=.89$). Enfin, l'ANOVA a permis de mettre en évidence un effet d'interaction ($F(2,22)=6.48$, $p<.001$, $\eta^2=.37$) entre l'altitude et la modalité sensorielle (**Figure 6.7**). Si l'on considère la modalité tactile, le test post-hoc indiquait une vitesse d'impact significativement plus élevée pour l'altitude haute (60 m) que pour les deux autres altitudes. Concernant la condition bimodale, la vitesse d'impact était significativement plus élevée pour l'altitude haute (60 m) que pour l'altitude basse (30 m).

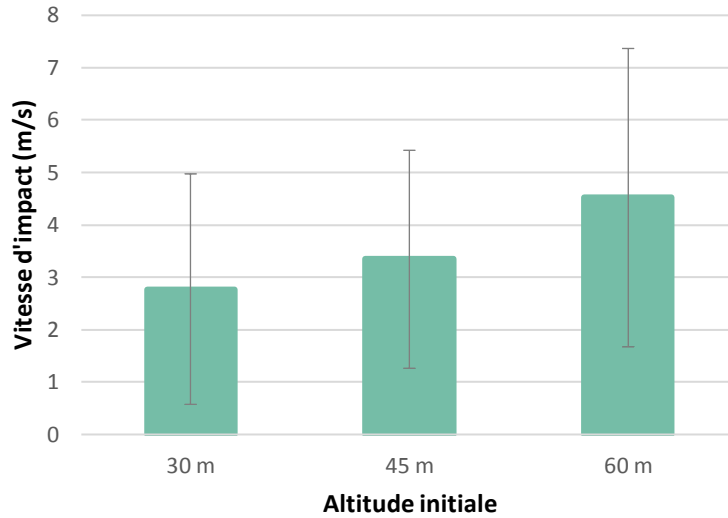


Figure 6.6. Vitesse d'impact en fonction de l'altitude initiale (expérience 6 – phase expérimentale 2).

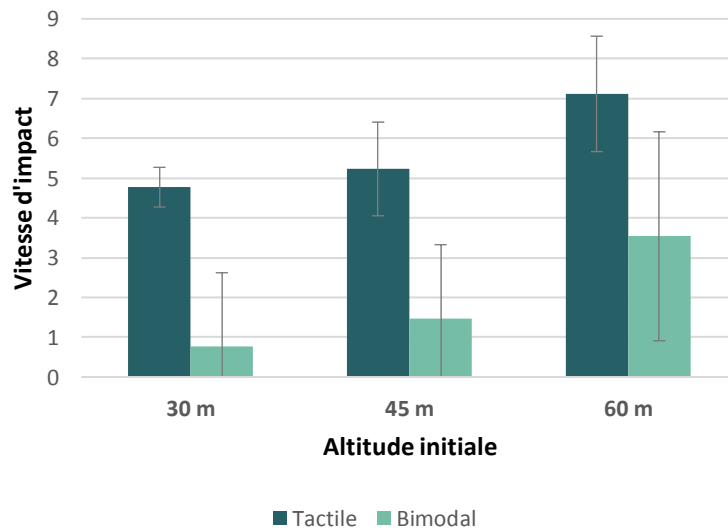


Figure 6.7 – Vitesse d'impact en fonction de l'altitude de départ et de la modalité sensorielle (expérience 6 – phase expérimentale 2). Dans la modalité tactile, la vitesse d'impact était significativement plus élevée pour l'altitude haute (60 m) que pour les deux autres altitudes. En condition bimodale, la vitesse d'impact était significativement plus élevée pour l'altitude haute (60 m) que pour l'altitude basse (30 m).

Comparaisons planifiées. Ces analyses ont mis en évidence une différence significative entre la condition « vision dégradée » et chacune des trois conditions bimodales (**Tableau 6.1**). Ainsi, lorsque la vision était dégradée, la vitesse d'impact au sol était plus faible lorsque les participants recevaient des stimulations tactiles concernant leur altitude (**Figure 6.8**).

Tableau 6.1 – Résultats des comparaisons planifiées sur la vitesse d'impact entre le bloc vision dégradée (sans tactile) et les trois conditions bimodales (expérience 6 – phase expérimentale 1 & 2)..

| Condition | F (1,11) | p |
|---------------|----------|-------|
| Vertical-haut | 12.81 | < .05 |
| Horizontal | 20.79 | < .05 |
| Vertical-bas | 21.22 | < .05 |

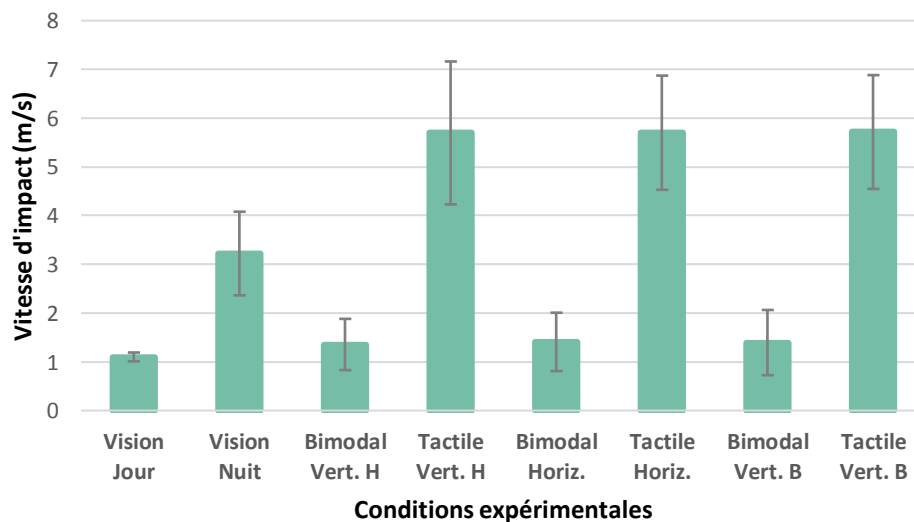


Figure 6.8 – Vitesse d'impact dans huit blocs expérimentaux (expérience 6 – phase expérimentale 1 & 2).

2.2.2 Vitesse moyenne

Phase 1. L'analyse de variance a montré que la vitesse moyenne au cours d'un essai était significativement plus importante lorsque l'altitude initiale était de 30m ($F(2,22)=21.74, p<.001, \eta^2=.66$, **Figure 6.9**). Nous avons également constaté un effet

du type d'information visuelle ($F(1,11)=12.38$, $p<.001$, $\eta^2=.53$), puisque la vitesse moyenne était significativement plus faible avec une vision de jour ($2,53 \pm 0,38$ m/s) qu'avec une vision de nuit ($3,32 \pm 0,54$ m/s).

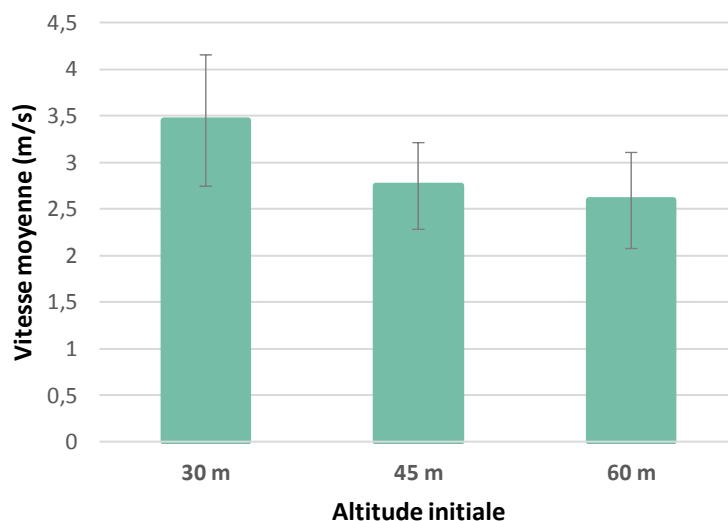


Figure 6.9 – Vitesse moyenne en fonction de l'altitude initiale (expérience 6 – phase expérimentale 1).

Phase 2. Dans la seconde partie du protocole expérimental, l'altitude avait également un effet significatif sur la vitesse moyenne ($F(2,22)=13.88$, $p<.001$, $\eta^2=.56$), les participants étant plus rapides lorsque l'altitude initiale était de 30m (**Figure 6.10**). Par ailleurs nous avons constaté une vitesse moyenne plus élevée avec des informations tactiles ($3,11 \pm 0,16$ m/s) qu'avec des informations bimodales ($2,66 \pm 0,16$ m/s – $F(1,11)=7.46$, $p<.001$, $\eta^2=.40$).

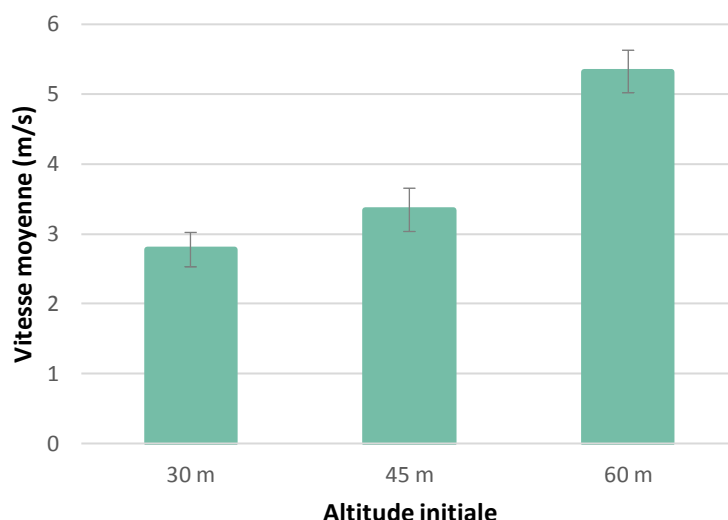


Figure 6.10 – Vitesse moyenne au cours de l’essai en fonction de l’altitude initiale (expérience 6 – phase expérimentale 2).

Comparaisons planifiées. Ces analyses ont montré une différence significative entre la condition « vision dégradée » et chacune des trois conditions bimodales (**Tableau 6.2**). Lorsque la vision était dégradée, la vitesse d’impact au sol était plus faible lorsque les participants recevaient des stimulations tactiles concernant leur altitude (**Figure 6.11**).

Tableau 6.2 – Résultats des comparaisons planifiées sur la vitesse moyenne entre le bloc vision dégradée (sans tactile) et les trois conditions bimodales (expérience 6 – phases expérimentales 1 & 2).

| Condition | F (1,11) | p |
|---------------|----------|-------|
| Vertical-haut | 9.38 | < .05 |
| Horizontal | 12.00 | < .05 |
| Vertical-bas | 11.91 | < .05 |

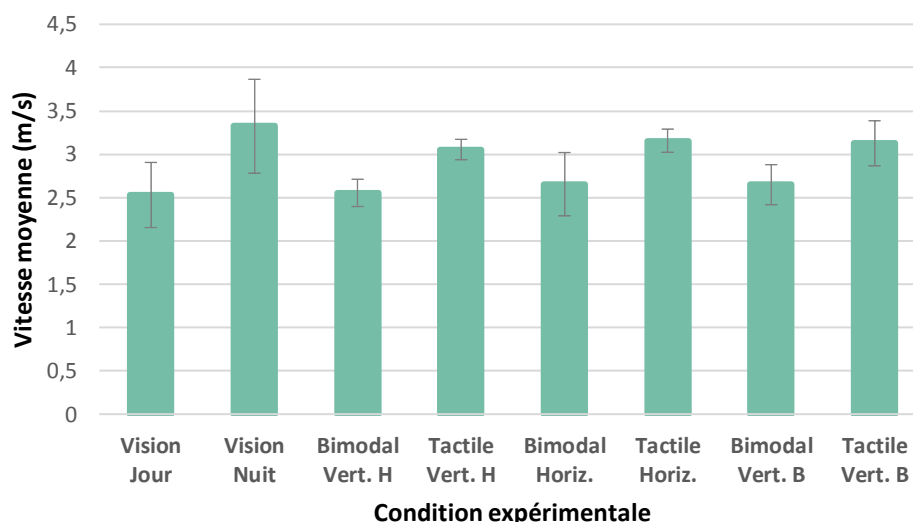


Figure 6.11 – Vitesse moyenne dans les différents blocs expérimentaux (expérience 6 – phases expérimentales 1 & 2).

2.3 Discussion

Après avoir étudié le jugement de TTC à partir d'informations tactiles, et montré que cette modalité sensorielle pouvait suppléer la vision lorsque celle-ci est occultée, cette dernière étude visait à montrer que ces informations tactiles pouvaient également améliorer la régulation du mouvement lors d'une approche au sol. Cette expérience a ainsi confirmé notre principale hypothèse et a montré que des informations tactiles sur l'altitude permettent de réduire significativement la vitesse d'impact au sol.

La présente expérience a montré que la régulation de l'approche se dégradait lorsqu'elle était réalisée en condition de nuit. Les performances étaient également significativement moins bonnes lorsque l'approche était réalisée uniquement sur la base d'informations tactiles. En revanche, lorsque ces deux sources d'information sont combinées des performances similaires à celles observées dans des conditions de visibilité normale sont observées. Cette amélioration se traduit par une vitesse d'impact plus faible, généralement associée à une vitesse moyenne plus faible au cours de l'essai. Les participants parvenaient donc à mieux contrôler leur vitesse tout au long de l'approche, grâce à la combinaison d'informations

visuelles et tactiles. Ces résultats viennent confirmer le bénéfice apporté par les dispositifs tactiles dans le domaine du pilotage, pour compléter la vision lorsque celle-ci est dégradée. Dans une étude comparable à la nôtre, Jansen et al. (2008) avaient également observé une amélioration des performances d'atterrissage (en condition réelles) en situation de faible visibilité, grâce à un dispositif vibrotactile. Leurs analyses portaient principalement sur la fluidité de l'approche et montraient une réduction de l'écart d'altitude par rapport à la trajectoire idéale et une augmentation de la vitesse moyenne. Nos résultats n'ont pas montré de réduction de la vitesse moyenne et les analyses complémentaires réalisées suite à l'expérience 6 ne se sont pas révélées significatives. Cela peut certainement s'expliquer par le fait que les participants de notre expérience étaient novices et réalisaient ce type de tâche pour la première fois. Ainsi, ils pourraient s'être focalisés sur la consigne (i.e. atterrir en ayant la vitesse d'impact la plus faible possible) en favorisant un contact doux au détriment de la vitesse moyenne. Les pilotes expérimentés testés dans l'étude de Jansen et al. (2008) avaient pour consigne de réaliser un atterrissage (en condition réelle) tel qu'ils le faisaient habituellement et ont pu s'être focalisés sur d'autres variables. Nos résultats viennent néanmoins compléter ceux de cette étude et montrent que l'utilisation d'informations tactiles sur l'altitude influence également la sévérité du contact au sol.

Concernant le sens de stimulation, bien que d'autres études présentent des résultats discordants (Gray et al., 2014; Meng, Gray, et al., 2015; Meng, Ho, et al., 2015), ce paramètre n'a pas eu d'effet sur la réussite de la tâche de régulation d'approche dans l'expérience n°6. En effet, à travers un ensemble d'étude Gray et ses collaborateurs avaient observé une réduction du temps de réaction au freinage en utilisant des patrons vibrotactiles se déplaçant vers le torse et donc dans le sens du flux visuel. Cette amélioration n'était en revanche pas présente lorsque la stimulation décrivait le mouvement inverse (i.e. du torse vers le poignet ou l'abdomen). Il faut cependant souligner une différence notable entre ces différentes études et l'expérience 6 de ce travail de recherche. Celles-ci impliquaient des tâches de simulation de conduite dans lesquelles les participants devaient suivre un véhicule les précédant et freiner le plus rapidement possible en cas de décélération

brusque de celui-ci. Les patrons spatiotemporels étaient transmis lorsque le TTC entre le participant et le véhicule atteignait une valeur critique. Le sens de la stimulation tactile semble donc avoir une importance lorsque la tâche nécessite de répondre rapidement à un évènement particulier mais, selon nos résultats, n'a aucune influence sur la régulation de l'approche ou de la décélération. Par ailleurs, une étude plus ancienne réalisée à l'aide du TVSS (Bach-y-Rita, 1972) avait montré, comme dans notre expérience, que les participants s'adaptaient quasi-immédiatement à un changement de localisation de la stimulation. Cela suggère à nouveau que les participants s'appuient principalement sur les caractéristiques spatiotemporelles de la stimulation tactile pour percevoir l'information, indépendamment de l'orientation du dispositif. Ces résultats sont plutôt en faveur d'une perception directe qui ne nécessite pas la mise en jeu de représentations mentales et qui est rendue possible grâce à l'action motrice (e.g. Michaels & Carello, 1981). En effet, dans notre expérience (contrairement aux travaux de Gray et ses collaborateurs) les informations tactiles étaient transmises en continu au cours de l'approche, et étaient directement liées au mouvement de l'engin par rapport au sol. Plusieurs études ont montré l'importance du mouvement pour accéder aux informations tactiles, notamment pour accéder à des informations d'approche comme la distance (Díaz, Barrientos, Jacobs, & Travieso, 2012b; Lenay et al., 1997). Il est ainsi possible que le couplage entre le mouvement (déplacement du joystick) et les stimulations tactiles qui en résultent (dynamique spatiotemporelle des vibrations) permettent d'accéder plus précisément aux caractéristiques du mouvement et de le réguler de façon appropriée. On peut également penser que nos résultats illustrent la mise en extériorité des percepts, un des principes de la suppléance sensorielle énoncé par Auvray (2006). Autrement dit, bien que la sensation soit différente (en termes de localisation), la perception qui en résulte (approche vers le sol) est identique.

Cette expérience a ainsi montré la possibilité d'améliorer la régulation d'une approche au sol lorsque la vision est dégradée, en transmettant des informations sur l'altitude via la modalité tactile. De plus, cette amélioration était observée quel que soit le sens de la stimulation, ce qui constitue un résultat intéressant d'un point de fondamental pour mieux comprendre les processus impliqués dans la

perception tactile. Sur le plan appliqué, cela laisse également envisager une plus grande flexibilité dans l'utilisation des dispositifs vibrotactiles.

