



HAL
open science

Mesure et contre-mesure de la surdité attentionnelle

Franck Élisabeth

► **To cite this version:**

Franck Élisabeth. Mesure et contre-mesure de la surdité attentionnelle. Neurosciences [q-bio.NC]. Sorbonne Université, 2022. Français. NNT : 2022SORUS135 . tel-03828331

HAL Id: tel-03828331

<https://theses.hal.science/tel-03828331>

Submitted on 25 Oct 2022

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.



Gueules Cassées
Sourire Quand Même



AGENCE
INNOVATION
DÉFENSE

Sorbonne Université

École Doctorale 158 - Cerveau, Cognition, Comportement

IRBA/IRCAM

Mesure et contre-mesure de la surdité attentionnelle

Par Franck Élisabeth

Thèse de doctorat de Sciences Cognitives

Dirigée par Isabelle Viaud-Delmon, Guillaume Andéol et Clara Sued

Présentée et soutenue publiquement le 05 Juillet 2022

Devant un jury composé de :

Dehais, Frédéric, PU, ISAE-SUPAERO, Rapporteur

Zimpfer, Véronique, CR-HDR, ISL, Rapportrice

Gas, Bruno, PU, Sorbonne Université, Examineur

Moulin, Annie, CR, CNRS, Examinatrice

Scannella, Sébastien, MCU, ISAE-SUPAERO, Examineur

Viaud-Delmon, Isabelle, DR, CNRS, Directrice de thèse

Andéol, Guillaume, DR, IRBA, Co-Directeur de thèse

Sued, Clara, CR, IRBA, Co-Directrice de thèse



Except where otherwise noted, this work is licensed under
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>

Laboratoire de Sciences et Technologies de la Musique et du Son (STMS)
Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique (IRCAM)
UMR 9912 IRCAM CNRS Sorbonne Université
Équipe Espaces Acoustiques et Cognitifs
1 Place Igor Stravinsky, 75004 Paris, France

Institut de Recherche Biomédicale des Armées (IRBA)
Département Neurosciences et Sciences Cognitives (NSCo)
Unité Perception
1 Place Général Valérie André, 91220 Brétigny-sur-Orge, France

Ce travail de thèse a été cofinancé par l'Agence Innovation Défense (AID) et la Fondation des Gueules Cassées.

Résumé

Que ce soit dans le domaine militaire ou médical, l'environnement sonore des opérateurs est chargé en informations (bruits d'engins, communications, alarmes, etc.). Du point de vue des alarmes, cela implique qu'elles soient efficaces. Plus précisément, elles doivent être faciles à détecter dans cet environnement et faciles à reconnaître afin d'engendrer des réactions appropriées de la part de l'opérateur.

L'analyse et l'interprétation des stimuli de l'environnement nécessitent une allocation de ressources attentionnelles par l'opérateur. Cependant, les ressources attentionnelles étant limitées, il lui est impossible d'analyser l'ensemble des stimuli. En conséquence, il doit filtrer les stimuli selon leur pertinence avec la tâche à effectuer. Si les mécanismes sur lesquels repose ce filtrage ne sont pas totalement compris, on sait qu'il est à l'origine d'informations importantes non perçues. En effet, le traitement des stimuli est automatique tant que des ressources attentionnelles sont disponibles. Dans le cas où une tâche est trop consommatrice en ressources attentionnelles pour pouvoir traiter l'ensemble des stimuli, la priorité est donnée aux stimuli pertinents et le traitement des stimuli les moins pertinents est atténué, afin d'éviter tout effet de distraction. Dans ces conditions, des stimuli importants pour l'opérateur, mais non pertinents du point de vue de sa tâche risquent d'être manqués. Dans le domaine de la vision, cette situation a été nommée cécité attentionnelle ("inattentional blindness"). La cécité attentionnelle survient lorsque l'attention est focalisée sur un élément particulier d'une scène au moment de la présentation du stimulus critique, ce qui amène à ne pas le traiter, même s'il est remarquable et bien visible. Le même phénomène a été décrit dans le domaine auditif (surdité attentionnelle - "inattentional deafness"), mais semble se produire moins souvent que la cécité attentionnelle. La littérature s'accorde sur le fait qu'une tâche visuelle peut provoquer de la surdité attentionnelle, mais aucun consensus n'existe sur le rôle d'une tâche auditive dans la surdité attentionnelle. Une tâche auditive pourrait n'engendrer une surdité attentionnelle que sous certaines conditions. Cependant, la surdité attentionnelle reste problématique dans le cas où le stimulus manqué est une alarme. De nombreux événements indésirables sont survenus dans des situations où les alarmes ont été émises à fort niveau, mais manquées par les opérateurs focalisés sur leur tâche. Il est nécessaire d'améliorer les alarmes sonores existantes en cherchant à limiter le phénomène de surdité attentionnelle.

L'objectif de cette thèse est donc, dans un premier temps, de déterminer les conditions

dans lesquelles une tâche auditive peut être source de surdité attentionnelle et, dans un second temps, de déterminer une contre-mesure via la manipulation des caractéristiques sonores des alarmes. Dans ce but, deux expériences ont été réalisées. La première, en laboratoire, avait pour but d'étudier l'évolution de la surdité attentionnelle en fonction du niveau de difficulté de la tâche principale, et donc de ressources attentionnelles requises. Une double tâche purement auditive a été proposée dans 4 conditions. A chaque essai, 3 phrases en anglais issues du corpus CRM (Coordinate Response Measure)  taient prononcées simultanément. Les participants avaient pour tâche principale d'identifier une phrase cible et d'en rapporter deux éléments sémantiques (couleur et chiffre). Leur tâche secondaire consistait à identifier les essais auxquels une alarme avait été ajoutée. Ces deux conditions étaient couplées avec deux autres, dans la première (facile) la phrase cible était émise avec un SNR (Sound to Noise Ratio) de 6 dB par rapport aux autres alors qu'elle était émise avec un SNR de 0 dB dans la seconde condition (difficile). Cette expérience n'a pas permis de mettre en évidence de surdité attentionnelle, car très peu d'alarmes ont été manquées. La différence de performance entre la condition facile et la condition difficile suggère néanmoins que la condition difficile a nécessité plus de ressources attentionnelles, et les résultats ont permis d'étayer la construction de la deuxième expérience. Cette dernière a été réalisée en ligne. Cette fois-ci, un essai comprenait trois groupes consécutifs de trois phrases dont, pour chacun, une phrase était émise dans une oreille définie comme l'oreille cible et les deux autres étaient émises dans l'oreille opposée : celle à ignorer. A chaque essai, le participant devait mémoriser l'indicatif de la phrase ainsi que la couleur dans chacune des trois phrases consécutives émises dans l'oreille cible. La question finale d'un essai ne portait que sur l'une des trois phrases en demandant au participant de rapporter la couleur associée à tel ou tel identifiant. Ainsi, le participant était obligé de maintenir un niveau élevé d'attention pour parvenir à réaliser la tâche. Lors du dernier essai, un stimulus critique rugueux ou non était émis dans l'oreille cible ou à ignorer. Chacune des quatre conditions était réalisée par un groupe diff rent de participants. Les résultats de cette expérience confirment que le paradigme développé génère une surdité attentionnelle à partir d'une tâche principale auditive et vient donc renforcer la littérature à ce sujet. De plus, elle met en évidence l'intérêt de la réalisation d'audiogrammes en ligne. Bien que beaucoup moins précis que ceux réalisés en laboratoire, un lien a pu être établi entre les performances à la tâche de détection et les seuils d'audibilité obtenus.

Mots-clés : Surdité attentionnelle, alarmes sonores, rugosité, expériences en ligne

Abstract

In the military domain or in the medical domain, the environment of the operators is full of sounds (machines, communications, warning sounds, etc.). In this context, it is necessary for the warning sounds to be efficient. They require being easy to detect in this environment and easy to recognize to get an appropriate reaction of the operator.

The environment analysis and interpretation require attentional resources, but the pool is limited, so it is not possible to analyse all stimuli. Consequently, task-irrelevant stimuli are filtered out. The filter mechanism is not perfectly understood, but we know that it leads to missed stimuli. When a task does not require a lot of resources, the unused capacity is involuntarily allocated to the perception of task-irrelevant stimuli. However, when a task requires more resources, priority will be given to the processing of task-relevant stimuli to prevent distraction from the task-irrelevant ones. But, in this case, some task-irrelevant stimuli that could be useful for the operator can be missed. In the visual domain, this is called "inattention blindness". It happens when a critical stimulus appears during focused attention on a task. In this situation, the critical stimulus is not processed even if it is clearly visible and remarkable. The same phenomenon exists in the auditor domain and is called "inattention deafness". The literature reports that a visual task can lead to inattention deafness. With an auditory task, it seems inattention deafness arises only under certain conditions. In this case, inattention deafness creates a problem when a warning sound is missed. Several difficult situations have been linked to missed warning sounds, even if they were at a loud level. It is therefore necessary to find a way to limit inattention deafness.

The aim of this thesis was first to determine conditions in which inattention deafness appears. A second aim was to determine if modulations of the attributes of the warning sounds can help to limit inattention deafness. Two experiments were conducted. The first was laboratory-based and aimed to study the link between inattention deafness and the level of task difficulty. A dual-task was used with 4 conditions. For each trial, 3 simultaneous English sentences from the Coordinate Measure Response (CRM) corpus were emitted. The main task was to identify a target sentence and to report two semantic information (color and number). The secondary task was to identify trials in which a warning sound was present. Those two conditions were mixed with two levels of difficulty. In the easy condition, the target sentence was emitted with an SNR (Sound to Noise Ratio)

of +6 dB with respect to the two other sentences. In the difficult condition, the SNR was 0 dB. Very few warning sounds were missed in this experiment, so it cannot be concluded that we created inattentional deafness. But the difference between the results in the easy and in the difficult condition indicates that the latter required more attentional resources. Based on this results, we conceived a second experiment that was proposed online. Each trial of this experiment was composed of 3 consecutive groups of 3 simultaneous sentences. In each group, one of the three sentences was emitted in one ear defined as the target ear when the other sentences were emitted in the to-be-ignored ear. Participants had to memorize the call-sign and color of the 3 consecutive sentences in the target ear. At the end of the trial, the participant had to report the color associated with one of the three call-sign, in order to maintain the level of focused attention during the trial. In the last trial, a critical stimulus was emitted in the target ear or in to-be-ignored ear. This stimulus could contain roughness or not. Those 4 conditions were realized by different groups of participants. The results of this experiment indicate that this paradigm leads to inattentional deafness. In addition, it demonstrated the interest of online audiograms. Even if they are less precise than the ones conducted in laboratory, performance in the detection task indicated a link with the audibility thresholds obtained.

Keywords : Inattentional deafness, auditory warning, roughness, online experiment

Remerciements

Je tiens à remercier Clara Suied, Guillaume Andéol et Isabelle Viaud-Delmon pour avoir rendu cette thèse possible ainsi que leur encadrement à toutes les étapes de sa réalisation.

Je tiens aussi à remercier Frédéric Dehais et Véronique Zimpfer pour avoir accepté d'être rapporteur et rapportrice de ma thèse ainsi que Bruno Gas, Annie Moulin et Sébastien Scannella pour avoir participé à mon jury de thèse en tant qu'examinateurs.

Aussi, je tiens à remercier énormément Véronique Chastres pour sa présence et son soutien sans faille, notamment lors de la rédaction de cette thèse. Son aide m'a aussi été plus que précieuse lors de l'analyse statistique des données.

Mes remerciements vont aussi de manière plus globale au personnel de l'IRBA et de l'IRCAM, aux collègues qui m'ont aidé directement ou indirectement. Que ce soit en participant aux pré-tests de mes expériences en vue de les mettre au point, en m'apportant des conseils ou des critiques ou tout simplement une réflexion par leurs questions et leur intérêt pour ma thèse.

Enfin, je voudrais adresser mes remerciements à tous mes amis, ma famille et, plus particulièrement, ma compagne Kady et mon fils Kodoumba pour le soutien apporté.

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	v
Remerciements	vii
Introduction	3
I État de l’art	5
1 Alarmes sonores	7
1.1 Fonctionnement du système auditif	7
1.1.1 De l’oreille au cerveau	7
1.1.2 Hauteur, intensité, timbre	8
1.1.3 Rugosité	9
1.2 Qu’est-ce qu’une bonne alarme sonore ?	14
1.3 Problèmes liés aux alarmes : alarmes manquées et fausses alarmes	19
2 Attention	21
2.1 Qu’est-ce que l’attention ?	21
2.2 Attention sélective	22
2.2.1 Orientation de l’attention	23
2.2.2 Filtres attentionnels	29
2.2.3 Modèle de filtre tardif	35
2.2.4 Modèles hybrides	38
2.3 Attention divisée	48
2.3.1 Modèle d’une ressource unique	49

2.3.2	Modèle de ressources multiples	50
3	Échecs de l'attention	55
3.1	Échec à la détection d'une cible lors d'une présentation en série	55
3.2	Échec à la détection d'une cible répétée	57
3.3	Échec à la détection d'un changement	58
3.3.1	Cécité au changement	58
3.3.2	Surdité au changement	59
3.4	Échecs de la capture de l'attention	60
3.4.1	Surdité attentionnelle	61
II	Expériences	77
4	Expérience 1	79
4.1	Introduction	79
4.2	Méthodes	82
4.2.1	Participants	82
4.2.2	Stimuli	82
4.2.3	Matériel	83
4.2.4	Procédure	84
4.3	Analyse des données	85
4.4	Résultats	88
4.4.1	Tâche CRM	88
4.4.2	Tâche de détection du stimulus critique	89
4.4.3	Lien entre succès à la tâche de détection du stimulus critique et performance � la tâche CRM	94
4.4.4	Lien avec les audiogrammes	97
4.5	Discussion	100
4.6	Conclusion	101
5	Expérience 2	103
5.1	Introduction	103
5.2	Méthodes	107

5.2.1	Participants	107
5.2.2	Matériel	108
5.2.3	Stimuli	111
5.2.4	Procédure	113
5.2.5	Analyse des données	118
5.3	Résultats	123
5.3.1	Tâche N-back	123
5.3.2	Tâche de détection du stimulus critique	124
5.3.3	Lien entre les performances de la tâche N-back et de la tâche de détection du stimulus critique	128
5.3.4	Analyses complémentaires en lien avec les seuils d'audibilité	129
5.4	Discussion	131
5.4.1	Tâche N-back	131
5.4.2	Détection du stimulus critique	133
5.4.3	Seuils d'audibilité	135
5.5	Conclusion	136
	Discussion générale	141
	Annexe A : Récapitulatif des études autour de la surdité attentionnelle	149
	Références	170

Introduction

Les environnements sonores auxquels sont soumis les opérateurs sont de plus en plus denses en informations visuelles et auditives. Que ce soit dans le cadre de systèmes aéronautiques militaires complexes ou de salles d’opération d’hôpitaux, la saturation du canal visuel a conduit les constructeurs de systèmes électroniques à transmettre les informations, parfois extrêmement urgentes, par le biais du canal auditif. Ces sons électroniques, appelés alarmes sonores, viennent se rajouter à un environnement sonore déjà chargé. Malgré la diversité des informations auditives présentes, le message véhiculé par l’alarme sonore doit être compris rapidement et avec le moins d’effort possible, afin d’aboutir à la réaction adéquate. Cependant, l’analyse des rapports d’incidents et accidents aériens révèle qu’un certain nombre d’entre eux trouvent leur source dans le manque de réaction à une ou plusieurs alarmes auditives (Bliss, 2003). Ces données issues de la littérature sont corroborées par des demandes opérationnelles reçues par l’IRBA. En effet, en 2013, suite à plusieurs incidents et accidents aériens, le BEAD-air a recommandé à l’IRBA de poursuivre les recherches sur la conception des alarmes sonores dans les environnements à risque.