3 Expérience 7 : effet de différentes variables informationnelles sur la régulation d'un atterrissage simulé en hélicoptère

L'expérience 6 a montré que l'ajout d'informations tactiles sur l'altitude permettait d'améliorer la régulation d'approche au sol en situation de faible visibilité. L'objectif de cette deuxième expérience était de déterminer si les stimulations tactiles améliorent la régulation de l'approche au sol lorsqu'elles sont liées à des variables informationnelles autres que l'altitude. Parmi ces variables, la vitesse d'approche est apparue dans plusieurs études comme étant une variable importante dans les situations d'approche (Gray et al., 2014) et notamment pour la régulation de l'atterrissage (Oskarsson et al., 2013 ; Jansen et al., 2008). Le TTC, une variable déterminante sur le plan visuel (à travers la variable tau), semble également pertinente pour transmettre des informations d'approche via la modalité tactile.

Pour comparer ces différentes variables, nous nous sommes appuyés sur des principes de codage précédemment étudiés dans la littérature. Concernant la vitesse, le principe de codage s'inspire de plusieurs études où cette variable est transmise sous la forme d'un flux tactile se déplaçant dans le sens inverse du déplacement, de la même façon que le flux optique (Amemiya et al., 2013; Jansen et al., 2008). Dans l'étude de Jansen et al. (2008), aucune amélioration n'a pu être observée lorsque des informations sur la vitesse étaient transmises durant un atterrissage. Cependant, elles étaient transmises en complément d'informations sur l'altitude mais n'ont pas été étudiées de façon isolée pour être comparées à cette variable. Il nous semble ainsi important de préciser si la vitesse, comme l'altitude, peut être transmise sous forme tactile pour améliorer la régulation d'une approche. Ces deux variables seront comparées à une troisième, le TTC, qui n'a jusqu'alors jamais été étudié dans le cadre de l'aide tactile à l'atterrissage. Hartcher-O'Brien et al. (2015) ont utilisé un feedback temporel dont la durée correspondait au TTC pour informer de la distance d'un obstacle. Leur principe de codage de la distance

est semblable à un codage basé sur le rythme mais dont le délai temporel entre deux vibrations est directement proportionnel à une variable (i.e. TTC).

Dans une tâche de régulation d'approche similaire à celle de l'expérience 6, nous avons tenté de montrer laquelle de ces trois variables (altitude, vitesse et TTC) est la plus efficace pour suppléer la vision lorsque celle-ci est dégradée. Nous faisons l'hypothèse que les informations tactiles relatives à l'altitude de l'engin par rapport au sol seront les plus efficaces. Cette stimulation permet en effet d'accéder à des informations sur la vitesse d'approche en fonction du délai entre deux vibrations successives et sur le TTC à partir du ratio entre la position de la vibration et la vitesse à laquelle elle se déplace à la surface de la peau. Cependant, nous avons cherché à savoir si des informations plus spécifiques comme la vitesse ou la variation du TTC ne pouvaient pas se révéler plus efficaces.

3.1 Méthode expérimentale

3.1.1 Participants

Cette expérimentation a été réalisée avec 12 étudiants de l'UFR STAPS de Caen (10 hommes et 2 femmes), âgés de 20.67 ± 1.15 ans. Aucun des participants n'avait préalablement participé à une étude impliquant un dispositif tactile (i.e. transmettant des informations via l'activation de plusieurs vibrateurs).

3.1.2 Caractéristiques générales de la tâche

La tâche consistait pour les participants à se poser au sol dans un environnement virtuel en ayant la vitesse verticale la plus faible possible. Pour cela, les participants pouvaient s'appuyer (en plus des informations visuelles) sur des informations vibrotactiles concernant différentes variables informationnelles (altitude, vitesse d'approche ou TTC). L'environnement simulait des conditions de nuit, c'est-à-dire des conditions visuelles dégradées, et dans lesquelles les

participants démarraient à une altitude initiale de 45 mètres au-dessus du sol. Afin de rendre la tâche plus conforme aux caractéristiques d'un atterrissage réel et éviter que les participants ne s'adaptent à une altitude initiale fixe, nous avons inclus différentes vitesses horizontales (0, 3 ou 6 m/s). Cette vitesse de déplacement horizontale était dans tous les cas constante et gérée automatiquement par le dispositif (i.e. les participants ne pouvaient par aucun moyen agir sur cette vitesse).

3.1.3 Matériel

Le dispositif tactile (version CesamS) était configuré sous la forme d'une ligne de 8 vibrateurs disposés verticalement au niveau du dos (**Figure 6.12**). Cette disposition a été privilégiée car nous souhaitions avoir un dispositif vertical pour les informations sur la vitesse d'approche (cf. paragraphe suivant) et qu'il était plus pratique de n'utiliser qu'une seule ligne de vibrateurs pour toute l'expérimentation.

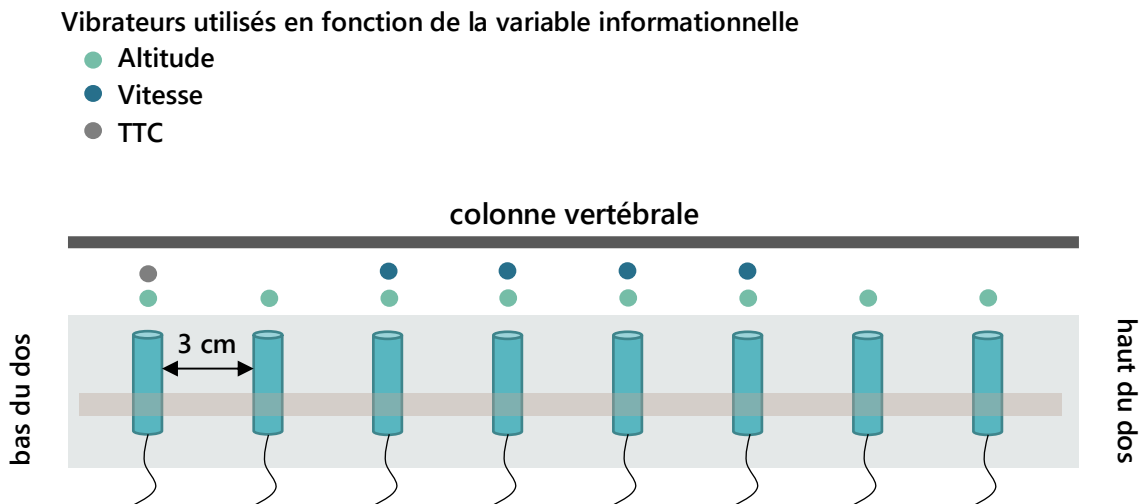


Figure 6.12 – Configuration du dispositif tactile pour l'expérience 7. Les vibrateurs mobilisés varient selon la variable informationnelle transmise au cours de l'essai.

Informations concernant la vitesse d'approche. Le principe de codage utilisé pour la vitesse d'approche consistait en l'activation successive (et en continu) de

quatre vibrateurs espacés de 3 cm et placés verticalement au niveau du dos, afin que la stimulation s'active dans le même sens que celui du flux visuel (Amemiya et al., 2013; Amemiya et al., 2016). Ainsi, les vibrateurs s'activaient du bas vers le haut lorsque le participant s'approchait du sol, et dans le sens inverse lorsque son mouvement était orienté vers le haut. La durée de vibration de chaque stimulation était de 50 ms et le délai entre le début deux vibrations successives (*stimulus onset asynchrony*, SOA) variait selon la vitesse d'approche (**Équation 6.1**).

$$SOA = \frac{1.5}{V}$$

Équation 6.1 – Relation entre le SOA et la vitesse d'approche (V).

Nous avons défini cette relation entre le SOA et la vitesse réelle afin d'avoir un SOA minimum de 75 ms. Cette valeur minimum du SOA évite que deux stimulations (d'une durée de 50 ms) ne soient perçues comme étant simultanées (Scherrick & Rodgers, 1978). Le SOA était de 75 ms au moment où la vitesse d'approche était de 20 m/s. Il s'agit d'une vitesse maximum théorique définie à partir des résultats de l'expérience précédente.

Informations concernant le temps de pré-contact. Pour transmettre sous une forme tactile des informations concernant le TTC, nous avons utilisé un seul vibrateur transmettant 10 stimulations successives, entre le début de l'essai et le contact avec le sol. Chaque stimulation durait également 50 ms avec un intervalle temporel proportionnel au TTC.

Information concernant l'altitude. Pour transmettre des informations concernant l'altitude via la modalité tactile, le même principe de codage que dans les expériences 2 à 6 a été utilisé. La disposition des vibrateurs était identique à celle de la condition « dos haut-bas » de l'expérience 6. Afin d'avoir des conditions homogènes, la durée de vibration des stimulations était ici de 50 ms (120 ms dans les expériences précédentes).

3.1.4 Procédure

L'expérience a été organisée en quatre blocs dans lesquels les participants recevaient des informations tactiles relatives à une variable particulière : l'altitude, la vitesse, le TTC ou aucune information (**Figure 6.13**). Chaque bloc comportait 21 essais (7 essais par vitesse horizontale) présentés dans un ordre aléatoire. L'ordre de passation des blocs était contrebalancé entre tous les participants.

Une phase de familiarisation générale était proposée aux participants en début de protocole. Celle-ci consistait à réaliser 12 atterrissages (4 essais par vitesse horizontale) dans des conditions de visibilité normale (i.e. conditions de jour de l'expérience n°4). Une familiarisation spécifique était ensuite réalisée au début de chaque bloc expérimental (2 essais par vitesse horizontale).

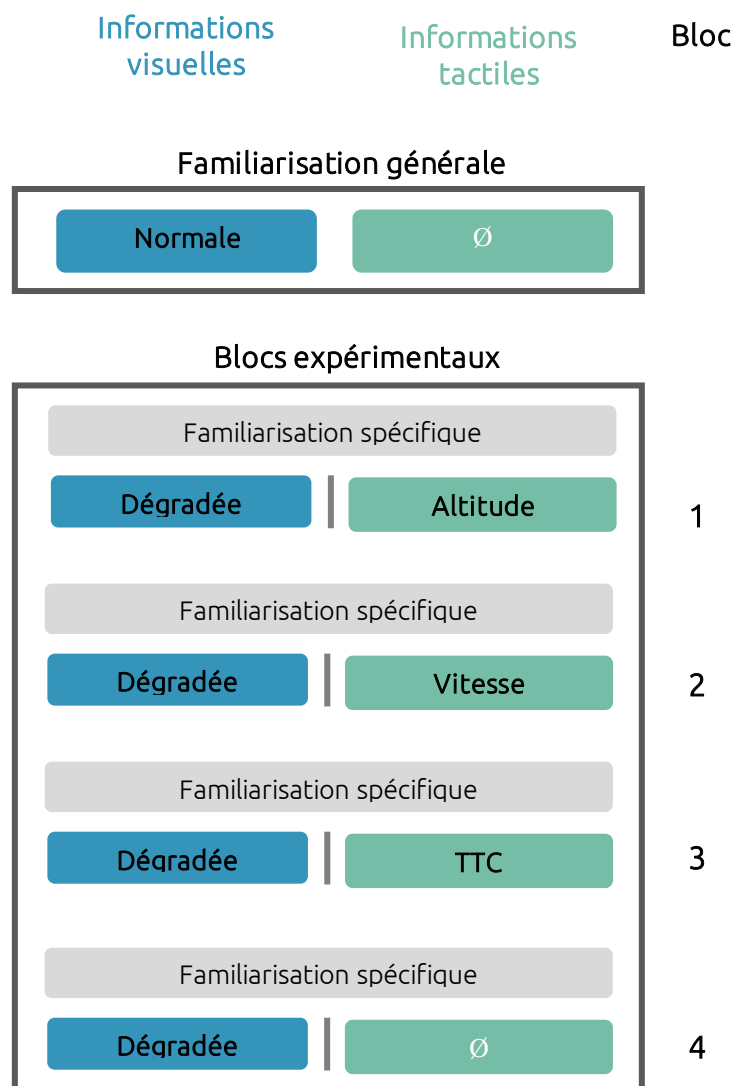


Figure 6.13 – Organisation du protocole expérimental n°5.

3.1.5 Analyses statistiques

Pour toutes les variables dépendantes, nous avons réalisé des ANOVA à mesures répétées avec un plan expérimental à deux variables : *vitesse horizontale* (0 – 3 – 6 m/s) * *type d'information tactile* (altitude – vitesse – TTC – aucune). Le seuil de significativité a été fixé à $p < .05$ et des tests post-hoc de Tukey ont été réalisés dans le but de préciser la nature des effets significatifs.

3.2 Résultats

3.2.1 Vitesse d'impact

La vitesse d'impact au sol dépendait du type d'information transmis par le dispositif tactile ($F(3,33)=26.44$, $p<.001$, $\eta^2=.71$). Lorsque les participants recevaient des informations concernant l'altitude ou la vitesse d'approche, ils se posaient au sol avec une vitesse significativement plus faible que lors qu'ils recevaient des informations sur le TTC ou aucune information tactile (**Figure 6.14**).

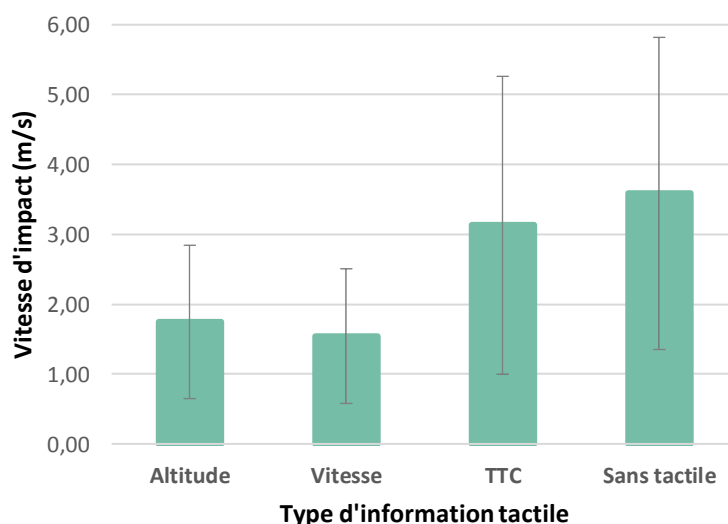


Figure 6.14 – Vitesse d'impact en fonction du type d'information tactile (expérience 7).

Nous avons également observé un effet significatif de la vitesse horizontale ($F(2,22)=16.14$, $p<.001$, $\eta^2=.60$). L'analyse post-hoc a permis de constater que la vitesse d'impact était significativement différente entre chacune des conditions de vitesse comparées deux à deux (**Figure 6.15**).

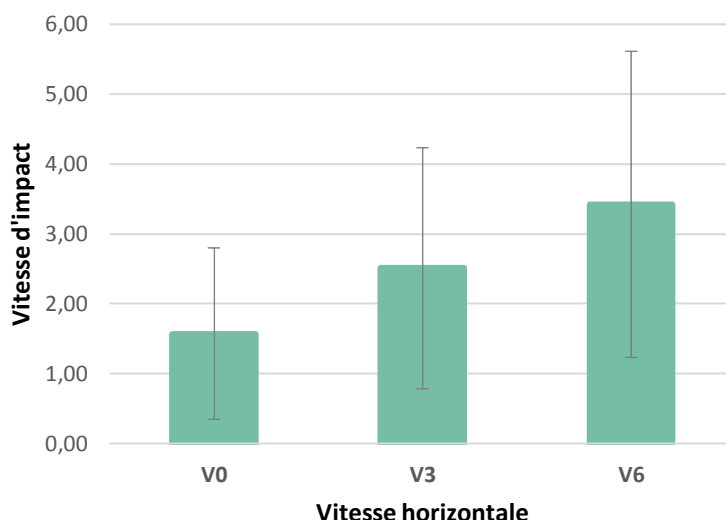


Figure 6.15 – Vitesse d'impact en fonction de la vitesse horizontale (expérience 7).

De plus, l'analyse statistique a permis d'observer un effet d'interaction entre le type d'information tactile et la vitesse horizontale ($F(6,66)=2.57$, $p<.05$, $\eta^2=.19$). Lorsque les participants recevaient des informations tactiles sur l'altitude ou la vitesse d'approche, la vitesse horizontale n'avait aucun effet sur la vitesse d'impact. Lorsque le dispositif tactile transmettait des informations sur le TTC, on observait une différence significative entre les conditions V0 (vitesse horizontale nulle) et V6 (6 m/s). Enfin, sans l'utilisation du dispositif tactile, la vitesse d'impact était significativement plus importante avec une vitesse horizontale élevée (**Figure 6.16**)

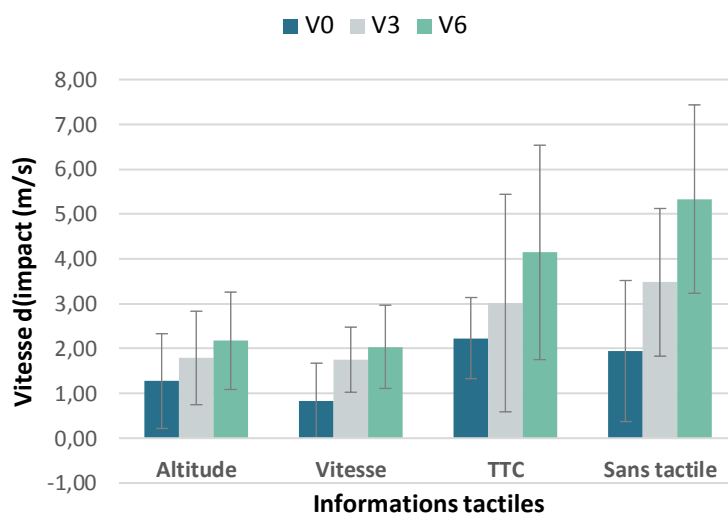


Figure 6.16 – Vitesse d'impact en fonction du type d'information tactile et de la vitesse horizontale (expérience 7). L'effet de la vitesse horizontale était différent selon le type d'information tactile.

3.2.2 Vitesse moyenne

Concernant la vitesse moyenne au cours d'un essai, l'analyse a montré un effet significatif de la vitesse horizontale ($F(2,22)=40.26$, $p<.001$, $\eta^2=.79$). Les participants étaient en moyenne plus lents lorsque la vitesse horizontale était nulle que lorsqu'elle était de 6 m/s (**Figure 6.17**).

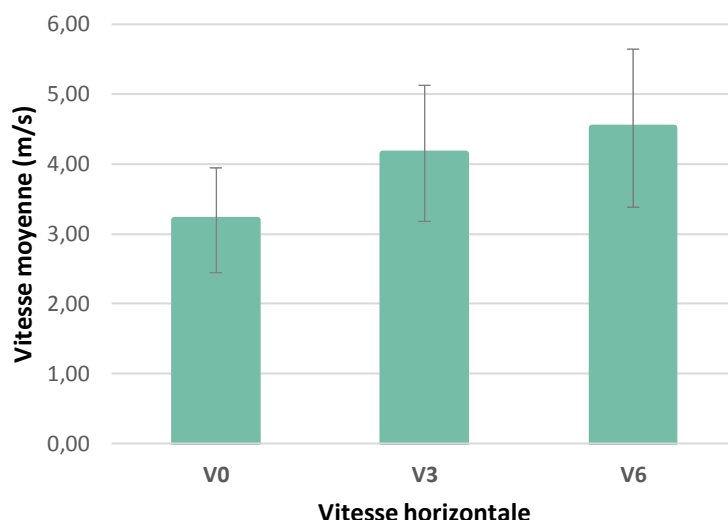


Figure 6.17 – Vitesse moyenne en fonction de la vitesse horizontale (expérience 7).

3.2.3 Analyses complémentaires

Afin de préciser comment les informations sur l'altitude et la vitesse d'approche, contrairement aux informations sur le TTC, permettaient d'avoir une vitesse d'impact plus faible, nous avons réalisé des analyses complémentaires sur la cinématique des approches. L'objectif était de préciser à quel moment était initiée la première décélération au cours d'un essai et d'évaluer pour chaque essai la vitesse et l'accélération maximale, en ne tenant compte que des déplacements vers le sol.

Initiation de la décélération. Les analyses ont montré dans un premier temps que la première décélération était initiée à une altitude plus basse avec des informations sur l'altitude qu'avec des informations sur le TTC ($F(3,33)=4.35$, $p<.05$, $\eta^2=.28$, **Figure 6.18**).

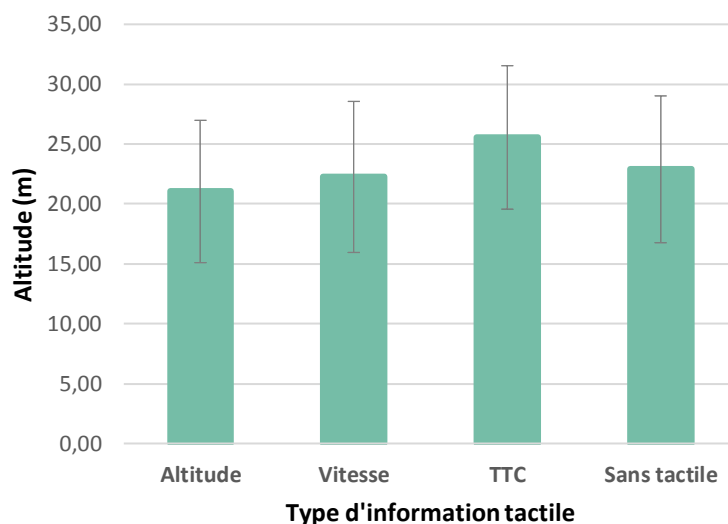


Figure 6.18 – Altitude au moment de la première décélération dans les quatre conditions expérimentales (expérience 7).

Vitesse maximale. La vitesse maximale était significativement différente en fonction du type d'information transmis par le dispositif tactile ($F(3,33)=7.62$, $p<.001$, $\eta^2=.40$) et de la vitesse horizontale ($F(2,22)=33.18$, $p<.001$, $\eta^2=.75$). Une analyse post-hoc indique qu'avec des informations sur l'altitude ou la vitesse d'approche, la vitesse maximale au cours d'un cours essai était en moyenne plus faible qu'avec des informations sur le TTC ou sans information tactile (**Figure 6.19**). De plus, la vitesse maximale était plus faible avec une vitesse horizontale nulle (V0) qu'avec une vitesse horizontale de 6 m/s (V6) – **Figure 6.20**.

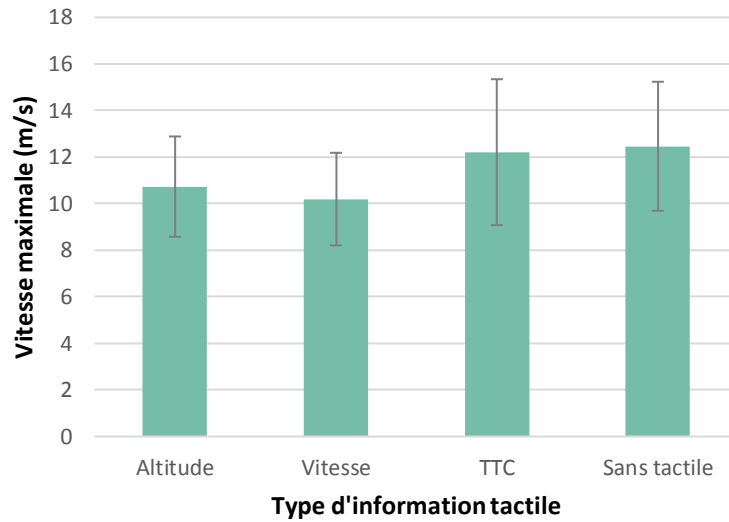


Figure 6.19 – Vitesse maximale en fonction de la vitesse horizontale et de la nature de la variable informationnelle (expérience 7).

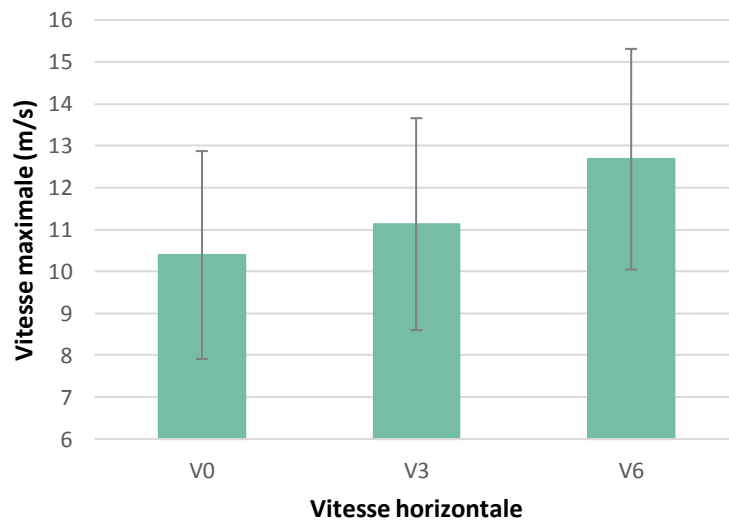


Figure 6.20 – Vitesse maximale en fonction de la vitesse horizontale de l'engin (expérience 7).

Accélération maximale. Cette dernière analyse concernant l'accélération maximale au cours d'un essai a révélé un effet significatif du type d'information ($F(2,22)=33.18, p<.001, \eta^2=.75$) et de la vitesse horizontale ($F(2,22)=33.18, p<.001, \eta^2=.75$). Selon ces analyses, l'accélération maximale était plus faible avec des informations tactiles sur la vitesse et l'altitude (**Figure 6.21**). On peut enfin noter

que l'accélération maximale était plus faible lorsque la vitesse horizontale était nulle (Figure 6.22).

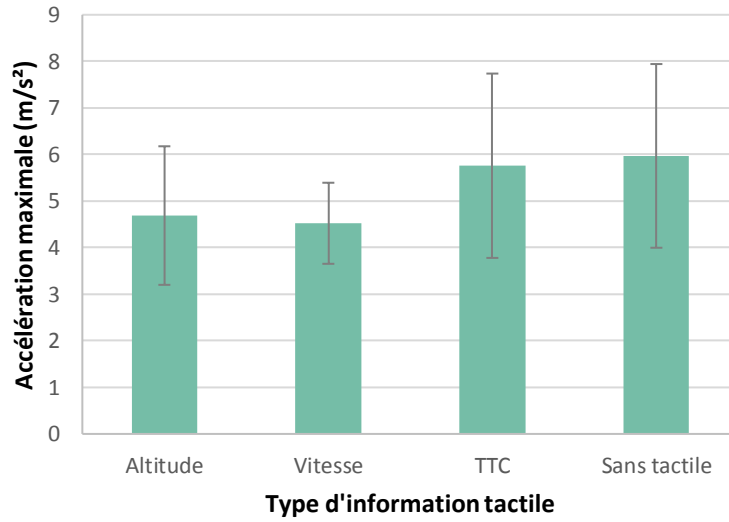


Figure 6.21 – Accélération maximale en fonction du type d'informations tactiles (expérience 7).

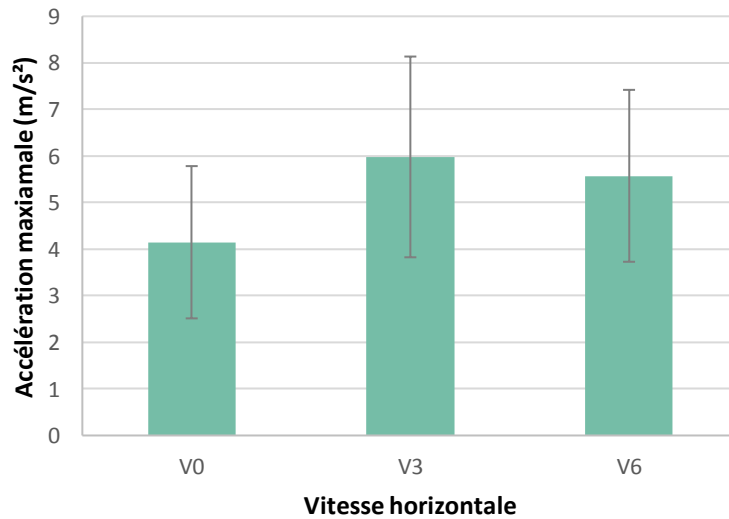


Figure 6.22 – Accélération maximale en fonction de la vitesse horizontale (expérience 7).

3.3 Discussion

De manière globale, les résultats de l'expérience 7 ont montré que le dispositif tactile permet d'améliorer les performances, uniquement lorsqu'il transmet des informations sur l'altitude ou la vitesse d'approche. Notre hypothèse était que les deux types d'informations tactiles qui renvoyaient à ces variables permettaient d'accéder plus facilement à des informations sur la vitesse d'approche. Plusieurs résultats de cette expérience, notamment l'analyse complémentaire, montrent que la régulation de la vitesse verticale semble être un facteur déterminant de la réussite de cette tâche. Tout d'abord, la vitesse et l'accélération maximale atteinte au cours d'un essai est significativement plus faible (**Figure 6.21** et **Figure 6.22**). On peut donc penser que la vitesse d'impact plus élevée en l'absence d'informations tactiles, ou avec des informations sur le TTC, résulte d'une mauvaise régulation de la vitesse verticale. De plus, on observe un effet de la vitesse horizontale sur les performances des participants. Sur le plan visuel, le flux optique global généré lors d'une approche au sol dépend à la fois des vitesses horizontales et verticales. En l'absence de déplacement horizontal, le flux optique fournit donc directement des informations sur le mouvement vertical. Lorsque la vitesse horizontale est non nulle, cela modifie la perception de la vitesse verticale (Larish & Flach, 1990), qui est moins bien contrôlée. Cela conduit à des essais conclus plus rapidement (**Figure 6.17**) mais également avec une vitesse d'impact au sol plus élevée (**Figure 6.17**). Cet effet de la vitesse n'est pas présent lorsque les participants reçoivent, par la modalité tactile, des informations sur la vitesse verticale ou sur l'altitude. Étant moins accessible, au niveau visuel lorsque l'engin se déplace sur les deux axes, cette information peut être perçue via la modalité tactile et permettre ainsi une meilleure régulation de l'approche. Comme évoqué précédemment, les informations sur l'altitude, telles qu'elles étaient codées dans cette expérience, donnent théoriquement accès à des informations sur la vitesse verticale. En effet, la vitesse à laquelle se déplace la stimulation est directement liée à la vitesse d'approche de l'engin dans l'environnement.

Les informations sur le TTC, en revanche, ne permettent pas d'améliorer significativement la vitesse d'impact par rapport à la condition sans information tactile (**Figure 6.14**). On ne peut pas écarter la possibilité que cette absence d'amélioration des performances soit liée au principe de codage utilisé pour cette variable. Celui-ci consistait en l'activation d'un seul vibreur avec un délai, entre deux vibrations successives qui étaient proportionnel au TTC. Un principe de codage, donc, semblable à ceux basés sur le rythme de vibration, alors que les deux autres variables étaient transmises à l'aide d'un patron spatiotemporel. Or, plusieurs études ont montré que ce paramètre était peu efficace pour transmettre des informations d'approche (van Erp, van Veen, Jansen, & Dobbins, 2005; van Veen, van Erp, & Spape, 2004). Même lorsqu'il est directement lié au TTC, le rythme de vibration ne permet pas ici, d'accéder précisément à cette information. Dans ce contexte, les participants semblent alors s'appuyer principalement sur les informations visuelles qui, étant dégradées, ne permettent pas une régulation efficace de l'approche (i.e. pas d'amélioration par rapport à la condition sans utilisation du dispositif tactile). Les variations de rythme nécessitent peut-être un temps plus conséquent pour être perçues et utilisées efficacement, notamment dans ce type de tâche avec des déplacements rapides et parfois accélérés. Ce résultat suggère donc que la dimension spatiale est un facteur important pour transmettre des informations d'approche, notamment sur la vitesse, comme l'ont suggéré des études récentes (Amemiya et al., 2013; Ho et al., 2014).

Discussion générale

1 Contexte et objectifs de la thèse

Les tâches de navigation nécessitent une régulation perceptivo-motrice très précise, mettant en jeu principalement des informations visuelles. Cette modalité sensorielle peut parfois être surchargée ou inopérante, en raison de la demande attentionnelle de la tâche ou des conditions environnementales. En s'appuyant sur les travaux réalisés dans le cadre de la substitution sensorielle, de nombreuses études ont mis en avant l'intérêt des dispositifs vibrotactiles afin d'assurer une transmission de l'information efficace lorsque les informations visuelles sont (partiellement) inaccessibles. Ce type de dispositif a déjà largement été utilisé dans le domaine de la navigation, mais principalement pour transmettre des informations directionnelles ou des signaux d'alerte. De nombreux travaux expérimentaux ont montré l'efficacité de la modalité tactile pour transmettre intuitivement ce type d'information en exploitant le principe du « tap-on-the-shoulder » (Mortimer et al., 2011; Tsukada & Yasumura, 2004; van Veen & van Erp, 2003). Cependant, la plupart des tâches de navigation nécessite également d'avoir accès à des informations spécifiques afin de réguler une approche ou gérer un contact avec l'environnement (atterrissage, évitement de collision, etc.) mais pour lesquelles il n'a pas été identifié de principe de codage efficace.

Dans ce travail doctoral, considérant les travaux plus récents, nous avons fait le choix d'utiliser des patrons spatio-temporels qui paraissent offrir le plus de possibilités pour réguler les actions de navigation. Nous avons pu identifier deux caractéristiques comme étant déterminantes pour l'utilisation de ce type de patron : les paramètres de la stimulation et la variable informationnelle liée au patron de stimulation. Cette dernière partie précisera comment ces deux aspects influencent la perception des informations tactiles sur la base des expérimentations réalisées. De plus, nos résultats ont soulevé deux autres problématiques qui nous semblent importantes à considérer lors de l'utilisation des informations vibrotactiles. La première est relative à l'interdépendance entre la

variable informationnelle et la (les) caractéristique(s) de la stimulation qui spécifie(nt) cette variable. La seconde concerne le choix de la variable informationnelle (i.e. tactile) à transmettre selon les informations disponibles sur le plan visuel. Enfin, nous exposerons certaines limites de ce travail de recherche avant d'en aborder la conclusion et les perspectives.

2 Contributions de ce travail de recherche dans le domaine des interfaces vibrotactiles

Quelles sont les caractéristiques de la stimulation à prendre en compte pour transmettre des informations d'approche ?

Parmi les caractéristiques de la stimulation étudiées au cours de ce travail de recherche, le caractère discontinu des vibrations s'est révélé être bénéfique pour accéder précisément aux informations d'approche transmises sous forme tactile. L'utilisation de vibrations discontinues conduit à une estimation plus précise du TTC, aussi bien pour des approches radiales que pour des approches tangentielles (expériences 1 et 2). Cette discontinuité permet sans doute une meilleure discrimination spatiale et/ou temporelle des stimuli. En effet, selon les travaux d'Helson et King (1931), le délai temporel entre deux vibrations permet une meilleure discrimination spatiale. De plus, la discontinuité génère un rythme qui pourrait faciliter l'utilisation des caractéristiques temporelles (Brewster & Brown, 2004; Töyssy, Raisamo, & Raisamo, 2008). Ce résultat montre ainsi qu'indépendamment de l'information tactile transmise, les vibrations discontinues permettent un accès plus précis à l'information et sont à privilégier lors de l'utilisation de patrons spatiotemporels.

L'écartement spatial semble également influencer les performances mais pas de façon systématique. Dans le Chapitre 4 (expérience 1), l'écartement spatial avait un effet significatif sur les performances lors des approches radiales. Un jugement plus précis était alors observé pour un écartement de 3 cm. Cette valeur correspond aux seuils de discrimination de 2 et 3 cm généralement observés au

niveau de l'abdomen (Eskildsen, Morris, Collins, & Bach-y-Rita, 2013; van Erp, 2005). Par contre les participants ne semblent pas être limités par la capacité de discrimination spatiale de la peau en cas d'approche tangentielle. Rappelons que dans cette condition, les vibrations successives s'enchaînaient selon un rythme régulier. Une hypothèse serait que dans cette condition les participants s'appuient principalement sur les caractéristiques temporelles, expliquant ainsi que les caractéristiques spatiales (i.e. distance inter-vibrateurs) n'ont pas d'influence sur la perception de l'information.