Le fait que ces alarmes soient régulièrement non perçues par les pilotes, ou les médecins et infirmiers des salles d’opération, interpelle. La surdité attentionnelle, pendant auditif de la cécité attentionnelle (phénomène connu et décrit lui de multiples fois dans la littérature ; voir Mack et Rock, 1998), a été définie comme le fait de ne pas percevoir des distracteurs auditifs dans des conditions de charge perceptive (visuelle) élevée. Plusieurs séries d’études issues du laboratoire de Nilli Lavie (revue dans Lavie, 1995) ont mis en évidence cette surdité attentionnelle, dans un cadre de laboratoire, en s’intéressant à la capacité des sujets à pouvoir focaliser leur attention dans des tâches à charge perceptive ou cognitive élevée, et sur la manière dont certains distracteurs peuvent être ignorés ou non. Macdonald et Lavie (2011) ont démontré que, pour des participants qui devaient répondre à une tâche de discrimination auditive, lorsque le niveau de charge perceptive était élevé, les participants ne percevaient pas la présence d’un son distracteur. Molloy *et coll.* (2015) ont plus récemment repris ce paradigme avec une tâche de recherche visuelle, en mesurant l’activité cérébrale avec de la magnétoencéphalographie. Ils ont ainsi démontré que, au cours d’une tâche visuelle demandant une charge perceptive élevée, le traitement

sensoriel des stimuli auditifs était momentanément réduit, donnant lieu à l'observation comportementale appelée surdité attentionnelle. La surdité attentionnelle a été mise en évidence de nombreuses fois en conditions de laboratoire (Dalton et Fraenkel, 2012 ; Koreimann *et coll.*, 2014 ; Francis, 2010 ; Parks *et coll.*, 2011), en simulateur (Dehais *et coll.*, 2014, 2016) ou même lors de vols réels (Callan *et coll.*, 2018). Il semble donc que la surdité attentionnelle puisse expliquer certaines alarmes manquées.

L'objectif de cette thèse est de s'intéresser aux conditions dans lesquelles les sons d'alarmes sont moins bien perçus, ou ne sont pas perçus du tout (surdité attentionnelle), et d'étudier la modification possible de cette surdité attentionnelle en fonction des caractéristiques acoustiques des alarmes sonores. Un premier chapitre vise à présenter la manière dont un son est perçus avant d'aborder la conception des alarmes et les problèmes rencontrés au niveau des alarmes. Cependant, au-delà du système auditif périphérique, l'attention joue aussi un rôle dans l'audition. En effet, l'attention intervient en sélectionnant les stimuli qui vont accéder à un niveau de traitement approfondi parmi l'ensemble des stimuli perçus par notre système auditif périphérique. De fait, la surdité attentionnelle peut intervenir à cette étape. C'est pourquoi un second chapitre traite de l'attention en vue d'introduire le troisième chapitre qui aborde ses échecs, dont la surdité attentionnelle. Enfin, sur la base de ces recherches, des hypothèses sont formulées et testées à l'aide de deux expériences faisant l'objet de deux chapitres expérimentaux.

Première partie

État de l'art

Chapitre 1 : Alarmes sonores

Cette thèse porte sur la possibilité d'améliorer les alarmes sonores actuelles en vue de les rendre plus robustes face au phénomène de surdité attentionnelle. Par conséquent, dans un premier temps, il est nécessaire de faire un rappel succinct concernant la manière dont un son est perçu. Le fonctionnement du système auditif fait donc l'objet d'une première partie. Une seconde partie a pour objectif de déterminer ce qu'est une bonne alarme d'un point de vue acoustique. Enfin, une troisième partie traite des problèmes liés aux alarmes.

1.1 Fonctionnement du système auditif

1.1.1 De l'oreille au cerveau

Avant d'être analysés, les sons sont captés et acheminés jusqu'au cerveau. Ce rôle de capteur est réalisé par l'oreille. L'oreille humaine tolère des pressions allant de 0 à 120 dB SPL et est capable de traiter des sons dont la fréquence se situe entre 20 Hz et 20 kHz. Lorsque l'onde sonore se propageant dans l'air parvient à l'oreille, elle traverse trois différentes zones de l'oreille pour être décomposée et transmise au cerveau.

Tout d'abord, en passant par l'oreille externe, l'onde rencontre le pavillon et le conduit auditif dont le rôle principal est de guider l'onde sonore jusqu'au tympan. Par sa forme, le pavillon a aussi un rôle d'amplificateur entre 2 kHz et 5 kHz et intervient dans la capacité à localiser les sons. Ensuite, l'onde passe par l'oreille moyenne. En faisant vibrer la membrane tympanique, l'onde est transmise à l'oreille interne par le biais de trois osselets (marteau, enclume et étrier). Leur disposition offre un bras de levier amplifiant le mouvement et permettant de le rendre suffisant pour générer des mouvements liquidiens dans la cochlée, organe auditif de l'oreille interne.

La cochlée est un organe situé dans l'os temporal en forme hélicoïdale comprenant trois canaux superposés remplis de liquides : la rampe vestibulaire, le canal cochléaire et la rampe tympanique.   la base de la cochlée, les rampes vestibulaire et tympanique sont fermées par les fenêtres ovale et ronde qui font la liaison avec l'oreille moyenne.   l'apex (en haut de la cochlée) les deux rampes communiquent. L'onde sonore se propage donc

dans le milieu liquide depuis l'oreille moyenne en passant par la fenêtre ovale jusqu'à la fenêtre ronde. Sur son passage, elle fait osciller la membrane basilaire qui sépare la rampe tympanique du canal cochléaire en différentes positions. En effet, cette membrane est plus épaisse et moins large à la base de la cochlée qu'à l'apex, sa déformation dépend donc de la fréquence de l'onde. L'organe de Corti repose sur cette membrane et est recouvert de la membrane tectorielle. C'est cet organe qui comprend les cellules ciliées permettant la transduction de l'onde en influx nerveux. En effet, sous l'effet de l'onde, le déplacement de l'organe de Corti et la membrane tectoriale entraîne une flexion des cils des cellules ciliées à l'origine d'un échange ionique entre ces cellules et le milieu extérieur. Ces cellules libèrent alors un neurotransmetteur stimulant les neurones qui y sont reliés. Plus précisément, il existe deux types de cellules ciliées. D'une part, les cellules ciliées internes (CCI, environ 3500) servent à la transduction. La position des CCI activées renseigne alors sur la fréquence du son tandis que le niveau sonore est déduit du niveau de stimulation de la cellule, plus grand lorsqu'une onde de plus forte amplitude génère un mouvement de plus grande amplitude. D'autre part, les cellules ciliées externes (CCE, environ 12500) ont plutôt un rôle mécanique d'amplification de la vibration au niveau de leur position et améliorent ainsi la précision de l'estimation fréquentielle.

Une fois l'onde sonore traduite en potentiels d'action, l'information est acheminée via le nerf cochléovestibulaire de la cochlée jusqu'aux noyaux cochléaires du tronc cérébral, puis aux olives supérieures, colliculus inférieurs et corps genouillés médians avant d'arriver au cortex auditif. Au cours de ces différentes étapes, la fréquence et l'intensité sont déterminées plus finement. De plus, la localisation des sons ou la présence de modulation (Moore, 1995) sont aussi déterminées.

1.1.2 Hauteur, intensité, timbre

Comme l'indique la sous-section précédente, l'oreille est un capteur très performant mais dont les caractéristiques physiques et le fonctionnement sont à l'origine d'un premier filtrage du son. En effet, il existe un filtrage en fréquence évident dû aux caractéristiques du pavillon ou de la membrane basilaire mais aussi dû au fonctionnement des neurones mis en jeu. Il existe aussi un filtrage en intensité effectué par de petits muscles se trouvant dans l'oreille moyenne et pouvant intervenir pour limiter la transmission en cas de

bruit trop intense. Dans ce cas, ceux-ci se contractent pour rigidifier la chaîne de transmission (tympan et osselets). De plus, la perception auditive dépend de l'interprétation des divers indices sonores par le cerveau. La perception auditive est donc différente de la stricte nature physique du son. C'est pourquoi il existe plusieurs indices psychoacoustiques correspondants à la perception des diverses caractéristiques de l'onde sonore perçue.

L'American National Standards (ANSI, 1994) définit la hauteur (en anglais, *pitch*) comme l'« attribut de la sensation auditive en fonction duquel les sons peuvent être classés sur une échelle allant du bas au haut. La hauteur dépend principalement du contenu fréquentiel du stimulus sonore, mais elle dépend également de la pression acoustique et de la forme d'onde du stimulus. » Ce terme emprunté au monde de la musique est souvent utilisé en psychoacoustique (Hartmann, 1998) car il a l'avantage de prendre en compte le fait que le percept de hauteur soit associé à l'ensemble du contenu fréquentiel plutôt qu'à une fréquence donnée. De la même manière, la sensation d'intensité perçue (en anglais, *loudness*) n'est pas la traduction directe de l'intensité de l'onde sonore. En effet, cette sensation dépend aussi des fréquences en jeu, certaines donnant une sensation d'intensité plus élevée que d'autres à niveau sonore égal. Bien qu'en français le terme intensité réfère à la fois à l'intensité physique et à l'intensité perçue, ces deux variables sont donc distinctes. Une troisième variable psychoacoustique importante est le timbre : « cet attribut de la sensation auditive en fonction duquel un auditeur peut juger que deux sons présentés de manière similaire et ayant le même volume et la même hauteur sont différents. » (Moore, 2012). Autrement dit, c'est cette qualité qui permet de différencier deux instruments jouant une même note au même niveau sonore. Le timbre est un attribut perceptif comprenant de multiples dimensions (Isnard, 2016) dont l'une d'elle est la rugosité dont il est question dans la partie suivante.

1.1.3 Rugosité

Le terme de rugosité fut introduit dans la littérature par Helmholtz (1877). À l'aide d'un montage astucieux lui permettant de générer deux sons purs dont il pouvait faire varier l'écart fréquentiel, Helmholtz a étudié la perception associée à la présence de deux sons purs émis simultanément. Le signal $x(t)$ alors généré par la somme des deux sons

purs de fréquences f_1 et f_2 peut être déterminé de la manière suivante :

$$x_1(t) = \cos(2\pi f_1 t) \text{ et } x_2(t) = \cos(2\pi f_2 t + \varphi) \quad (1.1)$$

Donc,

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) = \cos(2\pi f_1 t) + \cos(2\pi f_2 t + \varphi) \quad (1.2)$$

Soit, en utilisant la trigonométrie :

$$x(t) = 2 \sin\left(2\pi \frac{f_1 + f_2}{2} t + \varphi\right) \cos\left(2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} t + \varphi\right) \quad (1.3)$$

En posant maintenant $\bar{f} = \frac{f_1 + f_2}{2}$, la fréquence moyenne, et $\Delta f = \frac{f_1 - f_2}{2}$, l'écart fréquentiel. On a :

$$x(t) = A(t) \sin(2\pi \bar{f} t + \varphi), \text{ où } A(t) = 2 \cos(2\pi \Delta f t + \varphi) \quad (1.4)$$

À l'écoute, Helmholtz constate que sa perception varie selon l'écart fréquentiel Δf entre les deux sons. Il parvient alors à distinguer différentes sensations selon l'écart fréquentiel.

Si Δf est nul les deux sons sont à l'unisson.

Si Δf est assez faible la perception est celle d'un son pur de fréquence \bar{f} comportant des battements à la fréquence Δf . Du point de vue auditif, le phénomène de battement correspond à une oscillation de la fréquence du son autour de la fréquence moyenne du son.

Si Δf augmente, les battements accélèrent jusqu'à devenir impossibles à compter et donnent naissance à cette sensation appelée rugosité par analogie avec la sensation tactile donnée par un objet rugueux. Pressnitzer (1998) précise que le mot en allemand utilisé par Helmholtz aurait plutôt pu se traduire par « rauque », mais c'est le terme rugosité d'abord utilisé qui fut gardé par la suite.

En augmentant Δf à nouveau, la sensation de rugosité devient de plus en plus forte jusqu'à un maximum puis fini par décroître jusqu'à ce que f_1 et f_2 soient perçues distinctement.