De ce fait, lors de l'utilisation d'un patron spatiotemporel, le système perceptif pourrait utiliser prioritairement les caractéristiques temporelles de la stimulation. Lorsque celles-ci sont difficilement exploitables, les participants s'appuieraient alors sur les caractéristiques spatiales. L'ensemble de ces résultats montre ainsi que la façon dont les caractéristiques de la stimulation influencent la perception peut être différente selon l'information véhiculée par le dispositif.

Quelle variable informationnelle utiliser pour transmettre des informations d'approche ?

Une des principales contributions de ce travail de recherche est d'avoir comparé différentes variables informationnelles dans une même tâche afin d'identifier la plus pertinente à transmettre sur le plan tactile. En effet, plusieurs variables apparaissent dans la littérature comme étant importantes pour réguler une approche ou gérer un contact et ont donc été exploitées pour transmettre des informations vibrotactiles (distance ou altitude, vitesse d'approche et TTC). Toutefois, ces variables ont été étudiées soit de manière isolée, soit combinées entre elles, ne permettant pas à ce jour de préciser si une variable informationnelle est plus efficace qu'une autre (Jansen et al., 2008; van Erp et al., 2003).

Les résultats obtenus au cours de nos expérimentations ont montré que la précision du jugement de TTC et de la régulation d'approche dépendait de la nature de la variable informationnelle transmise par le dispositif tactile. Lors de

l'expérience 3, il a ainsi été observé une plus grande précision dans le jugement de TTC lorsque les approches étaient présentées selon une trajectoire radiale. Sur le plan appliqué, cela met en avant l'intérêt particulier des informations de distance (i.e. position du mobile par rapport à une cible) par rapport à des informations sur la taille angulaire. Dans l'expérience 6, des informations sur l'altitude et des informations sur la vitesse d'approche sont apparues comme étant efficaces pour la régulation d'une approche au sol, par rapport aux informations concernant le TTC.

Ce résultat incite à explorer d'autres variables. En effet, le flux optique donne accès à d'autres variables qui pourraient être utilisées pour réguler une approche (Flach et al., 1992; Larish & Flach, 1990). Certaines variables, comme le *splay angle* ou le *depression angle*, plus spécifiques à la régulation d'approches verticales (cf. Chapitre 2), pourraient par conséquent être plus efficaces que celles testées dans nos différentes études. On pourrait également envisager la possibilité d'exploiter directement les variables impliquées dans la régulation de la décélération, comme $\dot{\tau}$ ou encore GOFR (Fajen, 2008; Yilmaz & Warren, 1995).

Une interdépendance entre la variable informationnelle et le principe de codage

Si nous avons abordé séparément les questions concernant la nature de la variable et les paramètres utilisés pour la coder, ces deux aspects semblent liés et définissent conjointement la nature de l'information tactile. Cela est illustré par les résultats de l'expérience n°7, où les participants étaient significativement plus performants lorsque le dispositif transmettait des informations sur l'altitude ou la vitesse d'approche. On pourrait alors considérer que ces deux variables informationnelles sont pertinentes pour cette tâche et sont utilisées de manière équivalente. Cependant, comme nous l'avons souligné, les informations sur la vitesse d'approche sont théoriquement accessibles via le patron de stimulation renvoyant à l'altitude. On peut donc envisager que la vitesse soit la seule variable

pertinente et que les sujets y ont alors accès, soit directement (patron tactile informant sur la vitesse), soit à partir des informations tactiles sur l'altitude. Identifier laquelle de ces deux hypothèses se vérifie n'a pas de conséquence directe sur le plan appliqué, puisque ces informations tactiles ont une efficacité équivalente pour réguler une approche au sol. En revanche, cela permettrait de mieux comprendre les mécanismes sous-tendant la perception des informations tactiles et leur utilisation pour réguler un mouvement. Ainsi, bien que le dispositif soit conçu pour transmettre des informations relatives à une variable (l'altitude par exemple), en fonction du codage de cette variable sous forme tactile, d'autres variables (vitesse, TTC) peuvent être accessibles et utilisées pour la régulation de la tâche.

Par ailleurs, la correspondance entre la nature de la variable et le paramètre de la stimulation pourrait également être un facteur important à considérer. Le principe du « tap-on-the-shoulder » permet de transmettre intuitivement des informations directionnelles en stimulant une zone autour de l'abdomen. L'efficacité de ce principe de codage repose sans doute sur la correspondance entre le paramètre utilisé, à savoir la localisation de la stimulation autour de l'abdomen (qui décrit une direction par rapport au référentiel égocentrique) et la nature de la variable informationnelle, correspondant également à une direction. Il pourrait en être de même concernant les informations d'approche.

Au cours de l'expérience 6, les différentes variables informationnelles (altitude, vitesse d'approche et TTC) ont été codées en s'assurant de conserver cette correspondance. L'altitude, qui correspond à une position (par rapport au sol), était transmise en variant la position de la stimulation sur un axe vertical. La vitesse d'approche était accessible à travers la vitesse de déplacement d'un flux vibrotactile (se déplaçant du bas vers le haut au niveau du dos). Le TTC, correspondant à une durée, était accessible à travers le délai temporel entre deux vibrations. Seule cette dernière variable n'a pas permis une amélioration significative de l'approche. Ce résultat pourrait être dû à la variable en elle-même, inappropriée pour ce type de tâche, ou au paramètre utilisé pour coder cette information. Cette seconde hypothèse semble la plausible dans la mesure où le TTC

était la seule variable non codée à partir d'un patron spatiotemporel et que d'autres études ont observé de meilleures performances lorsque le patron comporte une dimension spatiale (Amemiya et al., 2013; Meng, Gray, et al., 2015). Ainsi, la nature de la variable et les paramètres de la stimulation utilisés pour la coder semblent être les aspects à considérer prioritairement dans l'utilisation d'informations tactiles. Cependant, à un second niveau, la correspondance entre les deux pourrait faciliter l'accès à l'information tactile et permettre une appropriation plus rapide. Cette correspondance pourrait être un des critères de l'intuitivité d'un patron stimulation en permettant à l'information d'être plus spontanément ou naturellement interprétée.

Comment les informations tactiles et visuelles doivent-elles être combinées ?

A l'issue des différentes études menées dans le cadre de ce travail, il paraît nécessaire d'étudier les informations vibrotactiles d'un point de vue multimodal. Gray (2008) a suggéré que lorsque plusieurs modalités sensorielles sont sollicitées, plus une entrée sensorielle est perturbée ou fournit des informations ambiguës, plus l'on a tendance à intégrer les autres sources d'informations. Certains résultats de cette thèse vont dans le sens de cette proposition et laissent penser que l'utilisation des informations tactiles dépend des informations visuelles disponibles dans l'environnement. Tout d'abord, lors de l'étude n°2 (tâche de jugement de TTC), les résultats ont montré que l'ajout d'informations vibrotactiles aux informations visuelles, ne permettait pas d'améliorer les performances lorsque la vision fournissait des informations équivalentes. La modalité visuelle étant plus précise que la modalité tactile pour réaliser ce type de jugement, lorsque celle-ci est disponible sans dégradation, elle est privilégiée par rapport aux autres sources d'information (tactile, dans le cas présent). L'expérience 6 a montré que la baisse de la vitesse d'impact observée lors de l'utilisation du dispositif tactile était plus importante lorsque l'approche comportait une composante horizontale, autrement dit lorsque le flux visuel spécifiait moins précisément la vitesse verticale. Il semble donc fondamental de comprendre comment les informations provenant des deux modalités sensorielles peuvent être combinées de manière efficace. Plus

globalement, le contexte d'utilisation et les informations visuelles disponibles au moment de l'utilisation du dispositif tactile doivent être pris en compte de façon plus systématique.

Limites du présent travail de recherche

Avant de conclure ce travail de recherche, il convient d'en préciser certaines limites. Tout d'abord, les tâches de régulation d'approche, utilisées lors de l'étude 3, étaient réalisées dans un environnement virtuel relativement simple. Les tâches de navigation, et en particulier la phase d'atterrissage dans le cadre du pilotage d'hélicoptère, sont plus complexes, notamment au niveau de la charge attentionnelle. Même si certaines études montrent que la perception des informations tactiles n'est pas affectée par le niveau de charge mentale, aucune n'a été réalisée dans des tâches de régulation d'approche. De plus, certains éléments familiers de l'environnement (arbres, routes, etc.), qui constituent des indices visuels pour la régulation de l'altitude (Flach et al., 1992 ; Annexe n°1) étaient absents de notre simulation.

Par ailleurs, les différentes études de ce travail de recherche se sont focalisées sur les patrons spatiotemporels, alors que plusieurs ont montré que l'intensité de vibration pourrait être un paramètre approprié pour transmettre des informations d'approche (notamment par rapport au rythme de vibration). Lawson et al. (2015) ont d'ailleurs montré qu'une intensité croissante était spontanément associée à un objet en approche. Ainsi, il pourrait être intéressant de confronter les patrons spatiotemporels à des patrons variant en intensité afin de préciser comment les informations d'approche doivent être codées sous forme tactile.

L'utilisation d'un codage relatif pour définir les patrons de stimulation constitue également une limite à ce travail. Rappelons qu'avec cette forme de codage, chaque vibreur était associé à un pourcentage de la valeur maximale d'une variable (altitude, vitesse, etc.) au cours de l'essai (p.107). Ainsi, tous les vibrateurs du dispositif pouvaient être mobilisés quelles que soient les conditions initiales. Les paramètres de la stimulation (écartement, continuité, etc.) et la

variable informationnelle permettant la régulation la plus précise pourraient être différents avec un codage absolu dans lequel chaque vibreur s'active pour une valeur déterminée de la variable codée.

Enfin, notre dispositif et les patrons de stimulations étudiés n'ont pu être testés auprès de pilotes d'hélicoptère, qui constituent notre population cible d'application. Comme évoqué à la suite l'expérience 6 (p.180), les experts pourraient utiliser d'autres indices visuels que les participants (novices) des différentes expérimentations. Ainsi, les informations vibrotactiles leur permettant d'être plus efficaces pourraient être différentes de celles identifiées dans ce travail de recherche (i.e. altitude et vitesse d'approche). Les pilotes sont, par ailleurs, plus expérimentés dans la régulation de mouvement à l'aide d'un joystick (similaire aux collectifs présents sur les hélicoptères). Il conviendrait donc de confirmer les résultats de ce travail en tenant compte de ces différents facteurs.

3 Conclusion et perspectives de recherche

Ce travail de recherche a permis de souligner l'intérêt des informations vibrotactiles pour suppléer la vision. La modalité tactile s'est révélée être pertinente pour transmettre certaines informations lorsque les conditions visuelles sont dégradées. De plus, nos résultats ont montré que l'utilisation de patrons spatiotemporels nécessite de considérer certaines caractéristiques de la stimulation qui influencent l'accès à l'information. Les vibrations discontinues semblent être à privilégier et les caractéristiques spatiales de la stimulation comme la distance inter-vibreur peuvent également influencer l'accès à l'information. Compte tenu de ces résultats, deux aspects majeurs devraient être pris en compte dans les recherches à venir.

Dans un contexte où les informations tactiles sont de plus en plus utilisées en complément de la vision, comprendre les mécanismes d'interaction entre ces deux modalités constituera un des enjeux forts des futures recherches. D'une façon plus générale, il s'agira de mieux comprendre comment les informations provenant d'un

dispositif vibrotactile peuvent être couplées aux informations visuelles pour percevoir et agir dans l'environnement. Il faudra, par exemple, préciser s'il est préférable que les informations transmises par la modalité tactile soient redondantes ou complémentaires avec celles disponibles par la modalité visuelle, mais également comprendre comment les transmettre en fonction des informations naturellement présentes dans l'environnement (vision de nuit, brouillard...). Cela permettra de rendre les dispositifs vibrotactiles plus adaptables aux différents contextes d'utilisation.

Enfin, ce travail de recherche, comme plusieurs travaux récents, s'appuyait sur l'approche écologique de la perception et de l'action. Celle-ci offre un cadre d'étude pertinent permettant de mieux comprendre comment utiliser des informations vibrotactiles, et ce à deux niveaux différents. D'une part, cette approche a mis en avant comment certaines informations du flux optique permettent de réguler le mouvement (tau, GOF, ER, etc.) et en ce sens, permet d'orienter les principes de codage de l'information sous forme tactile. Par exemple, dans notre dernière étude, l'utilisation d'un flux vibrotactile se déplaçant à la surface de la peau, dans le même sens que le flux visuel, constituait une manière efficace de transmettre des informations sur la vitesse d'approche. D'autre part, l'approche écologique fournit un cadre théorique permettant de mieux comprendre les processus impliqués lors de l'utilisation d'informations tactiles. Sur le plan méthodologique, l'utilisation du paradigme du jugement d'arrivée offre un cadre de recherche commun aux différentes études afin d'identifier les caractéristiques de la stimulation qui influencent l'accès à l'information. De plus, les études sur l'utilisation d'informations vibrotactiles ont fait ressortir certains résultats généraux comme la nécessité de l'action ou encore l'absence d'effet de la localisation ou de l'orientation du dispositif. Cela montre que l'accès à l'information dépend essentiellement du couplage entre l'information perçue et les mouvements de régulation. De ce fait, les études futures doivent privilégier les possibilités d'interaction et d'exploration des caractéristiques de la tâche et du codage associé de l'information tactile.

Références bibliographiques

- Amemiya, T., Hirota, K., & Ikei, Y. (2013). Perceived forward velocity increases with tactile flow on seat pan. In 2013 IEEE Virtual Reality (VR) (p. 141 - 142).
- Amemiya, T., Hirota, K., & Ikei, Y. (2016). Tactile Apparent Motion on the Torso Modulates Perceived Forward Self-Motion Velocity. *IEEE Transactions on Haptics*, 9(4), 474- 482.
- Asif, A., Heuten, W., & Boll, S. (2010). Exploring distance encodings with a tactile display to convey turn by turn information in automobiles (p. 32). ACM Press.
- Auvray, M. (2006). Remplacer un sens par un autre : la suppléance perceptive. In *Le Traité de la réalité virtuelle III, vol. 1. L'Homme et l'environnement virtuel* (Les Presses de l'Ecole des Mines, p. 173- 188). Paris.
- Auvray, M., Hanneton, S., & O'Regan, J. K. (2003). Localisation and form recognition in sensory substitution. *Perception ECVF abstract*, 32, 0-0.
- Auvray, M., & Myin, E. (2009). Perception with compensatory devices: from sensory substitution to sensorimotor extension. *Cognitive Science*, 33(6), 1036- 1058.
- Bach-y-Rita, P. (1972). *Brain Mechanisms in Sensory Substitution*. Academic Press.
- Bach-Y-Rita, P. (2002). Sensory substitution and qualia. In A. Noë & E. Thompson (Éd.), *Vision and mind* (p. 497- 514). Cambridge, MA: MIT Press.
- Bach- Y- Rita, P. (2004). Tactile Sensory Substitution Studies. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1013(1), 83- 91.
- Bach-Y-Rita, P., Collins, C. C., Saunders, F. A., White, B., & Scadden, L. (1969). Vision Substitution by Tactile Image Projection. *Nature*, 221(5184), 963 - 964.
- Bardy, B. G. (2014). *Le contrôle visuel des déplacements*. De Boeck Supérieur.
- Benguigui, N., Broderick, M., & Ripoll, H. (2004). Age differences in estimating arrival-time. *Neuroscience Letters*, 369(3), 197- 202.
- Bloomfield, A., & Badler, N. I. (2007). Collision Awareness Using Vibrotactile Arrays. In 2014 IEEE Virtual Reality (VR) (Vol. 0, p. 163- 170). Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society.

- Brewster, S. A., & King, A. (2005). The Design and Evaluation of a Vibrotactile Progress Bar (p. 499- 500). IEEE.
- Brewster, S., & Brown, L. M. (2004). Tactons: Structured Tactile Messages for Non-visual Information Display. In Proceedings of the Fifth Conference on Australasian User Interface - Volume 28 (p. 15–23). Darlinghurst, Australia: Australian Computer Society, Inc.
- Brill, J. C., Lawson, B. D., & Rupert, A. (2014). Tactile Situation Awareness System (TSAS) as a Compensatory Aid for Sensory Loss. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 58(1), 1028 - 1032.
- Brown, L. M. (2007). *Tactons: Structured Vibrotactile Messages for Non-Visual Information Display*. University of Glasgow, Department of Computing Science.
- Brown, L. M., Brewster, S. A., & Purchase, H. C. (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 (p. 167- 176).
- Buser, P., & Imbert, M. (1982). *Psychophysiologie sensorielle. 2: Neurophysiologie fonctionnelle*. Paris: Hermann.
- Cancar, L., Diaz, A., Barrientos, A., Travieso, D., & Jacobs, D. (2013). Tactile-Sight: A Sensory Substitution Device Based on Distance-Related Vibrotactile Flow. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 1.
- Cardin, S., Thalmann, D., & Vexo, F. (2006). A wearable system for mobility improvement of visually impaired people. *The Visual Computer*, 23(2), 109- 118.
- Carton, A., & Dunne, L. E. (2013). Tactile Distance Feedback for Firefighters: Design and Preliminary Evaluation of a Sensory Augmentation Glove. In Proceedings of the 4th Augmented Human International Conference (p. 58–64). New York, NY, USA: ACM.
- Castle, H., & Dobbins, T. D. (2004). Tactile displays for enhanced performance and safety (Vol. 5443, p. 269- 277). Présenté à Defense, Security, and Cockpit Displays, International Society for Optics and Photonics.
- Caston, J. (1993). *Psychophysiologie - Tome 1*. Paris: Ellipses-Marketing.

- Chan, A., MacLean, K., & McGrenere, J. (2005). Learning and Identifying Haptic Icons Under Workload. In Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (p. 432–439). Washington, DC, USA: IEEE Computer Society.
- Chang, A., O’Modhrain, S., Jacob, R., Gunther, E., & Ishii, H. (2002). ComTouch: Design of a Vibrotactile Communication Device. In Proceedings of the 4th Conference on Designing Interactive Systems: Processes, Practices, Methods, and Techniques (p. 312–320). New York, NY, USA: ACM.
- Cheung, B., & Bouak, F. (2009). *Using tactile cueing to enhance spatial awareness under degraded visual environment*. Toronto: Defence Research & Development Canada.
- Choi, S., & Kuchenbecker, K. J. (2013). Vibrotactile Display: Perception, Technology, and Applications. *Proceedings of the IEEE*, 101(9), 2093 - 2104.
- Cholewiak, R. W., Brill, J. C., & Schwab, A. (2004). Vibrotactile localization on the abdomen: Effects of place and space. *Perception & Psychophysics*, 66(6), 970 - 987.
- Cholewiak, R. W., & Collins, A. A. (1991). Sensory and physiological bases of touch. In M. A. Heller & W. Schiff (Éd.), *The psychology of touch* (p. 23- 60). Hillsdale, NJ, England: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Cholewiak, R. W., & Collins, A. A. (2000). The generation of vibrotactile patterns on a linear array: influences of body site, time, and presentation mode. *Perception & Psychophysics*, 62(6), 1220- 1235.
- Cholewiak, R. W., & Collins, A. A. (2003). Vibrotactile localization on the arm: Effects of place, space, and age. *Perception & Psychophysics*, 65(7), 1058 - 1077.
- Craig, J. C., & Johnson, K. O. (2000). The Two-Point Threshold: Not a Measure of Tactile Spatial Resolution. *Current Directions in Psychological Science (Wiley-Blackwell)*, 9(1), 29- 32.
- Craig, J. C., & Sherrick, C. E. (1982). Dynamic tactile displays. In *Tactual perception: A sourcebook* (Cambridge University Press, p. 209 - 233).
- Díaz, A., Barrientos, A., Jacobs, D. M., & Travieso, D. (2012b). Action-contingent vibrotactile flow facilitates the detection of ground level obstacles with a partly virtual sensory substitution device. *Human Movement Science*, 31(6), 1571 - 1584.

- Erp, J. B. F. V., Veltman, J. A., & Oving, A. B. (2003). Tactile torso display as countermeasure to reduce night vision goggles induced drift. In *Human Factors Research Institute, TNO* (p. 1–8).
- Eskildsen, P., Morris, A., Collins, C. C., & Bach-y-Rita, P. (2013). Simultaneous and successive cutaneous two-point thresholds for vibration. *Psychonomic Science*, 14(4), 146- 147.
- Fajen, B. R. (2005). Calibration, Information, and Control Strategies for Braking to Avoid a Collision. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31(3), 480- 501.
- Fajen, B. R. (2008). Learning novel mappings from optic flow to the control of action. *Journal of Vision*, 8(11), 12.1-12.
- Faugloire, E., & Lejeune, L. (2014). Evaluation of heading performance with vibrotactile guidance: The benefits of information–movement coupling compared with spatial language. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 20(4), 397- 410.
- Flach, J. M., Hagen, B. A., & Larish, J. F. (1992). Active regulation of altitude as a function of optical texture. *Perception & Psychophysics*, 51(6), 557- 568.
- François, M., Morice, A. H. P., Bootsma, R. J., & Montagne, G. (2011). Visual control of walking velocity. *Neuroscience Research*, 70(2), 214- 219.
- Gallace, A., & Spence, C. (2006). Multisensory synesthetic interactions in the speeded classification of visual size. *Perception & Psychophysics*, 68(7), 1191- 1203.
- Geldard, F. A. (1957). Adventures in tactile literacy. *American Psychologist*, 12(3), 115- 124.
- Geldard, F. A. (1960a). Some neglected possibilities of communication. *Science*, 131, 1583- 1588.
- Geldard, F. A. (1985). The mutability of time and space on the skin. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 77(1), 233- 237.
- Geldard, F. A., & Sherrick, C. E. (1972). The Cutaneous « Rabbit »: A Perceptual Illusion. *Science*, 178(4057), 178- 179.
- Gibson, J. J. (1950a). *The perception of the visual world* (Vol. xii). Oxford, England: Houghton Mifflin.
- Gibson, J. J. (1966b). *The senses considered as perceptual systems*. Oxford, England: Houghton Mifflin.

- Gibson, J. J. (1979b). *The ecological approach to visual perception* (Vol. xiv). Boston, MA, US: Houghton, Mifflin and Company.
- Goble, A. K., & Hollins, M. (1993). Vibrotactile adaptation enhances amplitude discrimination. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 93(1), 418- 424.
- Goble, A. K., & Hollins, M. (1994). Vibrotactile adaptation enhances frequency discrimination. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 96(2 Pt 1), 771- 780.
- Goldish, L. H., & Taylor, H. E. (1974). The Optacon: A Valuable Device for Blind Persons. *New Outlook for the Blind*.
- Gray, R. (2008). Multisensory Information in the Control of Complex Motor Actions. *Current Directions in Psychological Science*, 17(4), 244- 248.
- Gray, R. (2011). Looming Auditory Collision Warnings for Driving. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 53(1), 63 - 74.
- Gray, R., Ho, C., & Spence, C. (2014). A Comparison of Different Informative Vibrotactile Forward Collision Warnings: Does the Warning Need to Be Linked to the Collision Event? *PLoS ONE*, 9(1).
- Gray, R., & Tan, H. Z. (2002). Dynamic and predictive links between touch and vision. *Experimental Brain Research*, 145(1), 50- 55.
- Gunther, E., & O’Modhrain, S. (2003). Cutaneous Grooves: Composing for the Sense of Touch. *Journal of New Music Research*, 32(4), 369- 381.
- Hall, D. A., & Moore, D. R. (2003). Auditory Neuroscience: The Salience of Looming Sounds. *Current Biology*, 13(3), R91 - R93.
- Hartcher-O’Brien, J., Auvray, M., & Hayward, V. (2015). Perception of distance-to-obstacle through time-delayed tactile feedback. In *2015 IEEE World Haptics Conference (WHC)* (p. 7- 12).
- Hayward, V., Astley, O. R., Cruz- Hernandez, M., Grant, D., & Robles- De- La- Torre, G. (2004). Haptic interfaces and devices. *Sensor Review*, 24(1), 16- 29.
- Helson, H., & King, M. . S. (1931). The tau effect: an example of psychological relativity. *Journal of Experimental Psychology*, 14(3), 202- 217.
- Ho, C., Gray, R., & Spence, C. (2014). Reorienting Driver Attention with Dynamic Tactile Cues. *IEEE Transactions on Haptics*, 7(1), 86- 94.

- Ho, C., Reed, N., & Spence, C. (2006). Assessing the effectiveness of “intuitive” vibrotactile warning signals in preventing front-to-rear-end collisions in a driving simulator. *Accident Analysis & Prevention*, 38(5), 988 - 996.
- Ho, C., Spence, C., & Gray, R. (2013). Looming Auditory and Vibrotactile Collision Warning for Safe Driving. Présenté à 7th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design.
- Ho, C., Tan, H. Z., & Spence, C. (2005). Using spatial vibrotactile cues to direct visual attention in driving scenes. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8(6), 397- 412.
- Hoyle, F. (1957). *The black cloud*. Cutchogue, NY: Buccaneer Books.
- Huston, S. J., & Krapp, H. G. (2008). Visuomotor Transformation in the Fly Gaze Stabilization System. *PLOS Biology*, 6(7), e173.
- Jansen, C., Wennemers, A., Vos, W., & Groen, E. (2008). FlyTact: A Tactile Display Improves a Helicopter Pilot’s Landing Performance in Degraded Visual Environments. In M. Ferre (Éd.), *Haptics: Perception, Devices and Scenarios* (p. 867 - 875). Springer Berlin Heidelberg.
- Johansson, G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Perception & Psychophysics*, 14(2), 201 - 211.
- Jones, L. A., & Berris, M. (2002). The psychophysics of temperature perception and thermal-interface design (p. 137- 142). *IEEE Comput. Soc.*
- 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(1), 90- 111.
- Kaczmarek, K. A., Webster, J. G., Bach-y-Rita, P., & Tompkins, W. J. (1991). Electrotactile and vibrotactile displays for sensory substitution systems. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 38(1), 1- 16.
- Kaiser, M. K., & Mowafy, L. (1993). Optical specification of time-to-passage: Observers’ sensitivity to global tau. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19(5), 1028- 1040.

- Kim, N.-G., T. M., & Carello, C. (1993). Optical information about the severity of upcoming contacts. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19(1), 179- 193.
- Krausman, A. s., & White, T. L. (2006). Tactile Displays and Detectability of Vibrotactile Patterns as Combat Assault Maneuvers are Being Performed (No. ARL-TR-3998). ARMY RESEARCH LAB ABERDEEN PROVING GROUND MD HUMAN RESEARCH AND ENGINEERING DIRECTORATE, ARMY RESEARCH LAB ABERDEEN PROVING GROUND MD HUMAN RESEARCH AND ENGINEERING DIRECTORATE.
- Kupers, R., Sampaio, E., Moesgaard, S., Gjedde, A., & Ptito, M. (2003). Activation of visual cortex by electrotactile stimulation of the tongue in early-blind subjects. *Neuroimage*, 19(2).
- Larish, J. F., & Flach, J. M. (1990). Sources of optical information useful for perception of speed of rectilinear self-motion. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(2), 295 - 302.
- Lawson, B. D., Cholewiak, R. W., McGee, H., Mortimer, B. P., Parker, J. N., Chiaramonte, J. A., ... Rupert, A. H. (2015). Conveying Looming with a Localized Tactile Cue (No. USAARL-2015-10). ARMY AEROMEDICAL RESEARCH LAB FORT RUCKER AL WARFIGHTER HEALTH DIV.
- Lee, D. N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, 5(4), 437- 459.
- Lee, D. N., Weel, F. R. (Ruud) van der, Hitchcock, T., Matejowsky, E., & Pettigrew, J. D. (1992). Common principle of guidance by echolocation and vision. *Journal of Comparative Physiology A*, 171(5), 563 - 571.
- Lenay, C., Canu, S., & Villon, P. (1997). Technology and perception: the contribution of sensory substitution systems. In , Second International Conference on Cognitive Technology, 1997. Humanizing the Information Age. Proceedings (p. 44 - 53).
- Lenay, C., Gapenne, O., Hanneton, S., Marque, C., & Genouëlle, C. (2003). Sensory substitution: Limits and perspectives. In Y. Hatwell, A. Streri, & E. Gentaz (Éd.), *Touching for knowing: Cognitive psychology of haptic manual perception* (p. 276- 292). Amsterdam, Netherlands: John Benjamins Publishing Company.

- Lobo, L., Travieso, D., Barrientos, A., & Jacobs, D. M. (2014). Stepping on Obstacles with a Sensory Substitution Device on the Lower Leg: Practice without Vision Is More Beneficial than Practice with Vision. *PLOS ONE*, 9(6), e98801.
- Marks, L. E. (1987). On cross-modal similarity: Auditory–visual interactions in speeded discrimination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13(3), 384- 394.
- Martino, G., & Marks, L. E. (1999). Perceptual and linguistic interactions in speeded classification: tests of the semantic coding hypothesis. *Perception*, 28(7), 903 - 923.
- Martino, G., & Marks, L. E. (2000). Cross-Modal Interaction between Vision and Touch: The Role of Synesthetic Correspondence. *Perception*.
- Melara, R. D. (1989). Dimensional interaction between color and pitch. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15(1), 69- 79.
- Meng, F., Gray, R., Ho, C., Ahtamad, M., & Spence, C. (2015). Dynamic Vibrotactile Signals for Forward Collision Avoidance Warning Systems. *Human Factors*, 57(2), 329.
- Meng, F., Ho, C., Gray, R., & Spence, C. (2015). Dynamic vibrotactile warning signals for frontal collision avoidance: towards the torso versus towards the head. *Ergonomics*, 58(3), 411 - 425.
- Michaels, C. F., & Carello, C. (1981). *Direct perception*. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall.
- Mortimer, B. J. P., Zets, G. A., & Cholewiak, R. W. (2007). Vibrotactile transduction and transducers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(5 Pt1), 2970- 2977.
- Mortimer, B., Zets, G., Mort, G., & Shovan, C. (2011). Implementing Effective Tactile Symbolology for Orientation and Navigation. In J. A. Jacko (Éd.), *Human-Computer Interaction. Towards Mobile and Intelligent Interaction Environments* (p. 321 - 328). Springer Berlin Heidelberg.
- Nakamura, A., Tabata, S., Ueda, T., Kiyofuji, S., & Kuno, Y. (2005). Multimodal Presentation Method for a Dance Training System. In *CHI '05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (p. 1685–1688). New York, NY, USA: ACM.
- Nakayama, K. (1985). Extraction of Higher Order Derivatives of the Optical Velocity Vector Field: Limitations Imposed By Biological Hardware. In D. J. Ingle, M. Jeannerod, & D. N. Lee (Éd.), *Brain Mechanisms and Spatial Vision* (p. 59- 71). Springer Netherlands.

- Oakley, I., & Park, J. (2008). Did you feel something? Distracter tasks and the recognition of vibrotactile cues. *Interacting with Computers*, 20(3), 354- 363.
- Oskarsson, P.-A., Lif, P., Hedström, J., Andersson, P., Lindahl, B., & Tullberg, A. (2013). Visual, Tactile, and Bimodal Presentation of Lateral Drift in Simulated Helicopter. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 57(1), 1254- 1258.
- Petrosino, L., & Fucci, D. (1984). Temporal resolution of successive brief stimuli for the tongue and hand. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 22(3), 208 - 210.
- Petrosino, L., & Fucci, D. (1989). Temporal Resolution of the Aging Tactile Sensory System. *Perceptual and Motor Skills*, 68(1), 288 - 290.
- Pomes, A., Slater, M., & Giannopoulos, E. (2012). Touching the void: exploring virtual objects through a vibrotactile glove.
- Prudente, C. N., Stilla, R., Buetefisch, C. M., Singh, S., Hess, E. J., Hu, X., ... Jinnah, H. A. (2015). Neural Substrates for Head Movements in Humans: A Functional Magnetic Resonance Imaging Study. *The Journal of Neuroscience*, 35(24), 9163 - 9172.
- Rai, A. K., Suri, N., Braithwaite, M. G., & Rupert, A. (1999). The tactile Situation Awareness System in rotary wing aircraft : Flight test results. In *RTO Meeting proceedings* (p. 16.1 - 16.7).
- Regan, D., Gray, R., & Hamstra, S. J. (1996). Evidence for a neural mechanism that encodes angles. *Vision Research*, 36(2), 323- 330.
- Research and Technology Organization, & Human Factors and Medicine Panel. (2012). Rotary-wing brownout mitigation technologies and training = Remèdes contre le phénomène de brownout sur les appareils à voiture tournante. NATO Research and Technology Organisation.
- Riener, A., & Ferscha, A. (2008). Raising Awareness about Space via Vibro-Tactile Notifications. In D. Roggen, C. Lombriser, G. Tröster, G. Kortuem, & P. Havinga (Éd.), *Smart Sensing and Context* (Vol. 5279, p. 235 - 245). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Riener, A., & Hartl, H. (2012). "Personal Radar": A Self-governed Support System to Enhance Environmental Perception. In *Proceedings of the 26th Annual BCS Interaction Specialist Group* (p. 147 - 156).

- 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(4), 1003- 1012.
- Rupert, A. H. (2000). Tactile situation awareness system: proprioceptive prostheses for sensory deficiencies. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 71(9 Suppl), A92-9.
- Rupert, A. H., & Guedry, F. E. (1994). The use of a tactile interface to convey position and motion perceptions.
- Rupert, A. H., Guedry, F. E., & Reschke, M. F. (1994). The use of a tactile interface to convey position and motion perceptions.
- Sarter, N. B. (2006). Multimodal information presentation: Design guidance and research challenges. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36(5), 439- 445.
- Sarter, N. B., & Sklar, A. E. (1999). Good vibrations”: the use of tactile feedback in support of mode awareness on advanced technology aircraft. *Human Factors*, 41(4), 543- 552.
- Savelsbergh, G. J. P. (1993). Time-to-contact judgements based on haptic information. *Studies in Action and Perception II*, 100- 104.
- Savelsbergh, G. J. P., & Chen, S.-J. (1993). *Looming : an information source for avoiding and making contact* (Research and clinical center for child development Annual Report) (p. 49- 54).
- Schiff, W., & Oldak, R. (1990). Accuracy of judging time to arrival: Effects of modality, trajectory, and gender. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(2), 303- 316.
- Schmidt, R. F. (1999). *Physiologie*. De Boeck Supérieur.
- Self, B. P., van Erp, J. B. F., Eriksson, L., & Elliott, L. R. (2008). Human factors issues of tactile displays for military environments. In *Tactile Displays for Orientation, Navigation and Communication in Air, Sea and Land Environments* (p. 1- 18).
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (1948). *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: University of Illinois Press.
- Shaw, B. K., McGowan, R. S., & Turvey, M. T. (1991). An Acoustic Variable Specifying Time-to-Contact. *Ecological Psychology*, 3(3), 253- 261.

- Spelmezan, D., Jacobs, M., Hilgers, A., & Borchers, J. (2009). Tactile Motion Instructions for Physical Activities. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (p. 2243–2252). New York, NY, USA: ACM.
- Spence, C. (2002). Multisensory attention and tactile information-processing. *Behavioural Brain Research*, 135(1–2), 57- 64.
- Spence, C., & Driver, J. (1997). Cross-modal links in attention between audition, vision, and touch: Implications for interface design. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 1(4), 351- 373.
- Stevens, J. C., & Choo, K. K. (1996). Spatial Acuity of the Body Surface over the Life Span. *Somatosensory & Motor Research*, 13(2), 153- 166.
- Stoffregen, T. A., & Bardy, B. G. (2001). On specification and the senses. *Behavioural and Brain Sciences*, 24, 195- 261.
- Suto, Y. (1952). The effect of space on time estimation (S-effect) in tactual space. *Japanese Journal of Psychology*, (22), 189- 201.
- Tan, H., Gray, R., Young, J. J., & Taylor, R. (2003). A Haptic Back Display for Attentional and Directional Cueing.
- Tan, H. Z., Gray, R., Young, J. J., & Irawan, P. (2001). Haptic Cueing of a Visual Change-Detection Task: Implications for Multimodal Interfaces. In Proceedings of Human-Computer Interactions International (Vol. 1, p. 678- 682).
- Tan, H. Z., & Pentland, A. (1997). Tactual displays for wearable computing. *Personal Technologies*, 1(4), 225- 230.
- Töyssy, S., Raisamo, J., & Raisamo, R. (2008). Telling Time by Vibration. In SpringerLink (p. 924- 929). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Tsukada, K., & Yasumura, M. (2004). ActiveBelt: Belt-Type Wearable Tactile Display for Directional Navigation. In UbiComp 2004: Ubiquitous Computing (p. 384- 399). Springer, Berlin, Heidelberg.
- van Erp, J. (2005). Vibrotactile spatial acuity on the torso: effects of location and timing parameters. In Eurohaptics Conference, 2005 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005. World Haptics 2005. First Joint (p. 80- 85).