Cette première approche de la rugosité par Helmholtz, en faisant varier l'écart fréquentiel entre deux sons purs, mène à penser que la rugosité peut aussi s'obtenir d'une autre manière. La formule 1.4 obtenue par la somme de deux sons indique que la rugosité peut s'obtenir par l'ajout d'une enveloppe sinusoïdale à un signal. Or ceci semble assez proche de l'expression mathématique correspondant à un signal modulé en amplitude (AM, équation 1.5).

$$(1 + m \sin(2\pi f_m t)) \sin(2\pi f_p t) \quad (1.5)$$

En effet, en plus d'être perçue lors du battement de deux signaux, la rugosité peut aussi être perçue en présence de modulations d'amplitude ou de fréquence (FM, équation 1.6) (Hartmann, 1998 ; Bergan et Titze, 2001 ; Moore, 2012).

$$\sin(2\pi f_p t - \beta \cos(2\pi f_m t)) \quad (1.6)$$

Dans ces deux équations, f_p est la fréquence de la porteuse (d'information) et f_m est la fréquence de la modulante (ou fréquence de modulation). m et β sont les indices de modulation, la modulation est ainsi maximale lorsqu'ils se rapprochent de 1 et devient nulle si ceux-ci s'annulent. D'après Moore (2012), la sensation associée à une fréquence de modulation f_m basse correspond, dans le cas d'une modulation AM, à des fluctuations d'intensité. Lorsque cette fréquence de modulation f_m augmente, le phénomène de rugosité apparaît alors. Dans le cas d'une modulation FM, la sensation induite est celle d'une fluctuation de la hauteur. Là encore, lorsque f_m devient assez importante, le phénomène de rugosité apparaît. Cependant, dans cette situation, il est souvent appelé « trill » ou « vibrato » par analogie avec la définition musicale de ces deux termes qui traduisent le percept de variation de hauteur. Le premier terme, « trill », réfère à des fluctuations discrètes (note par note) alors que le second, « vibrato », traite de fluctuations continues (sans saut de note). En effet, la sensation de rugosité est bien connue des musiciens qui l'associent à des dimensions du timbre rapportant à la dissonance auditive. C'est d'ailleurs dans le but d'éviter cette sensation désagréable de rugosité que, dans la musique occidentale, les harmoniques sont plus espacées dans les registres bas que dans les registres élevés (Vassilakis et Kendall, 2010). De fait, la littérature scientifique décrit souvent la rugosité en employant des termes empruntés à la musique tels que « trill » ou « vibrato » (Miller et Heise, 1950 ; Moore, 2012).

En s'intéressant uniquement aux situations où les modulations AM/FM sont sources de rugosité, il est intéressant de noter que trois paramètres principaux influencent l'importance de cette sensation : la profondeur de modulation, la fréquence de modulation et la fréquence de la porteuse.

Concernant le premier paramètre, la profondeur de modulation m (ou β pour une modulation fréquentielle), si celui-ci est nul, le signal ne présente aucune modulation et aucune rugosité n'est donc ressentie. Lorsque m augmente, la sensation de rugosité augmente proportionnellement jusqu'à atteindre un maximum pour $m = 1,2$ (Pressnitzer, 1998). Au-delà, la sensation de rugosité diminue à nouveau. Bien que le maximum de rugosité soit obtenu pour une profondeur de modulation $m = 1,2$, (Pressnitzer, 1998) indique qu'au-delà de $m = 1$ l'enveloppe du signal est fortement affectée par la modulation et il n'est plus forcément cohérent de s'y intéresser. C'est pourquoi l'unité quantifiant le niveau de rugosité, *Asper*, est définie en prenant $m = 1$ pour profondeur de modulation de référence. Plus précisément, 1 Asper est le niveau de rugosité ressenti à l'écoute d'un son pur à 1000 Hz modulé à 70 Hz et dont la profondeur de modulation est $m = 1$ (figure 1.1, gauche).

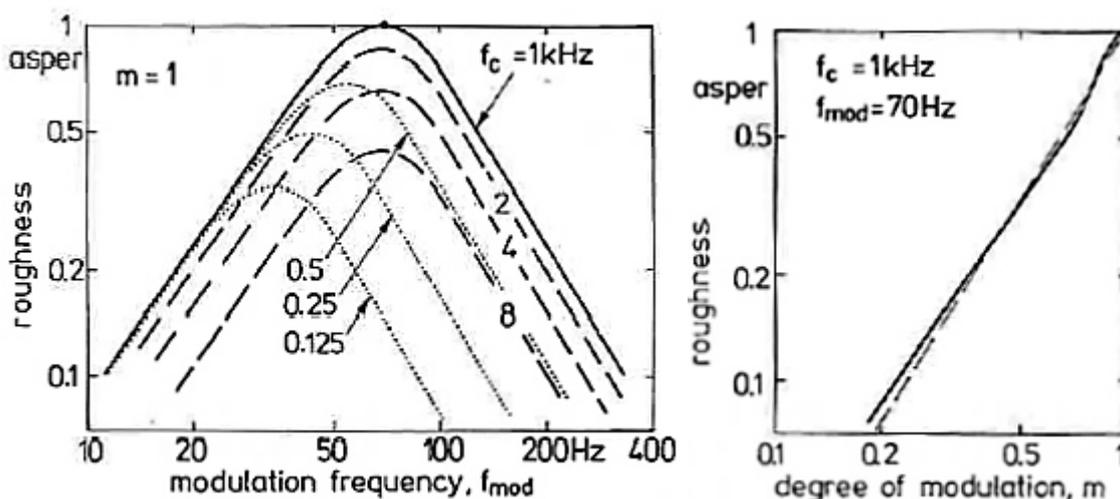


FIGURE 1.1 – Évolution de la rugosité en présence de modulations en fonction de trois paramètres : profondeur de modulation m (à gauche) et fréquence de modulation f_m pour différentes fréquences de porteuse (f_c sur l'image, à droite). Image tirée de Fastl et Zwicker (2006)

Concernant maintenant les deux derniers paramètres, la fréquence de modulation f_m ainsi que la fréquence de la porteuse, là encore si f_m est nul, il n'y a pas de modulations

et donc aucune rugosité. En revanche, lorsque f_m est non nulle, la sensation de rugosité augmente au fur et à mesure que la fréquence de modulation augmente jusqu'à atteindre un maximum à partir duquel la sensation de rugosité diminue si f_m continue d'augmenter. Le maximum de rugosité obtenue pour une fréquence de modulation donnée dépend alors de la fréquence de la porteuse (figure 1.1, droite). C'est pourquoi l'unité Asper est définie pour une fréquence de modulation ainsi qu'une fréquence de porteuse donnée.

Un autre fait intéressant concernant la rugosité est le fait que celle-ci ait été observée dans des enregistrements de voix humaine ainsi que dans des alarmes synthétiques. La comparaison des spectres de modulations (Modulated Power Spectrum, MPS) au sein d'une banque de sons comprenant des sons de voix criée et parlée, des sons d'alarmes synthétiques et d'instruments ainsi que des sons purs par Arnal *et coll.* (2015) leur a permis d'identifier qu'une zone de modulations correspondant à de la rugosité (~ 30 à 150 Hz) comprend beaucoup d'énergie dans les sons de voix criée et d'alarmes synthétiques.

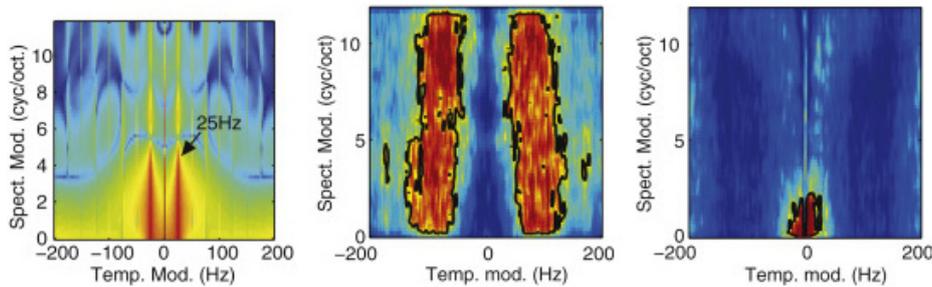


FIGURE 1.2 – Spectres de puissance de modulation (Modulation Power Spectrum, MPS), de gauche à droite, pour des sons d'alarmes synthétiques, des cris et de la voix parlée. Les spectres de puissance de modulation permettent de représenter l'évolution des modulations spectrales en fonction des modulations en amplitude.

L'observation d'une présence très importante d'énergie dans cette même zone de modulation pour les sons d'alarmes synthétiques a dirigé les auteurs de l'étude vers l'hypothèse que la sensation d'urgence transmise par un cri soit véhiculée par la rugosité. La rugosité influencerait la sensation d'urgence associée aux alarmes et c'est pourquoi celles-ci auraient « instinctivement » été créées en présentant de la rugosité. L'hypothèse semble confirmée par la suite de l'étude dans laquelle les auteurs ont mesuré les performances de localisation, temps de réaction et efficacité à la détection, réalisées par des participants lors de l'écoute de différents sons. De plus, une analyse par IRMf a permis d'identifier une forte activation de l'amygdale, zone impliquée dans le traitement du danger, en présence

de rugosité. Cette observation semble donc appuyer l'hypothèse que la rugosité véhicule l'information d'urgence dans ces sons. Cependant, (Belin et Zatorre, 2015) rappelle que ceci reste théorique puisque la rugosité peut être aussi relevée dans d'autres sons tels que des morceaux de musique métal par exemple, sans pour autant que ces sons ne véhiculent une sensation d'urgence.

Une étude sur l'espace peripersonnel (Taffou *et coll.*, 2021) a mis en évidence chez l'homme l'existence d'une réaction de défense en réponse aux sons rugueux. La rugosité auditive modifie la pertinence comportementale d'un son et augmente la taille de l'espace péri-personnel de l'auditeur (Rizzolatti *et coll.*, 1997). Ces résultats suggèrent que la rugosité sonore est un indice sensoriel induisant des réactions comportementales défensives. Ce qui est d'autant plus intéressant est que l'effet comportemental de la rugosité observé n'est pas lié dans cette étude à une émotion de peur chez l'individu, ce qui serait contre-productif quand le signal de rugosité est utilisé pour synthétiser une alarme sonore dans un système complexe.

1.2 Qu'est-ce qu'une bonne alarme sonore ?

Les alarmes sonores sont nécessaires pour avertir les opérateurs d'un événement potentiellement dangereux. Contrairement aux alarmes visuelles, les alarmes sonores présentent l'avantage de ne pas nécessiter de porter le regard dans une direction précise pour les interpréter. Ceci permet aussi aux alarmes sonores d'engendrer de meilleurs temps de réaction que les alarmes visuelles et de ne pas charger encore plus le canal visuel des opérateurs souvent surchargé (Stanton et Edworthy, 1999).

Par ailleurs, les alarmes sonores sont utilisées dans de multiples domaines (aviation, médicale, etc.). Stanton et Edworthy (1999) classent les alarmes en 4 grandes catégories selon leur utilisation : alarmes personnelles, alarmes dans le transport, alarmes dans le domaine militaire ou alarmes en salle de contrôle. Chaque classe engendre un besoin particulier et, donc, des alarmes différentes. Des alarmes personnelles telles qu'un réveil peuvent, par exemple, être adaptées par l'utilisateur en fonction de ses préférences. De plus, elles ne sont pas nécessairement liées à un problème de sécurité, ce qui tranche avec les alarmes appartenant aux 3 autres classes citées. Ces dernières sont destinées à être

entendues par de multiples opérateurs et il n'est donc pas possible d'adapter ces alarmes à chacun d'entre eux. Cette diversité dans les applications rend impossible de définir une liste de critères parfaitement adaptés à toutes les alarmes. Néanmoins, une alarme doit au moins respecter deux caractéristiques importantes : être détectable et reconnaissable. Ceci est nécessaire pour que l'alarme soit repérée malgré l'ambiance sonore et pour qu'elle engendre une bonne réaction de l'individu auquel elle est destinée. Dans ce but, un certain nombre de critères peut-être défini. C'est sur ce point que portent les recommandations faites par Patterson et Mayfield (1990). Selon eux, un stimulus de type burst composé de pulses est recommandé, car il attire davantage l'attention qu'un signal continu (figure 1.3). Le burst est un signal généralement répétitif et assez court composé de plus petites portions appelées pulses. Le son des battements de cœur avec un battement décomposé en deux temps qui se répète est un exemple de burst.

Dans le cas de l'utilisation de ce type de signal, les paramètres qu'ils recommandent sont les suivants :

Paramètres du burst

- Un minimum de 5 pulses ayant leurs propres caractéristiques temporelles est nécessaire pour éviter les confusions entre les différentes alarmes sonores du système. En effet, Sanderson *et coll.* (2006) ; Edworthy (2011) ; Edworthy *et coll.* (2011) ; Gillard et Schutz (2016) constatent que la confusion entre les alarmes d'un même système est un problème récurrent et qui ne doit donc pas être négligé.
- L'intervalle de temps entre les pulses doit être adapté en fonction de l'urgence que représente l'alarme. Ainsi, dans un système d'alarme donné, l'intervalle de temps entre les pulses du burst ne doit pas dépasser 150 ms pour les alarmes les plus urgentes et être au-delà de 300 ms pour les moins urgentes. Cette recommandation est appuyée par l'étude de Hellier *et coll.* (1993) qui montre que le rythme est la variable la plus efficace lorsqu'il s'agit de manipuler le niveau d'urgence associé à une alarme.

Paramètres du pulse

- La durée du pulse préconisée est de 100 à 200 ms afin qu'il soit assez long pour être perçu tout en conservant la possibilité pour les opérateurs de communiquer eux.

- Chaque pulse doit comporter un onset et un offset d'une durée de 20 à 30 ms pour qu'il ne soit pas trop surprenant et évite de perturber l'opérateur.
- La fréquence fondamentale doit être entre 150 et 1000 Hz.
- Un minimum de 4 harmoniques dont le niveau se situe entre +15 et +25 dB par rapport aux mêmes composantes du bruit environnant est nécessaire. En effet, plus le contenu spectral est riche, plus le risque de masquage diminue. Le choix concernant le niveau sonore permet d'assurer le minimum nécessaire à la détectabilité du pulse tout en limitant le niveau sonore pour limiter les réactions de surprises. D'après Sorkin (1988), un autre intérêt de limiter le niveau de l'alarme est aussi d'éviter que l'opérateur ne soit plus concentré sur la manière de l'interrompre que sur le problème qu'elle signale. De plus, il indique aussi qu'un grand nombre de rapports d'accidents mettent en cause une alarme coupée par le pilote. Ceci notamment en raison de son niveau trop élevé la rendant trop agressive et le perturbant dans sa tâche. D'ailleurs, certains pilotes rapportent eux-mêmes avoir été témoins de ce genre de pratique, apparemment, courante. Enfin, cela permet aussi de limiter l'impact physiologique des alarmes puisqu'un son trop fort peut être à l'origine de lésions auditives.
- Au moins 4 des composantes ayant le plus d'amplitude doivent se trouver dans la zone entre 1 et 4 kHz.
- Au global, le spectre doit être situé entre 0,5 et 5 kHz (pour une application dans l'aviation). Selon les auteurs, les basses fréquences ont pour avantage de bénéficier d'un seuil d'audition assez faible pour diminuer le niveau sonore et d'être moins sujettes à la presbyacousie. Le choix de la borne haute est une volonté d'éviter la zone autour ou au-dessus de 5 kHz qui est plus impactée dans le cas des pertes auditives liées au bruit et à l'âge.
- Des composantes quasi-harmoniques ou un *swipe* (évolution continue de fréquence) peuvent être ajoutées pour ajouter une dimension plus « sévère » au timbre des alarmes devant entraîner une action immédiate.