- Van Erp, J. B. (2002). Guidelines for the use of vibro-tactile displays in human computer interaction. In Proceedings of Eurohaptics (Vol. 2002, p. 18–22).
- Van Erp, J. B. (2005). Presenting directions with a vibrotactile torso display. *Ergonomics*, 48(3), 302 - 313.
- van Erp, J. B. F. (2000). Tactile Navigation Display, 2058, 165- 173.
- van Erp, J. B. F. (2005). Vibrotactile spatial acuity on the torso: effects of location and timing parameters (p. 80- 85). Présenté à First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics Conference, IEEE.
- van Erp, J. B. F., Saturday, I., & Jansen, C. (2006). Application of tactile displays in sports : where to, how and when to move.
- van Erp, J. B. F., & van Veen, H. A. H. C. (2004). Vibrotactile in-vehicle navigation system. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 7(4–5), 247- 256.
- van Erp, J. B. F., van Veen, H. A. H. C. V., Jansen, C., & Dobbins, T. (2005). Waypoint Navigation with a Vibrotactile Waist Belt. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 2(2), 106–117.
- van Erp, J. B. F., Veltman, A., & van Veen, H. A. H. C. (2003). A Tactile Cockpit Instrument to Support Altitude Control. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 47(1), 114- 118.
- van Erp, J. B. F., & Werkhoven, P. J. (2004). Vibro-tactile and visual asynchronies: sensitivity and consistency. *Perception*, 33(1), 103- 111.
- van Veen, H. A. H. C., & van Erp, J. B. F. (2003). Providing directional information with tactile torso displays.
- van Veen, H. A. H. C., van Erp, J. B. F., & Spape, M. (2004). Waypoint navigation on land : different ways of coding distance to the next waypoint. In Proceedings of the Eurohaptics (p. 160- 165).
- van Veen, H. A., & van Erp, J. B. F. (2001). Tactile information presentation in the cockpit. In S. Brewster & R. Murray-Smith (Éd.), *Haptic Human-Computer Interaction* (p. 174- 181). Springer Berlin Heidelberg.
- Verrillo, R. T. (1962). Investigation of Some Parameters of the Cutaneous Threshold for Vibration. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(11), 1768- 1773.

- Verrillo, R. T., & Gescheider, G. A. (1975). Enhancement and summation in the perception of two successive vibrotactile stimuli. *Perception & Psychophysics*, 18(2), 128 - 136.
- Visell, Y. (2009). Tactile sensory substitution: Models for enaction in HCI. *Interacting with Computers*, 21(1-2), 38- 53.
- von Békésy, G. (1959). Synchronism of Neural Discharges and Their Demultiplication in Pitch Perception on the Skin and in Hearing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 31(3), 338- 349.
- Warren, W. H. (1988). Chapter 14 Action Modes and Laws of Control for the Visual Guidance Of Action. In O. G. M. and K. Roth (Éd.), *Advances in Psychology* (Vol. 50, p. 339- 379). North-Holland.
- Weber, E. H. (1834). *De Pulsu, resorptione, auditu et tactu: Annotationes anatomicae et physiologicae ...* C.F. Koehler.
- Weber, E. H. (1934). *De tactu*. Leipzig: Koehler.
- Weinstein, S. (1968). Intensive and Extensive Aspects of Tactile Sensitivity as a Function of Body Part, Sex and Laterality, 195- 218.
- Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3(2), 159- 177.
- Wickens, C. D. (2008). Multiple Resources and Mental Workload. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50(3), 449- 455.
- Wolpert, L. (1988). The Active Control of Altitude over Differing Texture. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 32(2), 15- 19.
- Yakimoff, N., Mateeff, S., Ehrenstein, W. H., & Hohnsbein, J. (1993). Motion Extrapolation Performance: A Linear Model Approach. *Human Factors*, 35(3), 501 - 510.
- Yilmaz, E. H., & Warren, W. H. (1995). Visual control of braking: A test of the tau dot hypothesis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(5), 996- 1014.
- Zhang, Z., Tannan, V., Holden, J. K., Dennis, R. G., & Tommerdahl, M. (2008). A quantitative method for determining spatial discriminative capacity. *Biomedical Engineering Online*, 7, 12.

Zöllner, M., Huber, S., Jetter, H.-C., & Reiterer, H. (2011). NAVI – A Proof-of-Concept of a Mobile Navigational Aid for Visually Impaired Based on the Microsoft Kinect. In P. Campos, N. Graham, J. Jorge, N. Nunes, P. Palanque, & M. Winckler (Éd.), *Human-Computer Interaction – INTERACT 2011* (p. 584- 587). Springer Berlin Heidelberg.

Annexes

Annexe n°1 : Retranscription de l'entretien avec le pilote d'hélicoptère du SAMU 61 – CHIR d'Alençon (14/02/2014)

Cynthia Mandil : Comment s'effectue l'atterrissage en termes de commandes d'abord ?

Pilote : Alors je vais parler d'abord en termes visuels. D'abord on vient chercher notre axe, c'est-à-dire qu'on vient s'aligner. Pour l'atterrissage en lui-même, il faut maintenir une attitude. Ensuite, il faut que je vous explique les trois commandes. On utilise le manche collectif, qui se situe au milieu, qui nous permet de mettre de l'angle sur toutes les pales en même temps et d'initier la descente.

Nicolas Benguigui : Mettre de l'angle, c'est-à-dire incliner pour avoir plus de portance ?

Je vous propose d'aller regarder la machine pour vous expliquer les commandes.

Donc vous avez trois commandes. Vous avez le collectif qui est là, qu'on monte et qu'on descend. Le cyclique, que l'on met dans toutes les positions. Et les palonniers ici.

Avec deux commandes ?

Oui, avec les deux pieds. À droite, à gauche. Ensuite, les deux commandes ici, le collectif et le cyclique, commandent le rotor principal. Le palonnier, au niveau des pieds, commande le rotor anti-couple.

Donc on va commencer par parler du rotor principal. Pour qu'un hélicoptère vole, il faut lui mettre de l'angle sur les pales. Lorsque vous mettez de l'angle sur les pales, et que le rotor tourne, cela donne de la portance et permet à l'hélicoptère de décoller.

Laure Lejeune : Dans quel sens doit être l'inclinaison pour élever l'appareil ?

Là, l'angle il est positif. Lorsque la pale tourne il peut monter. Cela crée une dépression sur le dessus et permet à l'hélicoptère de monter vers le haut. Donc cette commande, qui permet d'élever l'hélicoptère, est assurée par la commande de gauche, le collectif. Lorsque l'on tire, cela met de l'angle sur toutes les pales et fait monter l'hélicoptère vers le haut. Lorsque tu le baisses, cela diminue l'angle des pales et tu descends. Donc la puissance des moteurs qui est donnée au rotor principal permet de reprendre totalement le poids de la machine. Le but, c'est de mettre une force supérieure au poids de la machine.

La commande de cyclique est plus compliquée. Lorsque le cyclique est mis vers l'avant, cela incline le rotor vers l'avant. Lorsque le rotor s'incline vers l'avant, la force s'incline vers l'avant. Pour incliner le rotor vers l'avant, il faut que tu mettes plus d'angle lorsque les pales passent derrière et moins lorsqu'elles passent devant. Pour virer à droite, c'est la même chose, tu mets plus d'angle lorsque les pales passent à gauche et moins lorsqu'elles passent à droite. Pareil pour aller à gauche. Pour faire marche arrière, tu mets ton cyclique vers l'arrière, tu mets plus d'angle quand les pales passent devant et moins lorsqu'elle passe par derrière.

Donc en fait, avec les commandes tu pilotes le rotor, sachant que le rotor tourne toujours à la même vitesse. Si la vitesse variait, la portance varierait également. En fait, il y a deux solutions pour propulser un appareil, soit tu mets tout à la même vitesse et tu fais varier l'angle, soit tu laisses le même angle et tu fais varier la vitesse. On s'est rendu compte que faire varier la vitesse sans toucher à l'angle était très compliqué. Faire varier l'angle est très complexe également car selon sa position (i.e. le rotor), son angle change tout le temps et de plus avec un mouvement combiné. Le collectif, met de l'angle sur toutes les pales en même temps et l'angle varie également que le cyclique soit vers l'avant ou vers l'arrière.

Cela signifie que sur une rotation l'angle change constamment ?

Alors c'est encore plus compliqué que cela.

Pour avoir un ordre d'idées, quelle est la vitesse de rotation ?

Cela fait 400 tours par minute à peu près. Ce n'est pas si rapide que cela, car le moteur pour maintenir le couple, tourne à 140 000 tours par minutes.

Justement, qu'est-ce qu'un couple ?

Le couple correspond à la vitesse de l'air qui empêche la pale de tourner et qu'il faut vaincre. Plus les pales tournent vite, plus la résistance est grande. Pour la vaincre, il faut mettre beaucoup d'efforts. C'est comme pour démarrer à vélo, la vitesse à mettre au départ est plus importante. Et bien, c'est pareil pour le rotor. Il faut mettre énormément de couple au départ pour faire démarrer l'appareil. Après une fois que c'est parti, c'est moins compliqué. C'est pour ça que les meilleurs hélicoptères fonctionnent avec une turbine qui donne énormément de couple.

Donc cela fait deux degrés de liberté ?

Oui deux degrés.

Donc les trois manœuvres servent durant la phase d'atterrissage ?

Oui. Donc maintenant je vais vous parler des commandes aux pieds. L'hélicoptère agit de façon à ce que lorsque le rotor tourne, la cellule tourne dans le sens inverse. Pour empêcher ce mouvement, on a mis une force transversale pour empêcher cette rotation. Le problème, c'est que si tu fais varier la puissance du rotor principal, il faut changer la force de réaction à l'arrière. Si tu mets plus de puissance, il faut plus de couple à l'arrière pour empêcher la cellule de tourner dans l'autre sens. Pour contrôler cette force de compensation on utilise la pédale. La pédale fait varier l'angle des pales et donc la puissance de la force de compensation.

Donc c'est le même principe que le rotor, on ne peut pas contrôler la puissance mais uniquement l'angle ?

Oui, c'est toujours la même vitesse à 2000 tours minutes et on ne fait varier que l'angle. Et cet angle-là, tu le fais varier avec tes pieds. C'est pour cela que le petit

rotor est loin de la cellule, car on profite du bras de levier et on limite la force nécessaire pour contrer le mouvement de la cellule.

Et du coup, pourquoi a-t-on besoin de deux pédales ?

Car il faut que tu l'orientes soit à gauche soit à droite, sinon tu ne peux pas revenir dans l'autre sens. L'intérêt, c'est que lorsque tu es en vol stationnaire peux faire varier cette force pour tourner sur toi-même. Du coup, ce qui était une simple force contre le mouvement de l'appareil devient une vraie commande. Le problème, c'est que cette force est plus basse que celle du rotor principal et cela a tendance à faire retourner la machine dans l'autre sens. Pour contrer cela, on a incliné le rotor principal légèrement vers la gauche. Cela a pour conséquence de faire dériver l'appareil, c'est pourquoi les pales ont été légèrement inclinées.

Et comment avez-vous l'information sur la dérive ?

Cette information on ne l'a pas, car elle est corrigée mécaniquement.

Ce qu'il faut retenir, c'est qu'il y a deux commandes pour le rotor principal. Pour monter et descendre, tu peux incliner le rotor de droite à gauche, devant et derrière. Il commande pour contrôler le petit rotor et empêcher l'hélico de tourner sur lui-même et te permet de contrôler ta symétrie de vol.

Maintenant je vais pouvoir vous expliquer comment se passe le pilotage. Pour que l'hélicoptère puisse monter il faut lui donner une certaine puissance. Lorsqu'on veut aller vers l'avant il faut incliner le disque rotor vers l'avant. Pour que l'hélicoptère puisse aller vers le haut il faut augmenter la puissance. Arrivé à la vitesse de 30 nœuds (60 km/h) le rotor se comporte comme un avion, plus il y a de portance, moins il faut de puissance pour continuer à accélérer. Durant la phase de décollage et d'atterrissage, on se trouve dans cette plage-là (voir phase 1 sur la figure). Au contraire dans un avion, plus tu as de puissance, plus tu accélères et plus tu as de portance. Tu as une relation linéaire entre la puissance et la vitesse.

Lorsque tu veux atterrir, tu réduis ta vitesse à environ 60 nœuds. Tu pousses le cyclique vers arrière pour diminuer la puissance de la machine et donc ta vitesse.

Puis tu vas te retrouver dans cette phase là (voir phase 2 sur la figure). Au fur et à mesure que la vitesse diminue tu vas avoir besoin de plus en plus de puissance. Au bout d'un moment, tu vois que la machine s'écroule, tu es obligé de remettre un peu de puissance, mais tu le fais visuellement tu ne réfléchis pas à tes courbes de puissance. Arrivé vers la fin tu te retrouves là, à très basse vitesse et là tu dois refaire l'inverse (voir phase 3 sur la figure). Visuellement tu vois que la machine à reprend de la hauteur donc tu remets le cyclique vers le bas.

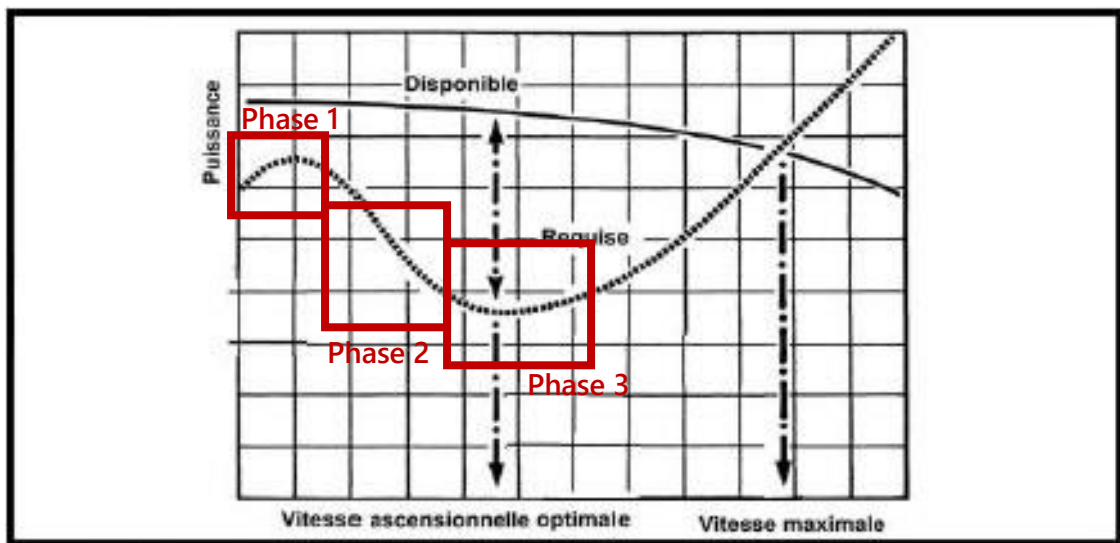


Diagramme de puissance requise et disponible.

Et pendant que vous faites tout cela, vous utilisez également les deux pédales pour compenser le mouvement de la cellule ?

Oui, pour garder la symétrie de vol.

Lorsque vous dites visuellement, il s'agit bien de l'environnement extérieur ?

Oui, je regarde dehors tout le temps. Tu jettes juste un coup d'œil de temps en temps sur la vitesse pour savoir où tu en es. On se contente de regarder dehors et de maintenir son plan de descente. Si on est trop haut sur le plan de descente, on baisse la puissance ; si on est trop bas, on augmente la puissance.

Concernant la trajectoire de l'hélicoptère lorsqu'il atterrit, parce que vous nous parlez de plan de descente.

Alors tu as ta dalle qui est là, et ton mouvement va faire cela [trajectoire inclinée de l'appareil selon un plan de descente].

Et donc à aucun moment vous n'avez un mouvement vertical ?

Non, à part dans certains cas. Par exemple quand tu atterris dans une zone avec des arbres hauts de chaque côté, la tu es obligé.

Même lorsque vous atterrissez au CHU, avec une surface étroite ?

Oui, j'atterris de la même manière.

Et l'angle d'atterrissage il est d'environ combien ?

Il est variable, mais idéalement il est à trois degrés soit environ cinq pourcent. Si l'environnement ne le permet pas, tu t'adaptes mais si tu choisis un angle plus élevé c'est plus difficile à tenir.

C'est le même principe pour les avions ?

Oui, c'est comme un avion mais avec des commandes différentes. De plus, l'hélicoptère a deux moteurs. À basse vitesse un seul moteur n'est pas capable de fournir la puissance nécessaire au vol. Le second motor fournit une sauvegarde. Donc tant que vous êtes au-dessus de cette vitesse vous savez que vous pouvez vous en sortir avec un seul moteur. Alors que lorsque vous êtes là si vous perdez un moteur, vous n'êtes plus capable de voler. C'est important, car cela nous donne une vitesse de décision qui est à environ trente nœuds. Les avions ont également des vitesses de décision pour le décollage, au-delà d'une certaine vitesse ils sont obligés de décoller.

Pour le décollage, tu fais la même chose mais à l'inverse. On s'imagine souvent que le décollage effectue en allant vers l'avant. Sauf que si tu vas en avant et que tu perds un moteur, tu peux ne plus t'arrêter et atterrir hors de la piste. Pour éviter cela, on commence par reculer comme ça même si tu perds un moteur tu peux

atterrir à l'intérieur de la piste. Donc on va reculer jusqu'à arriver à la vitesse de décision nous permettant d'assurer le vol, puis partir vers l'avant.

Et si on revient à la phase d'atterrissage, elle s'initie à environ quelle hauteur ou vitesse ?