En plus de ces critères, Patterson et Mayfield indiquent plus globalement que l'individu cible de l'alarme ne doit pas être en mesure de la désactiver de lui-même si possible. Ils ajoutent aussi que le système d'alarme ne doit pas comprendre plus de 6 alarmes devant

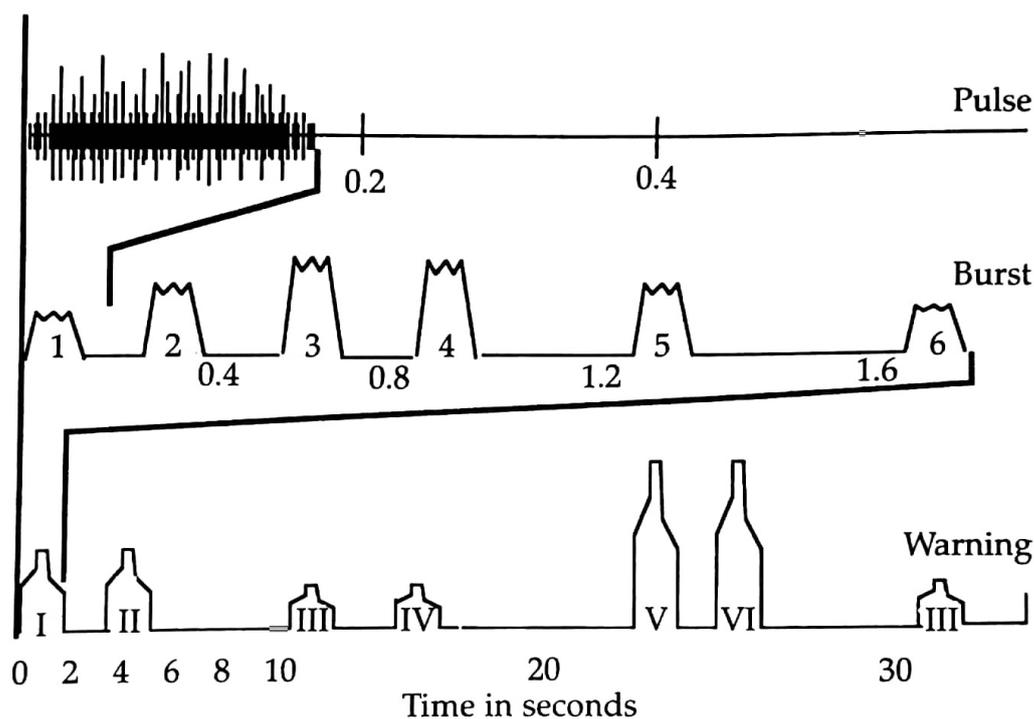


FIGURE 1.3 – Alarme de type pulse-burst telle que définie par Patterson et Mayfield (1990), représentation de Stanton et Edworthy (1999)

engendrer une réaction immédiate et peut comprendre jusqu'à 3 alarmes visant à attirer l'attention vers un panneau visuel (*attensons*).

Pour aller plus loin, les études de Edworthy *et coll.* (1991) et Hellier *et coll.* (1993) portent sur l'urgence perçue associée à une alarme de type pulse-burst telle que préconisée par Patterson et Mayfield. D'une part, ces études mettent en avant le fait que, pour une alarme donnée, l'urgence est perçue avec autant d'intensité entre les participants, ce qui est une donnée importante, car l'alarme reste donc adaptée quel que soit l'opérateur. D'autre part, une seconde donnée importante est que la sensation d'urgence perçue en présence d'une alarme est particulièrement dépendante de son rythme et peu dépendante de sa fréquence fondamentale. La fréquence fondamentale peut donc servir à différencier deux alarmes. Enfin, l'article de 1993 révèle qu'il est possible de quantifier l'effet sur l'urgence perçue associée aux différents paramètres acoustiques et, ainsi, de prédire l'urgence perçue globale de l'alarme comme étant la somme des indices d'urgence associés à chaque paramètre.

À noter que certains modèles sont mis au point pour tenter d'apporter une application à ces critères. En effet, bien que ces recommandations soient maintenant assez anciennes,

elles ne sont que rarement mises en œuvre et les alarmes sont souvent réalisées à l'oreille (Edworthy et Edworthy, 2015 ; Giguère *et coll.*, 2008). C'est pourquoi le modèle de Giguère *et coll.* (2008) par exemple, vise à créer un programme informatique permettant à un ingénieur en charge d'ajouter une alarme dans un environnement de connaître les paramètres les plus appropriés. Ce programme tient compte du niveau sonore des lieux, de l'audition des opérateurs et de leur utilisation de protection auditive. Il tient compte aussi de la géométrie des lieux et des matériaux qui les composent, potentiels isolants ou réflecteurs acoustiques. Ceci permet en sortie de donner à l'ingénieur le nombre de haut-parleurs à mettre ainsi que leur emplacement et leur niveau pour que son alarme soit audible pour tous les opérateurs sans être trop forte.

Au-delà des critères précédents qui ne s'appliquent qu'à des alarmes abstraites, il est possible d'utiliser d'autres types d'alarmes telles que des alarmes verbales ou des icônes auditives (*earcons* ; Edworthy, 2011). Les icônes auditives sont des sons simples représentant une idée. De la même manière qu'un dessin de roue de voiture dont le pneu troué indiquerait une crevaison pour une alarme visuelle, un son de pneu qui se dégonfle pourrait être une représentation du problème. Il peut aussi être simplement possible d'émettre le message verbal « pneu crevé ». Ces deux types d'alarmes ont l'avantage d'être bien plus simple à retenir que les alarmes abstraites et ne nécessitent pas ou peu d'apprentissage. Elles permettent en plus d'obtenir des informations plus précises sur la nature du problème. Cependant, elles sont moins facilement utilisables dans des conditions de bruit élevé et ont le désavantage d'être comprises par tout le monde. Cela les rend moins intéressantes pour les personnels pouvant être au contact du public. Enfin, Gillard et Schutz (2016) indiquent que dans le cas des alarmes de type « icône auditive », des précautions doivent être prises pour qu'elles restent crédibles de sorte qu'elles ne soient pas ignorées. À l'inverse, il faut aussi s'assurer qu'elles ne puissent pas être confondues avec d'autres sons qui engendreraient des fausses alarmes.

1.3 Problèmes liés aux alarmes : alarmes manquées et fausses alarmes

L'effet *Cry-wolf*, littéralement l'effet « crier au loup », est tiré d'un conte pour illustrer la situation d'une alarme ignorée après un trop grand nombre de fausses alarmes (Breznitz, 1984). Tout comme la population ne croit plus en l'histoire du personnage rapportant l'arrivée d'un loup à force de ses fausses alertes répétées, Breznitz rapporte qu'un trop grand nombre de fausses alarmes entraîne une perte de confiance de l'opérateur envers l'alarme en question. Ceci a alors pour conséquence que l'opérateur l'ignore ou, pire, la désactive.

De plus, Breznitz ajoute que le système d'alarmes n'est pas nécessairement en cause dans cette diminution de confiance en l'alarme de la part du pilote. En effet, les expériences répétées d'une réaction du pilote ayant permis d'éviter le danger sans qu'il n'en soit conscient ou d'un danger qui s'est dissipé par lui-même peuvent être interprétées comme des fausses alarmes.

Toujours selon Breznitz, le phénomène de fausses alarmes s'est amplifié en regard du passé. Effectivement, dans le passé, les gens n'ayant pas de systèmes d'alarmes pour les avertir du danger, ils ne s'en apercevaient qu'au moment d'y être confronté et avaient peu de temps pour s'y préparer. La réaction était donc toujours, ou presque, nécessaire, limitant le nombre de fausses alarmes. De nos jours, les systèmes d'alarmes se veulent de plus en plus sensibles et détectent des signaux bien plus faibles en vue de résoudre la situation au plus tôt, voire de prédire l'arrivée d'un danger.

Cependant, l'effet *Cry-wolf* n'apparaît pas dans toutes les situations. En effet Wickens *et coll.* (2009), ont mené une étude sur l'apparition d'un effet *Cry-wolf* en situation de pilotage. Dans celle-ci, un grand nombre de données issues des rapports de conflits aériens récupérées dans différents centres aériens ont été analysées. Le système de conflit aérien est conçu pour prédire lorsque deux avions pénétreront la même zone. Lors d'une telle intrusion, le contrôleur reçoit une alerte visuelle sur son écran. Les fausses alarmes, la réaction du contrôleur aérien, ainsi que la trajectoire de l'appareil sont donc identifiées

et mises en relation. La présence de l'effet Cry-wolf en situation de vol n'a pas été mise en évidence dans cette étude, ce qui laisse indiquer qu'il n'existe pas en situation de vol. Cette remarque est appuyée par LeClerc et Joslyn (2015) qui relève que les conditions d'apparition du phénomène sont peu comprises. En effet, il semble évident qu'une seule fausse alarme ne suffit pas à engendrer le Cry-wolf.

Cependant, ceci s'oppose à l'étude menée par Bliss (2003). Celle-ci a consisté à réunir les données de trois centres en charge de traiter les rapports d'accidents dans l'aviation : l'*Aviation Safety Reporting System* (ASRS), *National Transportation Safety Board's* (NTSB), *U.S. Army Safety Center*. Cette étude a permis d'identifier un lien clair entre accidents (majeurs ou mineurs) et alarmes sonores. Plus précisément, le nombre de fausses alarmes a été fortement en cause dans les accidents. Une autre donnée importante est le fort taux d'alarmes manquées en lien avec des accidents. Si comme le rapportent Wickens *et coll.* (2009) et LeClerc et Joslyn (2015) l'effet Cry-wolf n'est pas la source des alarmes manquées ici, une autre hypothèse est possible, celle de la surdité attentionnelle qui fera l'objet du chapitre 3 plus tard dans cette thèse.

Chapitre 2 : Attention

2.1 Qu'est-ce que l'attention ?

Au quotidien, l'environnement comprend une multitude d'informations qui parviennent à nos différents capteurs sensoriels (œil, oreille, nez, langue, etc.). Ces capteurs filtrent alors une partie de ces informations, par leurs caractéristiques physiques. Cependant, il semble impossible de prêter attention à l'ensemble des stimuli. En effet, bien que votre œil récupère l'information visuelle associée à l'ensemble des lettres présentées dans votre champ visuel, vous n'êtes en mesure de lire qu'une partie du message à la fois, mot à mot. Un premier constat concernant l'attention est donc qu'elle semble effectuer une sélection parmi les stimuli en vue de déterminer lesquels doivent bénéficier d'un traitement plus approfondi pour en obtenir le sens et lesquels peuvent être ignorés. En dehors de notre limite à traiter l'intégralité des stimuli de notre environnement, en ignorer certains semble même une nécessité pour se prémunir de la distraction.

Par exemple, au moment où vous lisez ce texte, il y a peut-être un ensemble de bruits particulier dont vous ne tenez pas compte : du bruit routier à la fenêtre, un bruit de ventilation ou un néon sur le point de ne plus fonctionner et qui clignote, etc. Il peut aussi y avoir une mouche qui vole dans la pièce ou une odeur de café en provenance de la machine d'un collègue prenant une pause. Il y a donc une grande proportion de stimuli qui ne sont pas intéressants en regard de votre tâche de lecture et risquent pourtant de vous distraire. Sur l'ensemble des stimuli dont il est question dans cet exemple, seuls les stimuli visuels associés à votre tâche vous intéressent et traiter les autres risquerait de vous distraire. Il y a donc tout intérêt à ne pas traiter entièrement ces stimuli.

Cet aspect sélectif de l'attention se retrouve dans la première définition de l'attention apportée par James (1910) qui écrivait ceci :

« Tout le monde sait ce qu'est l'attention. C'est la prise de possession par l'esprit, sous une forme claire et vivante, d'un élément à travers ce qui semble être plusieurs objets ou trains de pensée simultanés. La focalisation, la concentration de la conscience en sont ses essences. Elle implique la suppression de

certaines choses afin de traiter efficacement les autres ».

L'aspect sélectif de l'attention, son fonctionnement et ses limites sont abordés dans la littérature scientifique sous le nom d'*attention sélective* (*selective attention*) et fait l'objet d'une première partie concernant les modèles de fonctionnement de l'attention qui en ont émergé. Toutefois, malgré cet aspect sélectif, les situations quotidiennes démontrent qu'il nous est possible d'effectuer deux tâches à la fois, comme conduire en écoutant de la musique à la radio par exemple. Cette première définition apportée par James est donc incomplète puisqu'elle ne traite pas des situations dans lesquelles l'attention nous permet d'effectuer plusieurs tâches à la fois. Généralement, cet aspect de l'attention est abordé dans la littérature scientifique sous le nom d'*attention divisée* (ou partagée, *divided attention* dans la littérature en anglais), sous-entendu « divisée entre plusieurs tâches ». L'étude de cet aspect de l'attention a aussi permis de mettre en place différents modèles. Ceux-ci font l'objet d'une seconde partie. À noter que ces deux ensembles de modèles abordent le sujet de l'attention de deux angles différents et se complètent donc. En effet, les premiers traitant de l'attention sélective parviennent assez efficacement à en expliquer le fonctionnement mais ils ne permettent pas ou peu de comprendre les situations d'attention divisée. De même, les seconds parviennent à expliquer comment l'attention peut se diviser mais ne parviennent pas à s'exporter dans le domaine de l'attention sélective pour en expliquer le fonctionnement.

2.2 Attention sélective

Bien que la première définition de l'attention apportée par James sur la base de son introspection soit incomplète, elle met en lumière des réflexions intéressantes. Comme il le souligne, chacun comprend assez instinctivement de quoi il retourne lorsque l'on parle d'attention. Cela se remarque d'ailleurs à travers notre vocabulaire quotidien qui est fourni d'expressions faisant références à l'attention telles que : « faire attention », « ne pas faire attention », « faire plus attention », etc. Ces différentes expressions semblent traduire différents aspects du fonctionnement de l'attention. Comme le propose la définition de James, l'expression « faire attention » pointe notre capacité à focaliser volontairement notre attention sur un élément. À l'inverse, « ne pas faire attention » indique une capacité à ignorer volontairement un élément au profit d'un autre, ce qui s'accorde avec la

définition proposée. Une troisième expression « faire plus attention » semble traduire un autre aspect non abordé dans cette définition : l'aspect modulable du niveau d'attention accordé. Enfin, un autre aspect non abordé par la définition est la notion d'orientation de l'attention. En effet, dans notre expérience quotidienne, nous avons tous déjà vu notre attention « attirée par » un élément n'ayant aucun rapport avec notre tâche : une lumière ou un son sans rapport avec notre tâche. En dehors de l'orientation volontaire de l'attention, il semble donc possible que celle-ci soit attirée involontairement ailleurs par un stimulus. L'ensemble de ces constats a entraîné les psychologues s'intéressant au sujet de l'attention sélective à se poser les questions suivantes : « Quelle est la limite de cette sélection et comment l'attention permet-elle de sélectionner des informations ? » Selon la manière dont ces questions ont été abordées, deux grands types de modèles ont émergé. Le premier décrit l'attention comme un phare, seuls les stimuli présents dans ce phare sont alors traités. Selon ce premier type de modèles, la sélection est donc d'ordre spatial : l'orientation de l'attention en est à l'origine. Le second type de modèles suppose que la nature même du traitement de l'information est à l'origine de la sélection : certaines structures impliquées dans le traitement des stimuli sont limitées en capacité et empêchent le traitement simultané de plusieurs stimuli. Ceci est à l'origine de goulets d'étranglements dans le traitement de l'information. Généralement, le terme « filtre » est aussi employé pour parler de ces modèles par analogie avec un filtre au sens de l'électronique qui ne laisse passer en sortie qu'une partie des informations reçues en entrée. Ce terme est celui préféré pour la rédaction de cette thèse. Ces deux grands types de modèles de l'attention sélective sont détaillés dans les deux sections suivantes avec, en premier, un modèle basé sur l'orientation de l'attention et, en second, les modèles basés sur la présence de filtres.

2.2.1 Orientation de l'attention

Dans les années 1980, Hermann Von Helmholtz remarque qu'il lui est possible de mieux percevoir certaines lettres dans son champ visuel : celles sur lesquelles il décide de porter son attention. Au cours d'une expérience portant sur la perception visuelle, il fixe son regard au centre d'un écran sur lequel un ensemble de lettres est projeté très brièvement. Son objectif est alors de rapporter le plus de lettres possible. Helmholtz constate qu'il lui est possible de porter son attention dans une zone de son champ visuel périphérique choisie au préalable en vue de rapporter les lettres présentes dans cette zone plutôt que

celle de la zone sur laquelle il fixe son regard. Pourtant, la durée de présentation des lettres à l'écran était inférieure aux 200 ms qui auraient été nécessaires au déplacement de son regard vers une lettre (Gazzaniga *et coll.*, 2008). Il conclut donc tout d'abord de cette expérience que l'attention n'est pas un effet visuel mais bien une capacité à part entière ayant pour fonction de sélectionner les stimuli qu'il souhaite traiter au détriment des autres : ici les lettres sur lesquelles il porte son attention font l'objet d'un traitement plus approfondi que les autres. De plus, sa seconde conclusion est que l'attention peut être orientée volontairement. Dans le cas de son expérience, Helmholtz remarque que son regard étant resté fixé au centre de l'écran, il n'aurait pas été possible pour un observateur externe de déterminer où il souhaitait porter son attention. En conséquence, il nomme ce type de comportement *attention cachée (covert attention)*, car il n'est pas possible de déterminer où un individu oriente son attention sans qu'il ne le révèle. Le comportement inverse qui laisse la possibilité de déterminer le centre de l'attention d'un individu à l'aide de son regard, d'un mouvement de sa tête ou d'un autre indice est appelé *attention manifeste (overt attention)*.

Orientation volontaire de l'attention

L'orientation volontaire de l'attention est de nouveau étudiée plus tard par Posner *et coll.* (1978, 1980) qui s'intéressent aux réactions comportementales de participants lors d'une tâche de détection en présence ou en l'absence d'un indice servant à guider leur attention. La consigne donnée aux participants était de fixer une croix au milieu d'un écran tandis qu'ils devaient répondre le plus vite possible à l'apparition d'une cible (un flash lumineux) présentée à droite ou à gauche de la croix (illustration en figure 2.1). Au cours de l'expérience, deux conditions supplémentaires ont été testées. Dans la première condition, une flèche remplaçait la croix centrale avant que le flash ne soit émis. Cette flèche pouvait être orientée en direction de la future cible (indice valide) ou dans la direction opposée (indice invalide). Ceci avait pour objectif d'orienter l'attention du participant à la position de la future cible ou en dehors. La condition dans laquelle la croix n'était pas remplacée était considérée comme la condition d'indice neutre. Les participants d'une seconde expérience devaient, eux, indiquer si ce flash était situé plus haut ou plus bas que l'indice fléché.

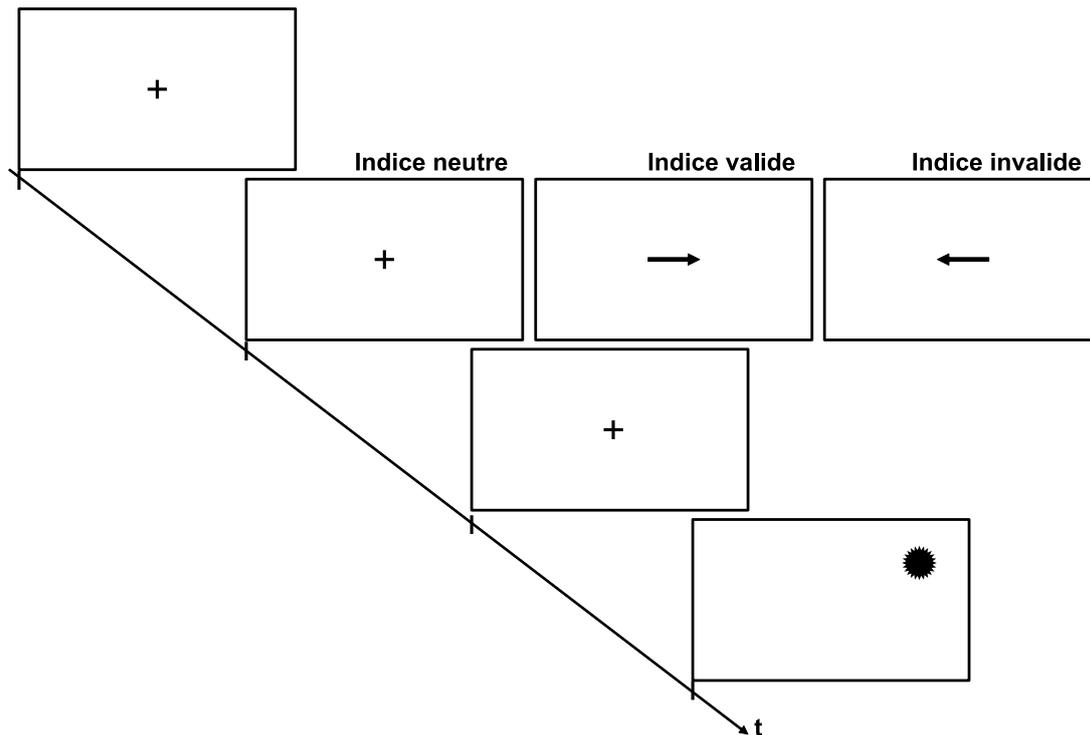


FIGURE 2.1 – Schéma de l'expérience décrite par Posner *et coll.* (1978, 1980) permettant la mise en évidence de la possibilité d'orienter volontairement son attention. La tâche à réaliser consiste à détecter le plus rapidement possible l'apparition du flash lumineux représenté ici par une étoile ronde. L'apparition est précédée d'un indice valide (s'il indique la bonne direction) ou non. L'indice peut aussi rester neutre. En comparaison avec la présence d'un indice neutre, le temps de réaction diminue en présence d'un indice valide ($RT_{valide} - RT_{neutre} < 0$) alors qu'il augmente lorsque l'indice est invalide ($RT_{invalide} - RT_{neutre} > 0$).

La tâche de détection simple a mis en évidence un effet de la validité de l'indice. C'est-à-dire qu'un indice valide, engendrait un temps de réaction significativement plus court qu'un indice invalide (~ 240 ms contre ~ 300 ms). Lorsque l'indice restait neutre, le temps de réaction était autour de 260 ms, soit plus grand que celui mesuré en présence d'un indice valide mais inférieur à celui mesuré pour un indice invalide. Ces résultats suggèrent que lors d'une tâche de détection, l'attention puisse effectivement être orientée volontairement à une position donnée et qu'en comparaison d'une condition sans indice (neutre), l'orientation de l'attention par la présence d'un indice a un impact sur la rapidité de détection. L'impact est positif dans le cas où l'attention a été préalablement orientée à l'endroit de la future cible ou négatif dans le cas où elle a été orientée à l'opposé. L'orientation de l'attention est donc bien à l'origine d'un avantage à la détection d'un stimulus, comme le remarquait plus tôt Helmholtz. Aussi, la comparaison des trois conditions d'indice démontre que la détection est d'autant plus difficile que la distance séparant le stimulus du

lieu de l'attention augmente. En effet, lorsque l'indice est valide, l'attention se situe dans la même zone que l'objet alors qu'elle est dans une zone plus éloignée en condition neutre et plus éloignée encore en condition d'indice invalide.

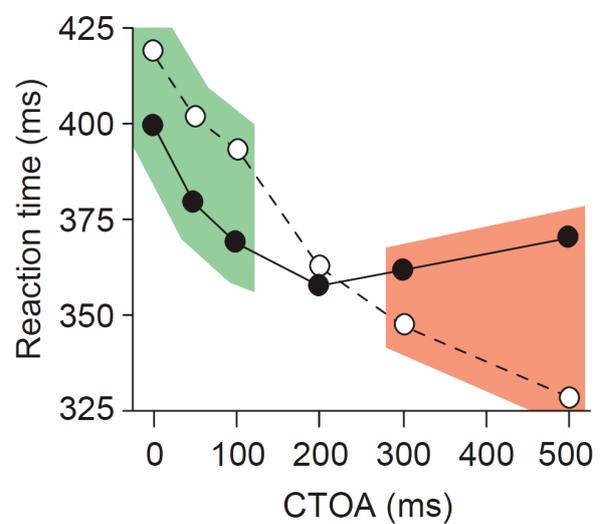
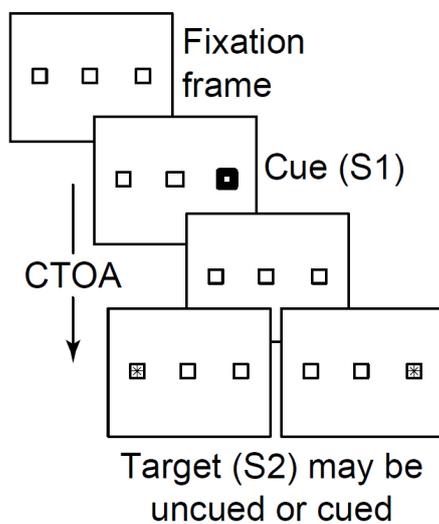
La tâche plus complexe demandant aux participants de juger de la hauteur du flash en regard de l'indice a, elle aussi, permis de retrouver cet effet de la validité de l'indice mais celui-ci est moins prononcé. De plus, les temps de réactions se sont en moyenne allongés de 200 ms dans cette expérience par rapport à la précédente. En effet, le temps de réaction moyen pour les participants ayant eu à réaliser la tâche de détection simple est de ~ 250 ms alors qu'il passe à ~ 450 ms pour les participants ayant eu à réaliser la tâche d'identification de la position du stimulus, ce qui traduit une hausse de la difficulté dans cette tâche par rapport à la précédente. Il semble donc que la réduction de l'effet de la validité de l'indice soit liée à cette hausse de la difficulté. Ici, les participants ont été obligés de réorienter leur attention vers leur représentation interne (les stimuli n'étant plus présents à l'écran) pour pouvoir poursuivre leur analyse et répondre correctement à la tâche, ce qui a eu pour effet d'augmenter leurs temps de réaction.

Orientation réflexe de l'attention

Si l'attention peut s'orienter volontairement, Posner et Cohen (1984) mettent en évidence qu'elle peut aussi s'orienter de manière involontaire. Le protocole utilisé dans cette étude est une adaptation du protocole détaillé dans la partie précédente impliquant la détection d'une cible en présence d'un indice indiquant valide ou non. Cependant, cette fois, l'indice n'est plus une variation de la croix centrale mais un clignement d'un des deux cadres dans lesquelles la source peut apparaître. La localisation de l'indice n'étant plus corrélée avec le point de fixation du regard, il ne s'agit plus de diriger volontairement son attention après interprétation de l'indice, mais d'avoir son attention attirée à la position à laquelle il est situé¹. De plus, cette fois, l'expérience comprend des essais sans cible de manière à limiter la tendance des participants à anticiper leur réponse. Comme illustré en figure 2.2, les auteurs s'intéressent à la durée séparant l'indice de l'apparition de la cible qu'ils font varier entre 0 et 500 ms. Comme ils s'y attendaient, les auteurs retrouvent à nouveau un effet avantageux de la présence d'un indice valide sur le temps de réaction

1. Les deux versions de cette expérience et des précédentes comprenant un indice central sont disponibles à l'adresse suivante : <http://cogitolabo.risc.cnrs.fr/posner.php>

à une tâche de détection, ce qui indique la possibilité pour l'attention d'être orientée de manière réflexe plutôt que volontaire. Cependant, ils mettent en évidence une limite à l'avantage apporté par un indice valide. Celui-ci n'existe que si la durée qui sépare l'indice de la cible est inférieure à 200 ms. Au-delà, un indice valide représente un frein à la détection en rallongeant les temps de réaction en regard de ceux engendrés par un indice invalide. Ceci est nommé l'effet d'inhibition au retour (*inhibition of return*) dans la littérature. Selon Bartolami *et coll.* (2012), cet effet traduit peut-être une stratégie évitant à l'attention de se porter à nouveau si tôt à une localisation déjà analysée.