C'est difficile à dire, car au contraire d'un avion nous ne sommes pas obligés d'atterrir face à la piste. Difficile de déterminer à quel moment débute la phase d'atterrissage. La seule obligation, c'est d'être aligné à la piste lorsque la vitesse de 30 nœuds est atteinte. Car en cas de panne de moteur, c'est beaucoup plus compliqué de gérer à la fois le virage et la descente.

À trente nœuds, qu'elle est à peu près la position de l'appareil ?

On se situe environ 200 m.

En altitude ou en distance ?

En distance.

Et l'altitude est d'environ combien ?

C'est variable, car tu peux prendre l'angle que tu veux.

Qualitativement cela ne change rien à la manœuvre [la valeur de l'angle choisi] ?

Ça va influencer uniquement l'amplitude des commandes. Plus la pente faible moins tu dois donner d'amplitude commandes, car tu as moins de taux de chute à gérer. Plus elle est importante plus tu dois mettre d'amplitude.

Donc pour récapituler l'effet des commandes lors de l'atterrissage.

Le collectif pour aller en haut ou en bas et le cyclique pour régler la vitesse. Sachant que tout est lié. Ce qu'il faut savoir c'est que chaque fois que tu inclines le rotor, tu peux partir à droite. Ça inclina portance, et donc diminue la vitesse verticale, il faut donc que tu mettes plus de puissance.

Donc les deux commandes [le cyclique et le collectif] fonctionnent toujours à deux ?

Oui, toujours un peu. Et c'est pareil pour le retour de queue.

Et les 200 m pour l'atterrissage, c'est à vue ?

Oui, il faut de la visibilité. Si tu n'en as pas, tu peux utiliser les instruments.

Lorsque vous êtes en haut du plan de descente, ou est-ce que vous regardez ?

Je regarde la piste, tout le temps. Avec de temps en temps un coup d'œil pour vérifier ma vitesse pour regarder où tu en es au niveau de ta vitesse de décision. Si j'arrive à la vitesse de décision et que je ne suis pas bien, je sais que je peux remettre les gaz pour recommencer.

Donc ce qui est le plus important pour vous de savoir c'est la vitesse ou l'altitude ?

C'est les deux, c'est une combinaison.

Et pour gérer l'altitude, c'est que visuel ?

Oui, c'est essentiellement visuel.

Pour la vitesse, il s'agit de la vitesse horizontale verticale ?

C'est la vitesse d'avancement. Mais avec la faible pente d'atterrissage, il y a quasiment que la vitesse horizontale qui compte.

Et donc l'atterrissage consiste à mettre une force opposée à la gravité ?

Exactement. La force te permet simplement contrôler le taux de chute.

Et concernant la vitesse verticale, vous essayez de la contrôler ?

Oui, notamment à cause de ce qu'on appelle le vortex. Lorsque l'hélicoptère descend, l'air passe de bas en haut.

C'est l'effet de sol ?

Oui, c'est lié. Donc l'air qui passe de haut en bas d'une vitesse d'environ 700 pieds par minute, donc si tu voles une vitesse verticale égale à sept pieds par minutes tu te retrouves pris dans le remous créé par l'air et ta machine ne peut pas décoller. Si tu mets plus de puissance, tu crées plus de remous et tu as plus de chances de te retrouver au sol. Donc dès que tu vois que tu descends trop vite il faut que tu mettes moins de gaz.

Et vous vous en apercevez visuellement de la perte d'altitude ?

Lorsque tu es près du sol oui mais à haute altitude tu ne peux le voir qu'aux instruments.

Et au niveau de la prise d'informations durant l'atterrissage, même si c'est difficile de se rendre compte, quelles informations avez-vous l'impression de prendre ?

En fait, je vérifie constamment que je suis bien sur mon plan de descente. Donc je regarde sans arrêt la dalle en dessous. Vous voyez très bien car vous avez une barre à l'intérieur de la cabine et j'essaie de la maintenir sur un point fixe situé au sol. Si la barre s'écarte je gère mon taux de chute pour la ramener sur mon point fixe. Je jette un coup d'œil de temps en temps à mon taux de chute et où j'en suis par rapport à ma vitesse de décision.

Est-ce que vous avez un instrument qui vous indique l'angle de descente ?

Non, mais ça n'a aucun intérêt car tu vois tout visuellement. On a juste un indicateur qui nous indique si on est au-dessus ou en dessous du plan de trois degrés, mais on n'a pas la valeur exacte.

Au niveau des commandes, est-ce que vous les maintenez dans une position jusqu'à la fin ou est-ce sans arrêt de la régulation ?

C'est de la régulation, car tu es toujours un petit peu trop haut ou un petit peu trop bas par rapport à ton plan de descente. Mais c'est infime comme régulation. Lorsque tu veux faire de grandes manœuvres, tu vas avoir des régulations

beaucoup plus amples. Mais lors des phases d'approche, ce sont de toutes petites régulations continues.

Est-ce qu'il y a des situations où les informations visuelles sont insuffisantes ?

Déjà la nuit, c'est beaucoup plus compliqué, tu n'as plus tous les éléments aux alentours pour t'aider. Par exemple, ici je me repère par rapport au gros bloc de l'hôpital. Ou encore le creux là-bas, que je ne vois pas en atterrissage de nuit.

Le deuxième cas c'est lorsque vous avez des repères visuels qui sont diffus. C'est le cas par exemple en cas de brouillard. Et pareil, les repères sont beaucoup plus difficiles à percevoir.

Et dans ces cas-là, vous fiez beaucoup plus aux instruments ?

Tu es beaucoup plus prudent plus attentionné par rapport à ce qui se passe.

Et la manœuvre prend plus de temps alors ?

Oui, d'autant plus que tu as plus de latence avant de t'apercevoir que tu es mal présenté.

Le dernier cas c'est lorsque tu te poses sur un fond uniforme. Par exemple, lors d'un atterrissage sur une plate-forme en mer. Là, c'est pareil tu n'as plus aucun repère visuel.

Le fait qu'il y ait des éléments de sol, cela vous aide pour l'atterrissage ?

Oui, tout à fait. Et donc là, on entre dans le domaine du treuillage. Lorsque tu fais un treuillage que tu ne vois pas le bateau qui est juste en dessous de la machine, c'est très compliqué car tu n'as rien pour t'aider en périphérie. Situé en campagne, tu as toujours un arbre ou quelque chose qui va t'aider.

Lorsqu'il y a moins d'éléments dans l'environnement, vous percevez moins bien les variations altitude ?

Oui, tout à fait. Lorsque tu fais un treuillage en mer, tu peux complètement sortir de l'axe du bateau sans t'en rendre compte. Donc c'est le treuiller qui va t'indiquer si tu dois aller un petit peu à gauche, un petit peu à droite.

Il n'y a aucun instrument qui peut vous aider dans cette situation ?

Si, il y a certains appareils ou le treuillage se fait aux commandes. Mais ça reste très compliqué de manœuvrer dans tous les environnements uniformes comme la mer, la neige.

Sur le sable également ?

Oui, le sable est très dangereux. Car avec le vent le sable se met à tourner.

[Interruption de quelques minutes suite à un coup de téléphone]

Pour effectuer un vol stationnaire, comment vous procédez au niveau des commandes ?

Souvent tu te repères par rapport à un arbre. Donc si tu veux que tu avances par rapport à ton arbre tu vas jouer sur les commandes pour te remettre dans sa position. Tu fais tout visuellement, tu ne regardes pas les instruments.

Donc là encore c'est de la régulation continue, vous êtes tout le temps en train de jouer sur les commandes ?

Oui, mais tu pleins d'interaction entre les trois. Comme ce sont des mouvements infimes, toujours très peu sur le collectif. Tu fais très peu de correction au final.

Ce qui peut se passer lors du treuillage c'est que tu te mets à changer de cap, c'est-à-dire que tu tournes sur toi-même. Si tu n'as pas beaucoup d'informations visuelles, tu ne t'en aperçois pas visuellement et là tu dois regarder tes instruments. Et ensuite avec les pieds tu corriges.

Ces trois commandes sont utilisés pour maintenir ton vol stationnaire. Alors qu'en ligne de vol les pieds sont très peu utilisés puisque tu as beaucoup de vitesse. Donc là c'est comme pour un avion, tu n'as plus que deux commandes à gérer. Et même le collectif, tu ne t'en sers pas beaucoup car souvent tu choisis ta puissance et gère ensuite le cyclique.

D'ailleurs, à noter que tu inverses les commandes. Au début, je te disais que la hauteur tu la gérait avec le collectif et le cyclique pour aller en avant ou en arrière. Alors que lorsque tu es en navigation, le collectif on n'y touche plus et on gère la hauteur avec le cyclique.

Pour revenir sur le collectif, comment fonctionne la commande ? Est-ce que l'on gère un rapport de position, donc tant que je mets la force ça induit un mouvement ?

Non, en fait c'est une position mécanique.

Donc finalement c'est un curseur qu'on place ?

Oui, tout à fait. Donc tu as ta commande, lorsque tu la places vers le haut, tu as tout ton plateau qui monte vers le haut.

Concernant les informations auditives, est-ce que vous vous en servez ?

Si, en cas de panne, je vais être prévenu avec un bip. On entend un bip lorsqu'il revient sur le tableau de bord pour voir de quel type de panne il s'agit.

On a également des informations auditives pour les vitesses de décision. Avant de te poser, tu règles ta vitesse de décision et lors de l'atterrissage, tu entends un bip qui indique que tu as atteint cette vitesse de décision. Ça te permet de regarder un maximum de temps dehors.

Donc ça fait partie des choses que tous les pilotes doivent faire avant de se poser ?

Oui, c'est dans nos procédures, tout le monde doit afficher son point de décision.

Annexe n°2 II : Formulaire de consentement type



UNIVERSITE de CAEN BASSE-NORMANDIE

UFR STAPS

Equipe d'Accueil 4260 – CesamS



FORMULAIRE DE CONSENTEMENT

Dans le cadre de la réalisation d'une étude intitulée « **Intitulé de l'expérimentation** » au sein du laboratoire CesamS de L'UFR STAPS de Caen, nous sollicitons votre participation volontaire. Cette expérience ne comporte aucun risque physique ou mental. L'équipement porté produit de faibles vibrations à la surface de la peau, parfaitement indolores et sans danger d'aucune sorte. Pour des raisons d'éthique, de formalisme et d'acquis intellectuels, nous vous prions de bien vouloir remplir et de signer le paragraphe en dessous, tout en vous indiquant que vous disposez d'un droit de rétractation inaliénable avant et pendant l'expérience.

Je soussigné(e), accepte de prendre part volontairement et en l'absence de toute contrainte à l'expérience intitulée « **Utilisation des informations vibrotactiles pour la régulation d'approche au sol** ».

Faire précéder la signature de la mention " lu et approuvé".

A le / /

Signature

Merci de votre participation.

Table des figures

Figures

| | |
|--|----|
| Figure 1.1 – Les différentes couches cutanées et leurs mécanorécepteurs (d'après Spelmezan, 2011 et adapté de Goldstein, 2002). | 21 |
| Figure 1.2 – <i>L'homoconlus</i> , une représentation des capacités sensibles de la peau. La taille de chaque zone corporelle est représentée proportionnellement à la densité de récepteurs ainsi qu'à la zone dédiée au niveau cérébral (http://lemonde.fr , adapté de Prudente et al., 2015)..... | 24 |
| Figure 1.3 – Seuil de discrimination de deux points et erreur de localisation à différentes localisations corporelles (d'après Weinstein, 1968)..... | 26 |
| Figure 1.4 – Seuils de discrimination vibrotactiles au niveau de 9 localisations réparties autour de de l'abdomen et du dos. Les seuils ont été mesurés au niveau de l'abdomen, avec des vibrateurs placés horizontalement (au-dessus et de part et d'autre du nombril) ou verticalement (au-dessus et à gauche du nombril). Pour le dos, les vibrateurs étaient disposés verticalement, (sur, et de part et d'autre de la colonne vertébrale, et sur le flanc gauche) – d'après van Erp, 2005. | 27 |
| Figure 1.5 – Représentation du phénomène de saltation. Le premier graphique (gauche) indique comment la peau est réellement stimulée au niveau des trois localisations. Le second (droite) représente la sensation perçue, les cercles blancs indiquant les stimulation perçues à des localisations différentes de leur localisation réelle (d'après Spelmezan, 2011). | 30 |
| Figure 1.6 – Valeurs temporelles moyennes pour lesquelles les stimuli sont jugés comme étant simultanées, en mouvement ou successifs (d'après Sherrick et Rogers, 1966). | 31 |
| Figure 1.7 – Architecture globale d'un dispositif de substitution sensorielle (d'après Visell, 2009). | 35 |
| Figure 1.8 – Vibrateurs inertiels (a) de forme plate (haut) et cylindrique (bas) – d'après Spelmezan (2011). Vibrateur linéaires (b)..... | 36 |
| Figure 1.9 – Principe de fonctionnement des vibrateurs de type inertiel (a) et linéaire (b). Les vibrateurs inertiels produisent une vibration par rotation d'une masse encapsulée. Le mouvement de rotation peut être perpendiculaire (1) ou parallèle (2) à la peau. Les vibrateurs linéaires produisent une vibration grâce au mouvement linéaire et perpendiculaire à la peau d'une masse semi-encapsulée. | 36 |

| | |
|---|----|
| Figure 1.10 – Différentes formes d’activation des vibrateurs : sinusoïdale (a), triangulaire (b) et rectangulaire (c)..... | 37 |
| Figure 1.11 – Le TVSS, dispositif de substitution visuotactile convertissant en stimuli vibrotactiles des images captées par une caméra (d’après Bach-y-Rita, 1969). | 39 |
| Figure 1.12 – L’Optacon, dispositif de substitution sensorielle permettant de convertir en stimuli vibrotactile tout support écrit. | 39 |
| Figure 1.13 – Le TSAS, dispositif composé d’une matrice de vibrateurs couvrant l’ensemble du tronc. Chaque vibrateur est associé à une direction de l’espace et s’active pour attirer l’attention ou guider le mouvement (d’après Rupert et al., 1994). | 40 |
| Figure 1.14 – Utilisation d’un dispositif tactile pour améliorer la coordination de rameuses (van Erp et al., 2006)..... | 42 |
| Figure 1.15 – Utilisation de l’intensité comme paramètre de codage. Une intensité croissante peut être obtenue en augmentant l’amplitude (a) ou la fréquence (b) de vibration. | 48 |
| Figure 1.16 – Caractéristiques temporelles d’un patron composé de plusieurs vibrations successives. | 50 |
| Figure 2.1 – Dans l’étude de Johansson (1973), la vue des points lumineux statiques n’évoquent rien de particulier (figure du bas), alors que mis en mouvement par l’activité du sujet, ils sont perçus comme une forme humaine (d’après Michaels & Carello, 1981). | 58 |
| Figure 2.2 – Résultats de l’étude de Warren (1988), montrant le pourcentage d’obstacle franchit en fonction de sa hauteur (a) et du rapport entre la hauteur et la taille du sujet (b), d’après Michaels & Carello (1981)..... | 59 |
| Figure 2.3 – Exemple de flux optique généré par un mouvement de rotation (représentation 3D et 2D ; Huston & Krapp, 2008). | 62 |
| Figure 2.4 – Illustration de la taille angulaire d’un objet (θ)..... | 63 |
| Figure 2.5 – Evolution de la taille angulaire d’un objet au cours d’une approche et pour différentes tailles physiques. Conditions initiales : distance de l’objet = 6 m ; vitesse d’approche = 20 m/s..... | 64 |
| Figure 2.6 – Différents types de textures donnant accès au <i>splay angle</i> et au <i>depression angle</i> : (a) perpendiculaires ou (b) parallèles à la trajectoire et en quadrillage. | 68 |
| Figure 2.7 – Illustration des patrons utilisés par van Veen et al. (2004). Entre deux waypoints, le rythme de vibration varie selon la distance restante à parcourir. Le codage « monotone » utilise un ISI qui décroît proportionnellement à la distance restante (de 10 à | |

0 secondes). Le codage en trois phase utilise trois types de rythme, associés une phrase spécifique de l'approche.....72

Figure 2.8 – Schéma expérimental utilisé par Riener & Hartl (2012). Les participants démarrait à 6, 5 ou 4 mètres du mur et devaient s'avancer jusqu'à 40 du mur. Le dispositif tactile s'activait à moins de 2 mètres du mur, selon deux types de rythmes. Les intervalles de distance « far », « near » et « close » correspondent à trois rythme de vibration différents.73

Figure 2.9 – Schématisation des différents patrons utilisés par Asif et al. (2010). Dans le premier codage, le rythme diminue à mesure que l'on s'approche du croisement. Dans le second, le rythme diminue et l'intensité augmente en fonction de la distance. Le dernier codage fait varier le nombre et la durée des vibrations.74

Figure 2.10 – Patrons variant en intensité (haut) et en rythme (bas) utilisés par Riener et Ferscha (2008). Les six graphiques représentent, pour trois distances (4.35, 2.17, 0 mètres), le niveau d'activation (en 100% de l'intensité maximale) en fonction du temps.78

Figure 2.11 – Stimulations spatiales utilisées dans différentes études pour fournir des informations d'approche. Deux études ont utilisé trois vibreur avec une activation vers la tête, les deux autres ont utilisé deux vibreurs avec une activation vers le torse (d'après Meng et al., 2015).....84

Figure 2.12 – Illustration des stimulations utilisées par Cancar et al. (2013) pour transmettre des informations sur la variable optique tau. La configuration de la stimulation tactile dépend de la taille angulaire de l'objet en approche.86

Figure 2.13 – Représentation schématique de la relation entre le niveau d'activation de tateurs et la position du sujet dans l'environnement. La position A est celle de référence, tous les tateurs ont le même niveau d'activation. En position B, l'inclinaison vers l'avant du sujet augmente le niveau d'activation, augmentation d'autant plus importante que les tateurs sont situés vers le haut. La position C illustre le cas, où le sujet est incliné vers l'arrière et où la distance avec l'objet le plus proche (le sol) augmente, au-delà d'une certaine distance, les tateurs sont à leur niveau d'activation le plus bas. La situation D représente la stimulation perçue lorsqu'un élément est présent au sol (d'après Diaz et al., 2011).88