(a) Schéma expérimental de l'expérience de Posner et Cohen (1984)

(b) Temps de réaction à la détection en fonction de l'écart temporel entre l'indice et la cible

FIGURE 2.2 – Illustration de l'expérience et des résultats de l'étude Posner et Cohen (1984) tirée de l'article de Klein (2000). Lorsque des participants réalisent une tâche de détection en présence d'un indice pouvant prendre la position de la cible ou la position opposée, le temps qui sépare l'indice de la cible a un effet variable. S'il est inférieur à 200 ms alors un indice valide (cercles pleins en (b)) donne un avantage à la détection en termes de temps de réaction par rapport à un indice invalide (cercles vides en (b)). En revanche, au-delà de 400 ms d'écart, un indice valide entraîne un désavantage à la détection.

Modèle du phare attentionnel

Sur la base de leurs résultats expérimentaux, Posner *et coll.* ont établi un modèle de l'attention : le modèle du *phare attentionnel* (*spotlight*). Ce modèle décrit l'attention comme un phare pouvant être orienté. Les stimuli présents dans la zone éclairée par ce phare attentionnel voient leur traitement privilégié en regard des autres présents en dehors de cette zone, dont le niveau de traitement est de plus en plus faible au fur et à mesure

qu'on s'éloigne de cette zone, aussi appelée zone de focus attentionnel. Ce modèle implique donc une limite de capacités puisque la zone de focus attentionnel a une taille définie et limitée. Cette limite expliquerait alors le caractère sélectif de l'attention. Concernant la zone de sélection, ce modèle prévoit que l'attention puisse être orientée extérieurement (un son, une image, etc.) ou intérieurement, vers une pensée ou une représentation interne d'un stimulus en mémoire par exemple. Enfin, cette orientation peut être réalisée suivant deux mécanismes distincts. Le premier fait appel à des processus montant (*bottom-up*), c'est-à-dire qu'il est directement et involontairement déclenché par un stimulus saillant qui va venir attirer l'attention. Dans ce cas, l'attention est dite *exogène* (ou *réflexe*). Le second mécanisme fait appel à des processus descendants (*top-down*), c'est-à-dire qu'il est déclenché volontairement par l'individu qui décide sur quels stimuli il souhaite porter son attention. Dans ce cas, l'attention est dite *endogène* par opposition au premier mécanisme.

Appliqué aux expériences précédentes (Posner *et coll.*, 1978, 1980; Posner et Cohen, 1984), ce modèle permet aisément d'expliquer les résultats obtenus. En effet, il explique d'une part que l'attention soit attirée de façon exogène dans l'étude de 1984 et, d'autre part, qu'elle puisse être allouée volontairement dans les deux autres études. De plus, il explique aussi que lors de ces deux études, lorsqu'un indice était présent, le participant a pu orienter volontairement son phare attentionnel dans une direction. De fait, il a été avantagé quand le stimulus cible est apparu là où son attention avait été préalablement orientée, car le flash s'est retrouvé dans son phare attentionnel. Mais à l'inverse, orienter son attention à l'opposé a augmenté la distance entre le flash et sa zone de focus attentionnel, justifiant ainsi un moins bon traitement à l'origine d'une hausse du temps de réaction.

Le modèle de phare attentionnel répond donc à plusieurs questions comme celles portant sur la nature sélective de l'attention, la manière dont elle peut être dirigée ainsi que des situations dans lesquelles elle se retrouve attirée par un stimulus. Toutefois, il ne semble pas en mesure d'expliquer notre capacité à réaliser plusieurs tâches à la fois, ce qui le rend incomplet. En effet, selon ce modèle, le phare attentionnel ne peut pas être divisé pour allouer de l'attention à différentes tâches. Ce modèle reste néanmoins applicable à de nombreuses situations et est une bonne métaphore imageant le concept d'attention sélective. Enfin, ce modèle présente l'avantage de décrire la dimension spatiale de l'attention puisqu'il prévoit de pouvoir l'allouer à une zone de l'espace particulière.

2.2.2 Filtres attentionnels

En psychologie, la manière dont les informations sont traitées est souvent vue sous le prisme de la théorie du traitement de l'information qui voit le système cognitif comme un système traitant les données reçues avant de les enregistrer ou de déclencher une réponse à celles-ci (Maquestiaux, 2017). Cette théorie modélise alors le système cognitif comme un ensemble de structures à travers lesquelles passe un stimulus en entrée (au niveau des capteurs sensoriels) pour engendrer une sortie (une prise de décision par exemple). Comme le représente la figure 2.3, le système est généralement décomposé en trois structures. La première étape de traitement d'un stimulus passe par la *mémoire sensorielle* (ou *registres d'informations sensorielles*) dans laquelle les caractéristiques physiques des stimuli recueillis par les capteurs sensoriels sont conservées pendant un temps très court. La seconde étape du traitement se passe en *mémoire de travail* (ou *mémoire à court terme*), structure où les stimuli sont enregistrés sur une durée plus longue et où se déroulent des opérations mentales intervenant dans de nombreuses activités cognitives telles que la prise de décision. Enfin, les stimuli sont ensuite dirigés vers la mémoire à long-terme si nécessaire en vue de s'en rappeler ultérieurement. Selon ce modèle, il existe une structure de contrôle déterminant le passage d'une information d'un stade de la mémoire au suivant. Par exemple, effectuer une opération mathématique posée nécessite d'encoder les informations visuelles correspondant aux chiffres en mémoire sensorielle puis de les transmettre en mémoire de travail le temps d'effectuer le calcul. Dans cet exemple, le résultat n'accédera sûrement pas à la mémoire à long-terme puisqu'un calcul n'est généralement utile que sur l'instant.

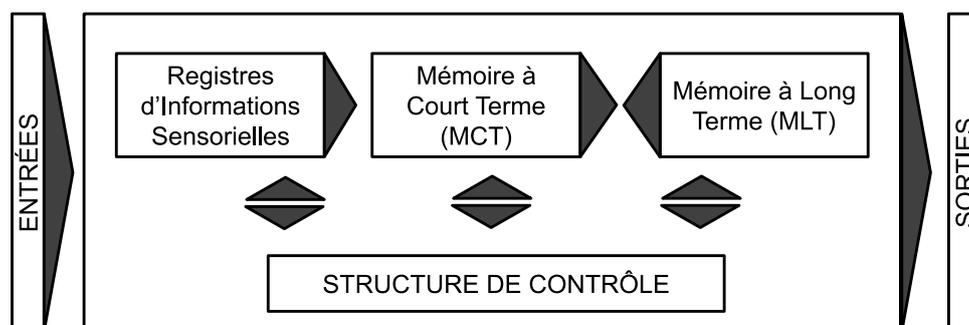


FIGURE 2.3 – Modèle de fonctionnement du système cognitif selon la théorie du traitement de l'information, schéma reproduit du livre de Lemaire et Didierjean (2018)

Une façon d'aborder l'attention sélective par les psychologues a donc été de proposer des modèles dans lesquels les informations entrant dans le système cognitif sont triées et limitées en raison de la présence de *filtres* (ou *goulets d'étranglements*) à certaines étapes du traitement des stimuli. Cette approche a été à l'origine de trois grandes théories permettant chacune d'expliquer certains résultats expérimentaux : la théorie d'un filtre précoce, la théorie d'un filtre atténuateur et la théorie d'un filtre tardif. Chacune est développée dans les trois sous-parties suivantes.

Modèle du filtre sélectif

L'existence d'une attention sélective n'est pas réservée à la modalité visuelle. En effet, il est possible de focaliser son attention sur une discussion avec une personne même dans une salle assez bruyante accompagné d'autres personnes discutant aussi entre elles, lors d'un cocktail par exemple. Cette situation a été nommée « Cocktail Party problem » par Cherry (1953) et est aujourd'hui référencée sous le terme d'*effet cocktail* ou *effet cocktail party*. Par définition, cette situation illustre classiquement l'intérêt d'une attention sélective en audition.

En vue de déterminer l'étendue de cette sélection, Cherry étudie la capacité d'un participant à réaliser une tâche de « *shadowing* » (ou « filage »). La tâche de shadowing consiste à répéter un message au fur et à mesure qu'il est diffusé. Son étude est décomposée en sept expériences différentes dont chacune comprend deux phrases enregistrées au préalable par un même homme. Dans un premier temps, lors de l'écoute diotique (message identique dans les deux oreilles) les deux phrases sont mixées ensemble puis diffusées dans les deux oreilles du participant. Le participant a alors pour instruction de répéter l'un des deux messages et a l'autorisation de rejouer les stimuli autant de fois qu'il le désire en vue de réussir à séparer les deux messages pour répéter sa phrase cible. Dans une première condition, le participant n'est pas autorisé à prendre des notes alors qu'il y est autorisé lors d'une seconde condition. Cherry analyse subjectivement que la tâche leur semble bien plus compliquée lorsque la prise de notes est interdite puisque, dans ce cas, certains ferment leurs yeux pour se concentrer et doivent parfois réécouter les stimuli 10 à 20 fois selon les phrases. Il note toutefois que les participants parviennent toujours à réaliser la tâche, malgré la difficulté. Dans le but de déterminer la limite de la capacité à

isoler un message cible, lors de la seconde expérience, les deux phrases prononcées sont ce que Cherry appelle des clichés : des phrases fréquemment utilisées et dont il est très facile d'imaginer la fin sans forcément l'entendre. Dans ce cas effectivement, dans 50 % des cas, les participants ne parviennent pas à répéter leur message cible et répète l'autre message.

Ces résultats sont déjà très intéressants, mais ceux des expériences suivantes de l'étude sont ceux qui ont le plus marqué l'étude de l'attention sélective. Elles comportent toutes des écoutes dichotiques (messages différents dans chaque oreille) : les deux phrases sont isolées chacune dans une oreille. Cherry étudie alors l'impact de diverses modifications concernant le message à ignorer :

- la langue de ce message peut être modifiée ;
- il peut être interrompu par une femme, par une partie du message diffusée à l'envers ou par un son pur ;
- il peut être identique à la phrase cible mais émis avec un délai.

Enfin, dans la dernière expérience, les deux messages (cible et celui à ignorer) échangent leurs positions passant ainsi d'un écouteur à l'autre de manière périodique ou non. Les résultats de cet ensemble d'expériences indiquent que, lorsque les participants sont questionnés à propos des sons à ignorer, seules leurs caractéristiques physiques peuvent être rapportées. Les informations impliquant un plus haut niveau de traitement tel que des mots, des phrases, le sens ou même le langage ne peuvent pas être rapportées en dehors du cas unique où les deux messages sont identiques mais présentés avec un délai temporel. Dans tous les cas, les participants restent très performants à la tâche de shadowing même lorsque les oreilles de la phrase cible et de la phrase à ignorer sont inversées plusieurs fois et même lorsque ces inversions ne sont pas régulières.

À partir de telles observations, Broadbent (1958) propose le modèle de *filtre sélectif précoce* illustré en figure 2.4.

Broadbent rajoute deux boîtes au modèle de traitement de l'information. Dans un premier temps, les stimuli sont encodés en mémoire sensorielle sans aucune transformation. À l'issue de cet encodage, lors d'une étape dite *pré-attentive*, les caractéristiques physiques des stimuli sont analysées en parallèle, c'est-à-dire que toutes ces caractéristiques peuvent

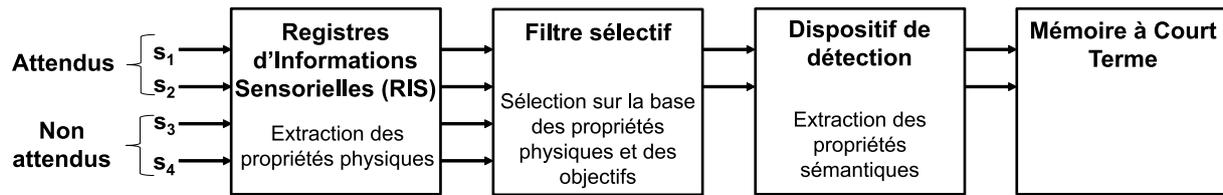


FIGURE 2.4 – Illustration du modèle de Broadbent (1958), selon ce modèle le filtrage des stimuli s’effectue avant l’extraction de ses propriétés sémantiques

être analysées simultanément. L’étape de traitement suivante, le dispositif de détection, permet l’analyse sémantique des stimuli. Selon Broadbent, ce traitement est plus complexe que l’analyse des caractéristiques physiques et nécessite donc un traitement des stimuli en série. Cette limite de capacités engendre alors un goulot d’étranglement empêchant le traitement de l’ensemble des stimuli. C’est donc lors de l’étape pré-attentive qu’un filtrage serait effectué sur la base des caractéristiques physiques (hauteur, intensité, localisation, etc). Ce filtrage permet de ne laisser que les stimuli pertinents accéder aux traitements plus profonds tels que l’analyse sémantique.

D’après ce modèle, lors d’une tâche d’attention sélective, aucune distraction n’est possible et aucune information sémantique ou nécessitant un niveau de traitement plus élevé que l’analyse des caractéristiques physiques ne peut être rapportée. Ce modèle semble donc bien appuyer les résultats obtenus par Cherry. Pourtant, certaines études en audition viennent mettre en évidence une limite de ce modèle.

La première étude généralement citée comme limite au modèle de Broadbent est celle de Moray (1959). Dans cette étude, Moray utilise de nouveau l’écoute dichotique avec ses participants. Il réalise alors trois expériences comprenant une tâche de shadowing. À l’issue de la première expérience, les participants sont questionnés sur ce qu’ils ont pu entendre dans l’oreille ignorée : d’abord par une question simple, puis dans un second temps, une liste de mots leur est fournie avec l’instruction de cocher ceux ayant été entendus. Cette liste contient à la fois des mots présentés dans l’oreille suivie et des mots présentés dans l’oreille ignorée, en plus de mots totalement nouveaux. Aucune différence significative de performance n’est observée entre le taux de reconnaissance des nouveaux mots et le taux de reconnaissance des mots appartenant au message ignoré. En revanche, une différence significative est relevée entre la reconnaissance des nouveaux mots et des mots appartenant au message suivi. D’après cette première expérience, il semble donc

qu'aucune information issue du message ignoré ne puisse être rapportée comme l'avait remarqué Cherry, appuyant alors le modèle de Broadbent. Cependant, l'auteur note que, selon lui, nous répondons toujours à notre propre prénom même lorsque le rapport signal sur bruit est faible comme dans le cas d'une discussion lors d'un cocktail. Il expérimente donc ceci à l'aide des deux expériences suivantes. Dans la seconde expérience de son étude, il introduit dans certains messages (suivis ou ignorés) une instruction pouvant comprendre le nom du participant et lui ordonnant de s'arrêter. Lorsque cette instruction se trouve dans le message suivi, la plupart des participants l'ignorent, comprenant que l'expérimentateur tente de les distraire. Le plus intéressant se passe lorsque l'instruction se trouve du côté du message ignoré. Dans ce dernier cas, une différence significative de détection de l'instruction est relevée entre la condition dans laquelle le prénom du participant est inclus dans l'instruction et celle où il n'y est pas inclus. En présence du prénom du participant, 51 % des instructions sont détectées contre seulement 11 % en l'absence du prénom. La troisième et dernière expérience de l'étude est similaire mais, cette fois, ce sont des chiffres qui sont inclus. Les participants sont alors répartis en deux groupes : le premier est informé du fait qu'il sera questionné à propos de son message suivi en fin d'essai et le second a pour instruction de retenir les chiffres entendus en plus de sa tâche de shadowing. Le taux de détection des chiffres n'a jamais été significatif. En comparant ces deux expériences, il semble donc que si certains messages sont effectivement très bien filtrés comme le prévoit le modèle de Broadbent, d'autres en revanche semble passer la barrière de l'attention comme c'est le cas pour le prénom du participant.

Moray n'est pas le seul à mettre en évidence ce paradoxe. Celui-ci est également mis en évidence dans deux autres études (Treisman, 1964a,b). De nouveau, les participants réalisent une tâche de shadowing lors d'une écoute dichotique. Ici, le message cible est un passage de prose.

Dans la première étude, le nombre de canaux distracteurs varie dans un premier temps ainsi que leurs localisations. Treisman compte pour cela jusqu'à trois canaux : le premier (*A*) et le second (*B*) correspondent respectivement aux écouteurs gauche et droit, le troisième canal (*C*) correspond aux deux écouteurs à la fois. C'est-à-dire qu'un message peut être émis en monaural ou en binaural. Il est donc localisé à gauche ou à droite, ou sur les deux en même temps, cette dernière condition donnant la sensation d'un son en face du

visage. Tout d'abord, les participants réalisent la tâche avec uniquement le message cible émis dans un canal (A , B ou C). Puis, un message distracteur est ajouté dans l'un des deux canaux restants. Le message distracteur peut donc être perçu sur l'oreille opposée à celle contenant le message cible ou sur les deux oreilles. À noter qu'il existe une autre condition : puisque la cible peut être émise en binaural via le canal C , l'un des deux écouteurs correspondant à l'un des deux canaux monauraux restant (A et B) comprend un distracteur en plus du message cible. Enfin, un second message distracteur est ajouté par la suite dans le canal restant ou dans le même canal que le premier distracteur. Dans ce cas, le participant peut alors percevoir un son par canal ou la cible sur l'un des canaux et deux distracteurs réunis ensemble sur un même canal.

Cette première variation de localisation correspondant en fait à une variation d'azimut, l'auteur fait ensuite varier l'intensité des messages en vue de simuler une variation de distance. Le genre des locuteurs varie aussi de sorte que les trois messages soient prononcés par des femmes ou que l'un des messages distracteurs soit prononcé par un homme. La cible partage sa hauteur avec un seul distracteur ou les deux.

Toutes les modifications réalisées dans cette première phase sur le message distracteur sont donc des modifications physiques : ajout d'un distracteur, modification de la localisation des messages et de leur hauteur via la modification du genre des locuteurs. L'ensemble de ces modifications de caractéristiques physiques a toujours montré un impact significatif sur les performances à la tâche de shadowing. Ce qui implique que les caractéristiques physiques ont bien été encodées et ont bien servi de base au filtrage réalisé par l'attention.

Dans un second temps, le contenu des messages distracteurs est modifié. Il peut alors être remplacé par des nombres ou du texte dans différentes langues (d'abord en tchèque puis d'autres langues sont évaluées dans l'étude de Treisman, 1964b). La modification ici effectuée est donc d'ordre sémantique. Il apparaît que ces modifications n'ont pas eu d'impact sur les performances à la tâche de shadowing en ce qui concerne le langage, appuyant le modèle de Broadbent. En revanche, le remplacement par des nombres a rendu la tâche de shadowing plus facile, les performances dans ce cas y étant meilleures. Cela indique donc, comme l'observait Moray (1959), que certains messages à ignorer peuvent parfois bénéficier d'un traitement au niveau sémantique. Tous les messages à ignorer

ne sont donc pas filtrés aussi strictement que l'indique Broadbent sur la base de leurs caractéristiques physiques.

Ces résultats expérimentaux appuyés par ceux obtenus par Moray ont alors donné lieu à deux théories venant s'opposer à celle de Broadbent. La première est la théorie du *filtre atténuateur*, élaborée par Treisman développée dans la section qui suit. La seconde, qui sera développée dans la section d'après, propose un *filtre tardif*.

Modèle du filtre atténuateur

Le modèle proposé par Treisman (1964a) (voir figure 2.5) en conclusion de son article reprend pour partie de celui de Broadbent mais vient y apporter une correction majeure : les stimuli à ignorer ne sont pas complètement éliminés mais seulement atténués par le filtre, de la même manière qu'agirait un filtre en électronique. Là encore, ce sont bien les caractéristiques physiques qui sont utilisées en vue de déterminer quels sont les stimuli pertinents et quels sont ceux qui ne le sont pas et doivent être atténués.



FIGURE 2.5 – Illustration du modèle de Treisman (1964a), selon ce modèle le filtrage des stimuli s'effectue avant l'extraction de ses propriétés sémantiques mais les stimuli filtrés sont atténués et non pas supprimés contrairement au modèle proposé par Broadbent (1958).

2.2.3 Modèle de filtre tardif

Une seconde hypothèse engendrée par les résultats expérimentaux de Moray (1959) et Treisman (1964a,b) est celle d'une sélection arrivant plus tardivement que le prévoient les modèles de filtre précoce. Celle-ci se ferait après l'analyse sémantique, donc après identification complète du stimulus. C'est ce que proposent Deutsch et Deutsch (1963) dans leur modèle de filtre tardif (figure 2.6).

Ce modèle de sélection tardive proposé par Deutsch et Deutsch est appuyé par de nombreuses études, les plus souvent mentionnées sont celles de Stroop (1935) qui comprend

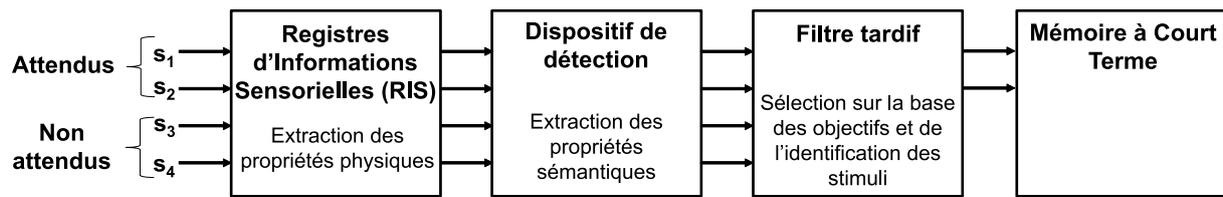


FIGURE 2.6 – Illustration du modèle de Deutsch et Deutsch (1963), selon ce modèle le filtrage des stimuli s’effectue après l’extraction de ses propriétés sémantiques au moment de la réponse de l’individu.

une tâche du même nom et les études utilisant une tâche nommée *Flanker task*.

La tâche de Stroop consiste, dans sa forme originale, à présenter des noms de couleurs à des participants en leur demandant de rapporter la couleur de l’encre dans laquelle est écrit le mot. La couleur de l’encre peut alors être congruente ou non, c’est-à-dire que la couleur de l’encre peut être celle à laquelle le mot fait référence ou non. Par exemple, « Noir » est ici écrit en noir, ce qui correspond à la condition congruente. En revanche, puisque « Jaune » est ici écrit en noir, cette condition serait incongruente. Lors de la réalisation de cette tâche, le temps de réponse des participants lorsque le nom est incongruent est presque deux fois plus important que lorsqu’il est congruent, passant d’environ 60 ms dans la condition congruente à 110 ms dans la condition incongruente. Dans une autre tâche mise en place par Eriksen et Eriksen (1974, *Flanker task*), des participants ont pour objectif l’identification d’une lettre cible en présence de distracteurs congruents, incongruents ou neutres présentés à gauche et à droite de la cible. L’identification de la cible doit conduire les participants à appuyer sur un bouton ou un autre suivant que la cible appartient au premier groupe (H ou K) ou au second groupe (S ou C) tandis que les distracteurs appartiennent au groupe cible de l’essai, au groupe non-cible ou n’appartiennent à aucun des deux groupes. Là encore, la présence d’un distracteur incongruent vient perturber la tâche d’identification de la cible. Or, une analyse sémantique de ce distracteur a nécessairement été réalisée au préalable pour définir la catégorie dans laquelle il se trouve : cible ou non-cible. La conséquence est une interférence du distracteur lorsqu’il est incongruent, ce qui pousse à donner une mauvaise réponse. Dans ces deux expériences, l’information sémantique du distracteur a donc impacté les performances à la tâche principale. Cela appuie la théorie d’un filtre tardif, au moins en vision.

Concernant la modalité auditive, celle-ci aussi a fourni des résultats expérimentaux en faveur de ce modèle. Une réaction électrodermale lors de la prononciation de noms de villes dans un texte à répéter pour une tâche de shadowing a été observée chez des participants conditionnés au préalable par la réception d'un choc électrique léger lors de la prononciation de nom de villes au sein d'une liste de mots (Corteen et Wood, 1972 ; Corteen et Dunn, 1974). Là aussi, les noms de villes ont été analysés au niveau sémantique, de sorte à être catégorisés et à induire une réaction similaire lors de l'étape de conditionnement. L'attention sélective auditive est de nouveau mise en jeu via un second protocole basé sur l'écoute dichotique dans deux autres études. Il est demandé aux participants de suivre le contenu d'une oreille tandis qu'ils ignorent le contenu de l'autre. En revanche, cette fois-ci, le traitement du stimulus ignoré est étudié au travers d'une réaction comportementale. Dans la première étude (Lackner et Garrett, 1972), le message cible est une phrase ambiguë, de sorte qu'il est possible de l'interpréter de deux manières. Par exemple, selon les auteurs : « The spy put out the torch as our signal to attack ». Ici, « put out » peut signifier « éteindre » ou « préparer ». Dans le même temps, le message à ignorer est une phrase apportant un élément de contexte faisant pencher vers l'une des deux interprétations si elle vient à être perçue. En reprenant l'exemple précédent donné par les auteurs, la phrase à ignorer peut donc être : « The spy extinguished the torch in the window », ne laissant ici aucun doute sur le fait que l'espion ait éteint la torche. Le participant doit alors paraphraser ce qu'il a entendu après l'écoute. S'il a perçu la phrase à ignorer, alors celle-ci doit avoir une influence sur son interprétation de la phrase cible. La seconde étude (Mackay, 1973), reprend ce protocole en y apportant toutefois quelques différences. Cette fois-ci, des mots sont utilisés pour introduire du contexte à la place des phrases à ignorer. Aussi, les participants ne doivent plus paraphraser mais choisir entre deux propositions comprenant les deux interprétations possibles. Une critique de l'expérience de Lackner et Garrett est la nécessité de paraphraser qui implique que le participant travaille de nouveau sur le stimulus perçu en mémoire pour le reformuler. Donner le choix entre deux propositions permet donc d'éviter ces processus qui peuvent influencer le stimulus mémorisé. Que ce soit la première étude ou la seconde, prenant soin de proposer un choix de réponse aux participants et en se référant uniquement aux essais où la tâche de shadowing a été correctement réalisée, le contenu du message à ignorer a toujours influencé les interprétations du message cible par les participants. Or, si le mes-

sage à ignorer a eu une influence sur l'interprétation du message cible, il a nécessairement été perçu et traité au moins jusqu'à l'étape sémantique. Ces résultats appuient donc la théorie d'une sélection tardive. De plus, une hypothèse de Broadbent ou Treisman concernant le traitement approfondi d'un distracteur est que celui-ci a bénéficié d'une fuite de l'attention (*attentional leakage* dans la littérature). Celle-ci aurait donc basculé rapidement vers le stimulus à ignorer avant de revenir sur celui ciblé. Or, ici, cette explication n'est pas possible, car les conclusions portent uniquement sur les essais dans lesquels la tâche de shadowing est parfaitement réalisée, ce qui indique que l'attention était bien portée sur les stimuli cibles (Corteen et Wood, 1972 ; Corteen et Dunn, 1974 ; Lackner et Garrett, 1972 ; Mackay, 1973).

Cependant, comme la théorie d'une sélection précoce, la théorie d'une sélection tardive possède aussi une faille : elle prévoit qu'un distracteur sera toujours perçu. Or, comme l'indiquent les précédentes expériences en faveur du modèle de sélection précoce, ce n'est pas le cas. Malgré les résultats expérimentaux en faveur d'une sélection tardive, il n'est donc pas possible de se contenter d'une théorie plutôt que l'autre. De plus, Maquestiaux (2017) remarque que la tâche de shadowing a été majoritairement utilisée dans les différents protocoles mais émet une interrogation sur le fait que celle-ci capture suffisamment l'attention pour éviter les fuites de l'attention comme cela a été affirmé par les auteurs des différentes études.

2.2.4 Modèles hybrides

Modèle du filtre multiple

Aucun des modèles de l'attention sélective ne s'est avéré plus efficace que les autres en permettant de répondre à l'ensemble des questions qu'elle soulève. C'est pourquoi tous ces modèles conservent intérêt : chacun permet d'apporter des éléments de réponses à certaines questions concernant l'attention sélective. Par conséquent, la volonté d'élaborer un modèle unifiant les réponses à toutes ces questions a poussé à l'émergence de modèles hybrides plus ou moins mis en lumière. C'est le cas du modèle hybride proposé par Yantis et Johnston (1990, *multiple locus model*) sur la base de plusieurs réflexions faites à propos des modèles et résultats expérimentaux.