Figure 2.14 – Modèle de Wickens (2002). Le codage, la modalité, le stade et la réponse constituent 4 dimensions possédant chacune 2 niveaux.....90

Figure 2.15 – Dispositif expérimental utilisé pour l'étude des processus intermodaux visuotactiles : à droite, le siège comprenant 9 vibreurs, à gauche, les zones de l'écran associé à chaque vibreur. Une première scène apparaît, puis disparaît brièvement. Durant cette interruption, un vibreur s'active pour indiquer la zone de la scène où un changement aura lieu. La scène réapparaît ensuite avec un élément dont l'orientation a changé.....92

| | |
|---|-----|
| Figure 3.1 – Schéma du dispositif expérimental utilisé dans les différentes études expérimentales. En fonction des études, les dispositifs visuels et tactiles sont utilisés séparément ou simultanément..... | 102 |
| Figure 3.2 – Joystick Pro Flight X52 de Saitek® utilisé dans les tâches de régulation d’approche au sol..... | 104 |
| Figure 3.3 – Dispositifs tactiles utilisés lors des différentes études (a. version de CAYLAR, b. version du CesamS)..... | 105 |
| Figure 3.4 – Signal moyen obtenu pour des vibrations de 150 ms. Le début de la stimulation démarre au moment où le signal dépasse 50% de son amplitude maximale et se termine lorsqu’il franchit à nouveau ce seuil. | 106 |
| Figure 3.5 – Exemple de données recueillies par l’oscilloscope dans une tâche de jugement de TTC visuotactile. Chaque impulsion correspond à l’activation d’un vibreur en fonction de la distance entre le mobile et la cible. Le SOA (<i>stimulus onset asynchrony</i>) correspond au délai temporel entre le début de deux stimulations successives. | 106 |
| Figure 4.1 – Dispositif expérimental de la première étude (expériences 1, 2 et 3). Le boîtier rouge contient le PC central du dispositif tactile contrôlant les moteurs. La souris est utilisée pour répondre à la tâche..... | 115 |
| Figure 4.2 – Configuration du dispositif tactile utilisé lors de l’expérience n°1. Les symboles noirs et gris indiquent les vibreurs utilisés au cours d’un patron selon la variable informationnelles et l’écartement spatial. | 115 |
| Figure 4.3 – Représentation schématique des formes de stimulations en expansion. Les cercles bleus foncés indiquent les niveaux activés, pour chaque valeur de la taille angulaire..... | 116 |
| Figure 4.4 – Modes de vibration utilisés lors de l’expérience 1. Les espaces colorés (gris ou bleus) représentent, sur la ligne temporelle, les périodes d’activation de chaque niveau. | 117 |
| Figure 4.5 – Moyenne des erreurs constantes en fonction du temps d’occultation (expérience 1)..... | 119 |
| Figure 4.6 – Moyenne des erreurs constantes en fonction de l’écartement spatial (expérience 1)..... | 120 |
| Figure 4.7 – Moyenne des erreurs constantes en fonction de l’écartement spatial et du temps d’occultation (expérience 1). Avec une occultation de 445 ms, l’EC était significativement plus élevée lorsque l’écartement était de 1 cm que lorsqu’il était de 2 cm. | 120 |
| Figure 4.8 – Moyenne des erreurs absolues en fonction du temps d’occultation (expérience 1)..... | 121 |

| | |
|--|-----|
| Figure 4.9 – Moyenne des erreurs variables en fonction du temps d’occultation (expérience 1)..... | 122 |
| Figure 4.10 – Représentation schématique des formes de stimulations linéaires. Les cercles bleus indiquent les niveaux activés en fonction de la position du mobile. | 126 |
| Figure 4.11 – Moyenne des erreurs constantes en fonction du temps d’occultation (expérience 2)..... | 127 |
| Figure 4.12 – Erreur constante moyenne en fonction du temps d’occultation et du mode de vibration (expérience 2). Dans les conditions avec un temps d’occultation de 800 ou 1200, l’EC était significativement plus faible avec un mode de vibration discontinu. | 127 |
| Figure 4.13 – Erreur absolue en fonction du mode de vibration et du temps d’occultation (expérience 2). Dans les conditions avec un temps d’occultation de 800 ou 1200, l’EC était significativement plus faible avec un mode de vibration discontinu..... | 128 |
| Figure 4.14 – Erreur variable en fonction du temps d’occultation (expérience 2). | 129 |
| Figure 4.15 – Erreur variable en fonction du mode de vibration et du temps d’occultation (expérience 2). Le temps d’occultation avait un effet significatif sur l’EV uniquement avec un mode de vibration continu..... | 129 |
| Figure 4.16 – Moyenne des erreurs constantes en fonction du type d’approche et de la durée d’occultation (expérience 2). Les EC étaient moins élevées dans la conditions tangentielle seulement pour l’occultation de 600 ms..... | 133 |
| Figure 4.17 – Moyenne des erreurs absolues en fonction du type d’approche et de la durée d’occultation (expérience 2). L’EA était significativement moins élevée avec des trajectoires tangentielles lorsque l’occultation était de 600..... | 134 |
| Figure 5.1 – Configuration du dispositif tactile utilisé pour l’expérience n°3. | 142 |
| Figure 5.2 – Stimulation visuelle correspondant au moment du contact (gauche). La figure de droite correspond à une réponse anticipée (sachant que le mobile arrive par la droite). | 144 |
| Figure 5.3 – Les six conditions expérimentales dans lesquelles étaient passée la tâche de jugement de TTC (expérience 4). Les trajectoires étaient présentées, au niveau tactile ou visuel, dans leur totalité (1 et 3) ou avec une occultation d’une seconde (2 et 4). Dans la condition bimodale (5 et 6), les informations des deux modalités sensorielles étaient présentées simultanément. | 145 |
| Figure 5.4 – Erreur constante en fonction de la condition sensorielle (expérience 4). ... | 146 |
| Figure 5.5 – Erreur constante en fonction de la vitesse d’approche du mobile (expérience 4)..... | 147 |

| | |
|--|-----|
| Figure 5.6 – Erreur constante en fonction de la vitesse et de l’occultation (expérience 4). Dans la condition avec occultation, les trois conditions de vitesse étaient significativement différentes les unes des autres alors qu’en l’absence d’occultation, seules les vitesses V1 et V3 présentaient une différence significative. | 147 |
| Figure 5.7 – Erreur constante en fonction de la condition sensorielle et de la vitesse (expérience 4). L’effet de la vitesse n’était présent que dans la modalité tactile..... | 148 |
| Figure 5.8 – Erreur constante en fonction de la vitesse et de l’occultation dans chacune des conditions sensorielles (expérience 4). Dans les conditions visuelle et bimodale, nous avons pu observer une interaction entre la vitesse et l’occultation..... | 149 |
| Figure 5.9 – Erreur absolue en fonction de la condition sensorielle (expérience 4)..... | 150 |
| Figure 5.10 – Erreur absolue en fonction de la vitesse (expérience 4). | 150 |
| Figure 5.11 – Erreur absolue en fonction la condition sensorielle et de l’occultation (expérience 4)..... | 151 |
| Figure 5.12 – Erreur variable en fonction de la condition sensorielle (expérience 4). | 152 |
| Figure 5.13 – Erreur variable en fonction de la vitesse et de l’occultation (expérience 4). | 152 |
| Figure 5.14 – Illustration des quatre conditions expérimentales. Dans la condition visuelle sans occultation (VC), la trajectoire complète du mobile est présentée visuellement. Dans la condition vision occultée (VO), la trajectoire est présentée visuellement et occultée 1 sec avec le contact. Dans les deux conditions bimodales, la trajectoire du mobile est également présentée visuellement avec une occultation de 1 sec. L’approche était également présentée via la modalité tactile, tout au long de la trajectoire du mobile (ITC) ou uniquement durant l’occultation visuelle (ITO)..... | 159 |
| Figure 5.15 – Erreur constante moyenne en fonction de la modalité de présentation (expérience 5)..... | 160 |
| Figure 5.16 – Erreur constante en fonction de la vitesse pour chaque modalité de présentation (expérience 5). La vitesse n’avait d’effet significatif sur l’EC que dans la condition bimodale avec les informations tactiles transmises de manière continue (ITC). | 161 |
| Figure 5.17 – Erreur absolue moyenne dans les quatre modalités de présentation (expérience 5)..... | 162 |
| Figure 5.18 – Erreur variable en fonction de la modalité de présentation (expérience 5). | 163 |
| Figure 6.1. Configuration du dispositif tactile lors de l’expérience 6. | 169 |

| | |
|---|-----|
| Figure 6.2 – Environnements virtuels simulés pour la vision normale (haut) et dégradée (bas), à environ 40 m (gauche) et 5 m (droite) du sol. | 170 |
| Figure 6.3 – Localisation et sens de vibration des patrons tactiles. Le niveau 7 correspond à l'altitude maximale (activation au lancement de l'essai) et le niveau 0 au sol (activation au moment du contact)..... | 171 |
| Figure 6.4 – Organisation des deux parties du protocole expérimental..... | 172 |
| Figure 6.5 – Vitesse d'impact en fonction de l'altitude initiale (expérience 6 – phase expérimentale 1). | 175 |
| Figure 6.6. Vitesse d'impact en fonction de l'altitude initiale (expérience 6 – phase expérimentale 2). | 176 |
| Figure 6.7 – Vitesse d'impact en fonction de l'altitude de départ et de la modalité sensorielle (expérience 6 – phase expérimentale 2). Dans la modalité tactile, la vitesse d'impact était significativement plus élevée pour l'altitude haute (60 m) que pour les deux autres altitudes. En condition bimodale, la vitesse d'impact était significativement plus élevée pour l'altitude haute (60 m) que pour l'altitude basse (30 m). | 176 |
| Figure 6.8 – Vitesse d'impact dans huit blocs expérimentaux (expérience 6 – phase expérimentale 1 & 2)..... | 177 |
| Figure 6.9 – Vitesse moyenne en fonction de l'altitude initiale (expérience 6 – phase expérimentale 1). | 178 |
| Figure 6.10 – Vitesse moyenne au cours de l'essai en fonction de l'altitude initiale (expérience 6 – phase expérimentale 2)..... | 179 |
| Figure 6.11 – Vitesse moyenne dans les différents blocs expérimentaux (expérience 6 – phase expérimentale 1 & 2)..... | 180 |
| Figure 6.12 – Configuration du dispositif tactile pour l'expérience 7. Les vibreurs mobilisés varient selon la variable informationnelle transmise au cours de l'essai. | 186 |
| Figure 6.13 – Organisation du protocole expérimentale n°5..... | 189 |
| Figure 6.14 – Vitesse d'impact en fonction du type d'information tactile (expérience 7). | 190 |
| Figure 6.15 – Vitesse d'impact en fonction de la vitesse horizontale (expérience 7). | 191 |
| Figure 6.16 – Vitesse d'impact en fonction du type d'information tactile et de la vitesse horizontale (expérience 7). L'effet de la vitesse horizontale était différent selon le type d'information tactile..... | 192 |

| | |
|--|-----|
| Figure 6.17 – Vitesse moyenne en fonction de la vitesse horizontale (expérience 7)..... | 193 |
| Figure 6.18 – Altitude au moment de la première décélération dans les quatre conditions expérimentales (expérience 7)..... | 194 |
| Figure 6.19 – Vitesse maximale en fonction de la vitesse horizontale et de la nature de la variable informationnelle (expérience 7)..... | 195 |
| Figure 6.20 – Vitesse maximale en fonction de la vitesse horizontale de l’engin (expérience 7)..... | 195 |
| Figure 6.21 – Accélération maximale en fonction du type d’informations tactiles (expérience 7)..... | 196 |
| Figure 6.22 – Accélération maximale en fonction de la vitesse horizontale (expérience 7)..... | 196 |

Tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau 1.1 – Caractéristiques des différents mécanorécepteurs de la peau (d’après (Kaczmarek et al., 1991). | 22 |
| Tableau 1.2 – Accessibilité de l’information en fonction des sources sensorielles..... | 34 |
| Tableau 2.1 – Caractéristiques du freinage pour différentes valeurs maintenue de tau dot. | 66 |
| Tableau 2.2 – Caractéristiques des stimulations utilisées par Lawson et al. (2015) dans les six conditions expérimentales. Chaque patron de stimulation consistait en 20 vibrations successives. Le tableau renseigne la fréquence de vibration et les caractéristiques temporelles de la première (1) et de la dernière (20) vibration, selon le type de codage. . | 79 |
| Tableau 2.3 – Détails des paramètres temporels utilisés dans l’étude de van Erp et al. (2003) pour indiquer (a) l’amplitude de l’écart avec l’altitude idéale et (b) la vitesse verticale du pilote. | 82 |
| Tableau 3.1 – Exemple de séquence d’activation des vibrateurs selon un codage relatif. Le pourcentage de la valeur maximale (colonne 2) associé à chaque vibrateur (colonne 1) dépend du nombre total de vibrateurs mobilisés. En fonction de la valeur maximale de la variable (altitude), chaque vibrateur s’active à une altitude donnée (colonnes 3 à 5).... | 108 |
| Tableau 4.1 – Caractéristiques cinématiques des approches simulées dans l’expérience 1. Les stimulations tactiles correspondant à des approches simulées (dans un environnement virtuel), les distances et vitesses indiquées dans le tableau correspondent à des variables virtuelles..... | 114 |

| | |
|--|-----|
| Tableau 4.2 – Caractéristiques cinématiques des approches simulées dans l'expérience 2 (les distances et vitesses correspondent à des variables virtuelles)..... | 125 |
| Tableau 4.3 – Caractéristiques cinématiques des approches simulées dans l'expérience 2. Pour les deux types d'approche, la distance initiale était de 2 mètres (virtuels). | 132 |
| Tableau 5.1– Caractéristiques cinématiques des différentes approches simulées. | 142 |
| Tableau 5.2 – Caractéristiques cinématiques et moment d'occultation des stimulations tactiles. Les trois dernières lignes représentent les vibrateurs activés (noir) ou non (gris) dans la condition avec occultation..... | 143 |
| Tableau 6.1 – Résultats des comparaisons planifiées sur la vitesse d'impact entre le bloc vision dégradée (sans tactile) et les trois conditions bimodales (expérience 6 – phase expérimentale 1 & 2)..... | 177 |
| Tableau 6.2 – Résultats des comparaisons planifiées sur la vitesse moyenne entre le bloc vision dégradée (sans tactile) et les trois conditions bimodales (expérience 6 – phase expérimentale 1 & 2)..... | 179 |

Equations

| | |
|---|-----|
| Équation 2.1 – Formalisation générale des lois de contrôle du mouvement : $\Delta Forces_{int}$ correspond aux forces produites par l'observateur et g est la fonction par laquelle ces forces génèrent une transformation du flux optique ($\Delta flux$). | 60 |
| Équation 2.2 – Spécification du TTC à l'aide de la variable tau (τ), correspondant au ratio entre la taille angulaire d'un objet (θ) et sa dérivée temporelle ($\dot{\theta}$)..... | 63 |
| Équation 2.3 – Calcul du GOFR en fonction de la vitesse (v) et de la hauteur du déplacement (e). | 69 |
| Équation 2.4 – Estimation de la décélération idéale à partir du GFR et de τ | 69 |
| Équation 2.5 – Spécification de la durée de vibration (dv) et du délai inter-stimulus (isi) en fonction de la distance (d) (Riener & Ferscha, 2008). | 77 |
| Équation 4.1 – Taille angulaire d'un objet en fonction de son rayon (R) et de sa distance par rapport au point d'observation (D). Lorsque l'angle visuel est inférieur à 10 degrés, on utilise la seconde formule, simplifiée. | 116 |
| Équation 6.1 – Relation entre le SOA et la vitesse d'approche (V). | 187 |

Informations vibrotactiles pour la régulation d'approches et la gestion des contacts avec l'environnement

Ce travail de recherche vise à étudier la transmission d'informations vibrotactiles pour l'aide à la navigation, et plus particulièrement pour améliorer la régulation des phases d'approche et la gestion des contacts avec l'environnement. L'un des défis majeurs de ce domaine de recherche est de comprendre comment rendre compte d'informations, parfois complexes, avec une modalité sensorielle n'étant pas naturellement utilisée pour les traiter. Ainsi, ce travail doctoral avait pour but de montrer la possibilité de suppléer la vision et à spécifier les caractéristiques de la stimulation vibrotactile qui influencent l'accès aux informations d'approche. Les différentes études qui étayaient cette thèse ont été réalisées à partir d'un dispositif expérimental couplant un environnement virtuel et un dispositif tactile comprenant différents vibrateurs placés à la surface de la peau. Les deux premiers chapitres expérimentaux se sont appuyés sur des tâches d'estimation de temps de pré-contact (*time-to-contact*, TTC) classiquement utilisées pour étudier les processus visuels mis en jeu dans la régulation des situations d'approche. Le premier chapitre expérimental (expériences 1, 2 et 3) constituait une étude préliminaire qui a notamment montré que le jugement était plus précis lorsque le dispositif tactile renvoyait des informations concernant la distance d'approche (par rapport à des informations sur la taille angulaire). Les résultats du second chapitre expérimental (expériences 4 et 5) ont montré que la modalité tactile permettait d'estimer le TTC mais de manière moins précise que la modalité visuelle. Toutefois, lorsque la modalité visuelle est occultée, transmettre des informations tactiles durant la période d'occultation permet d'améliorer la précision du jugement. Le dernier chapitre expérimental (expériences 6 et 7) s'est intéressé plus précisément à l'influence des informations vibrotactiles sur la régulation d'une approche au sol dans une situation simulée d'atterrissage en hélicoptère. Les deux expérimentations ont montré que l'utilisation d'informations tactiles permettait une diminution significative de la vitesse de contact au sol lorsque l'environnement visuel était dégradé et que cette diminution dépendait de la variable informationnelle transmise par le dispositif. Au final, les résultats de ce travail de recherche sont discutés au regard des théories fondamentales sur la perception et l'action. Ils permettent de montrer comment des informations d'approche peuvent être perçues à travers la modalité tactile et ainsi suppléer la vision lorsqu'elle est dégradée.

Mot clés – Perception, dispositifs tactiles, approche écologique, interfaces homme-machine, multimodalité, navigation.