La première réflexion est que le modèle d'un filtre précoce semble bien expliquer les observations faites lors d'une tâche d'attention sélective mais moins bien celles faites à partir de tâches nécessitant de diviser son attention, ce qui correspond finalement à élargir sa sélection à une plus large gamme de stimuli. En effet, une sélection précoce permet d'expliquer la capacité d'un individu à focaliser son attention sur une tâche puisqu'elle interrompt le traitement d'un stimulus potentiellement distracteur dès ses premiers traitements, à une étape où tous les stimuli peuvent être traités en parallèle. Les traitements réalisés sur ce potentiel distracteur ne se font donc pas au détriment des stimuli cibles. De fait, la présence de stimulus n'apporte aucune distraction. D'un autre côté, dans ce modèle, la limite de capacités de traitement par les structures en charge de l'analyse sémantique oblige un traitement en série plutôt qu'en parallèle des stimuli qui y parviennent et entraîne alors un filtrage précoce des informations. En effet, si tel est le cas, il n'est pas possible de diviser son attention efficacement, car l'analyse en série des stimuli risque de mener à manquer un stimulus, même attendu, si le précédent n'est pas traité assez rapidement avant qu'il ne soit oublié, la durée de stockage dans les registres sensoriels étant très courte.

La seconde réflexion est qu'à l'opposé, le modèle d'une sélection tardive est plus intéressant pour expliquer la capacité à diviser son attention puisqu'il suggère une analyse en parallèle et automatique de tous les stimuli jusqu'à l'étape sémantique. Si tel est le cas, il est alors possible de traiter en même temps plusieurs stimuli pour ensuite s'affranchir des moins pertinents. Par contre, ce modèle suppose que nous soyons mauvais dans une tâche d'attention sélective puisque le haut niveau de traitement de tous les stimuli augmente fortement la probabilité d'être distrait par ces derniers.

La troisième réflexion faite par Yantis et Johnston concerne les conclusions des études portant sur la sélection précoce. Selon eux, prouver l'existence d'un filtre précoce n'empêche en rien la possibilité qu'un filtre tardif existe en plus du premier.

Enfin, la quatrième réflexion concerne cette fois-ci les conclusions des études portant sur la sélection tardive. Ces dernières démontrent l'existence d'une sélection tardive par un échec de la sélection précoce. Dans l'étude de Corteen et Wood (1972) par exemple, les auteurs démontrent qu'une analyse sémantique des noms de ville a été réalisée par les

participants, indiquant que ceux-ci n'ont pas été filtrés par l'attention sur la base de leurs caractéristiques physiques, mais bien après, une fois clairement identifiés. Or, d'après Yantis et Johnston, démontrer une absence de sélection précoce n'induit pas nécessairement que ce filtre n'existe pas. Ils émettent l'hypothèse que ces échecs peuvent être expliqués par le fait que les protocoles utilisés lors de ces observations ne permettent pas de focaliser assez intensément l'attention du participant, ce qui entraîne des *fuites d'attention* (*attentional leakage*). Selon eux, respecter les critères suivants permet d'éviter ces fuites :

- L'indice utilisé pour indiquer la position de la cible doit être toujours valide et d'une durée minimum de 200 ms.
- La position de la cible doit changer après chaque essai.
- Le nombre d'éléments doit être assez élevé.
- La répartition géométrique des stimuli ne doit pas mettre en évidence l'un des stimuli par rapport aux autres.
- Les stimuli doivent être bien espacés entre eux pour que, lors du traitement, la cible ne puisse être regroupée avec un autre stimulus.
- La réponse doit nécessiter l'analyse de plusieurs caractéristiques de sorte à assurer que le participant ne puisse utiliser aucune stratégie facilitant sa réalisation de l'expérience.

Ces critères, basés sur des résultats expérimentaux précédents, ont pour objectif d'assurer que le participant focalise bien son attention à l'endroit désiré par les expérimentateurs : d'une part, en rendant la tâche trop difficile pour qu'il soit possible de laisser son attention se diviser sur d'autres éléments et, d'autre part en utilisant un indice toujours valide le participant sait qu'il ne doit analyser que la zone indiquée sans aller vérifier dans les autres zones. En vue de valider l'hypothèse d'une mise en évidence du filtre précoce lorsque les fuites attentionnelles sont limitées, les auteurs mettent au point une expérience dans laquelle, à chaque essai, des lettres étaient présentées en cercle dont le centre était un point de fixation. Le déroulement s'effectuait en trois sessions dont deux d'entre elles comportaient un indice de 100 ou 200 ms. Dans la première session, sans indice, la condition était dite d' « indice neutre ». Dans la seconde session, l'indice était une flèche à l'emplacement du point, alors que cette flèche était directement à l'emplacement d'une des lettres dans la troisième session. Aussi, dans certains essais, la lettre

cible était redondante, se trouvant aussi en un exemplaire parmi les lettres non-cibles. Les participants avaient pour consigne d'appuyer sur un bouton ou un autre en fonction de la présence ou l'absence de leur cible. Lors de la première partie expérimentale, l'indice était toujours valide quand seulement 80 % d'entre eux étaient valides dans la seconde partie. La redondance de la lettre cible n'a eu un effet bénéfique sur le temps de réaction à la détection que dans la seconde partie expérimentale, indiquant que ce distracteur n'a pas bénéficié de traitement sémantique lors de la première partie quand l'indice était toujours valide. Ces résultats expérimentaux appuient l'idée qu'empêcher les fuites d'attention est nécessaire pour mettre en évidence la sélection précoce, ce qui a aussi été démontré dans une autre étude Lachter *et coll.* (2004).

Ces réflexions mènent Yantis et Johnston à conclure à l'existence des deux filtres à la fois : précoce et tardif. L'individu tirerait alors parti de ces filtres selon ses objectifs en pouvant, si besoin, engager plus ou moins l'un ou l'autre des deux filtres. Ce modèle prévoit donc que l'attention dépende entièrement des objectifs de l'individu et de la stratégie qu'il souhaite mettre en place (dans la littérature en anglais, *goal-directed*). Le filtrage attentionnel s'effectuerait alors en deux étapes. La première étape d'atténuation serait effectivement réalisée sur la base des caractéristiques physiques des stimuli, tandis que la seconde étape, située après l'analyse sémantique, permettrait de filtrer une seconde fois les stimuli sur la base de leur identification afin de ne garder que les stimuli attendus. Ceci permettrait alors que les stimuli non-attendus soient en partie analysés afin de s'assurer qu'ils ne comportent pas d'informations importantes, telles que notre nom ou la présence d'un danger par exemple. Les résultats expérimentaux hétérogènes concernant les études de la position du filtre attentionnel et des informations qui peuvent accéder à un haut niveau de traitement s'expliquent donc, d'après ces auteurs, par les différences entre les tâches mises en œuvre. Dans une tâche nécessitant de focaliser son attention, les objectifs du participant entraîneraient un filtrage précoce alors que pour une tâche impliquant la division de son attention entre plusieurs stimuli, ses objectifs seraient à l'origine d'un filtrage tardif.

L'idée impliquant que le fonctionnement de l'attention puisse dépendre de la nature de la tâche réalisée est aussi soulevée par Kahneman et Treisman (1984). En effet, ces auteurs distinguent les protocoles expérimentaux des études préalables sur l'attention sélective en

deux grandes catégories. Ils nomment la première *filtering paradigm*. Les protocoles expérimentaux se rangeant dans cette catégorie comprennent l'émission simultanée de stimuli cible et non-cible, un mode de report complexe et une identification de la cible sur la base d'une caractéristique différente de celle à l'origine de la réponse. C'est le cas, par exemple, des protocoles de *shadowing*. Dans ces protocoles, l'émission des stimuli cible et non-cible est bien simultanée et l'identification de la cible se base sur la localisation physique du son alors que la réponse n'indique pas une localisation (cible à gauche ou cible à droite) mais consiste à répéter à haute voix le stimulus cible lui-même, le report de la réponse est donc plus complexe qu'un simple « oui/non ». Ici, le participant doit obligatoirement focaliser son attention sur le stimulus défini par l'expérimentateur puisqu'il n'est pas possible d'écouter une oreille en répétant simultanément ce qui est prononcé dans l'autre oreille. Dans la seconde catégorie de protocoles que les auteurs nomment *selective set paradigm*, le participant est plus libre concernant les stimuli à suivre et les stratégies à mettre en place. Un protocole typique de cette catégorie pourrait être, par exemple, d'identifier une lettre parmi d'autres lettres non-cibles en présence d'un distracteur congruent ou non (*Flanker task*, Eriksen et Eriksen, 1974). Ici, la détection de la cible peut se faire avec la stratégie de recherche de la lettre cible ou de la lettre qui diffère des autres. À noter que cette observation de Kahneman et Treisman ne tient que dans le cas où les lettres non-cibles sont toutes identiques, sinon la tâche nécessite bel et bien de se focaliser uniquement sur la cible. Cependant, ici, il reste malgré tout une différence avec les protocoles qu'ils classent dans la première catégorie, retrouver la cible peut nécessiter de scanner l'ensemble des lettres alors qu'une tâche de *shadowing* ne nécessite pas d'écouter le message de l'oreille ignorée pour vérifier qu'il ne correspond pas à la cible.

D'après Kahneman et Treisman, la première catégorie de protocoles correspond aux études concluant à l'existence d'un filtre précoce alors que la seconde catégorie correspond aux études concluant à l'existence d'un filtre tardif. Ils concluent donc que la différence de conclusion provient en fait de la différence entre les tâches mises en jeu. Comme le proposent Yantis et Johnston (1990), Kahneman et Treisman proposent qu'une tâche obligeant la focalisation de l'attention de manière efficace a plus de chance de mettre en évidence un filtre précoce.

Théorie de la charge perceptive

Lavie et Tsal (1994) rappellent que si le modèle de filtrage précoce émis par Broadbent (1958) prévoyait effectivement un filtrage sur la base des caractéristiques physiques, la raison à l'origine de ce filtrage est une limite de capacités attentionnelles. L'ensemble des modèles proposés par la suite reprennent le postulat d'une capacité maximum de capacités utilisables dans un temps défini. Cependant, définir une limite haute permet uniquement d'expliquer le filtrage observé dans des situations où les capacités attentionnelles sont entièrement consommées par une tâche très demandeuse mais ne permettent pas d'expliquer la sélection attentionnelle effectuée en condition où cette limite n'est pas atteinte en raison d'une tâche assez simple pour ne pas consommer l'intégralité de nos ressources attentionnelles, cas pourtant beaucoup plus fréquent dans la vie quotidienne. Dans ce cas, la question qui se pose est la suivante : « S'il est nécessaire d'être à court de ressources attentionnelles pour éviter le traitement d'un distracteur, peut-on volontairement allouer moins de ressources que ce dont on dispose pour éviter la distraction par un stimulus inattendu ou toutes nos ressources sont-elles obligatoirement engagées ? »

Par ailleurs, comme les auteurs le font remarquer dans leur revue de la littérature, la plupart des études portant sur l'attention sélective traitent principalement de l'importance de la distinction des caractéristiques physiques de la cible et du distracteur. Cela permet de déterminer les situations où le distracteur est traité ou ignoré. La question de la limite des capacités perceptives n'est donc pas abordée. C'est pourquoi Lavie et Tsal précisent l'idée de Kahneman et Treisman en indiquant que la différence entre les protocoles à l'origine des modèles de filtres précoce et tardif tient dans le niveau de charge perceptive qu'ils impliquent, menant parfois à une demande en ressources plus élevée que la limite disponible. Avant de définir le modèle mis au point par Nilli Lavie, il convient donc de définir la notion de charge perceptive dans un premier temps.

Définition de la charge perceptive

D'après Nilli Lavie la charge perceptive se définit comme la demande attentionnelle engendrée par le biais de deux composantes différentes :

1. Le nombre de stimuli faisant partie dans la tâche. Plus la tâche comprend de stimuli

différents, plus la charge perceptive est élevée.

2. La complexité de la tâche. Plus précisément, cette complexité dépend du nombre d'opérations perceptives nécessaire à la réalisation de la tâche. Plus la tâche est complexe, plus la charge perceptive est élevée. Par exemple, détecter une cible définie par sa forme et sa couleur parmi un ensemble de distracteurs pouvant prendre la même forme ou la même couleur constitue une tâche plus complexe que celle de détecter cette même cible uniquement par sa couleur qui serait toujours différente de celle des distracteurs puisque dans le premier cas, il est impossible de n'utiliser que l'une des deux caractéristiques pour détecter sa cible.

Modèle de Nilli Lavie : « Perceptual Load Theory » (PLT)

Le modèle « *Perceptual Load Theory (PLT)* » établi par Nilli Lavie (Lavie et Tsai, 1994 ; Lavie, 2005), propose que l'attention sélective soit réalisée à l'aide de deux grandes catégories de mécanismes : l'une d'origine perceptive et l'autre d'origine cognitive.

En ce qui concerne les mécanismes perceptifs, ils sont à l'origine d'un filtrage passif des stimuli. En effet, en condition de charge perceptive élevée, lorsqu'une tâche très demandeuse en ressources attentionnelle consomme l'intégralité des ressources disponibles, le filtrage s'effectue « mécaniquement » de manière précoce par manque de ressources supplémentaires nécessaires à l'analyse sémantique sur la base des propriétés physiques puisqu'elles sont les seules informations disponibles à ce stade de traitement. Tout se passe donc dans ce cas comme le prévoient les modèles de sélection précoce. En revanche, la totalité des ressources attentionnelles disponibles d'un individu sont toujours entièrement utilisées.

De fait, lorsque la tâche est peu demandeuse, l'excès de ressources restant disponibles est alors automatiquement et involontairement alloué au traitement des autres stimuli de notre environnement moins pertinents en regard de la tâche exécutée. Ceci implique que dans le cas où la tâche ne serait pas assez demandeuse en ressources attentionnelles, il n'est pas possible de s'affranchir volontairement du traitement d'un stimulus pour résister à la distraction. Dans ce cas le filtrage s'effectue alors tardivement, comme prévu par le modèle de Deutsch et Deutsch (1963), par le biais des mécanismes cognitifs de sélection.

En ce qui concerne les mécanismes cognitifs, ceux-ci ont pour rôle de définir et de maintenir la priorité d'accès aux traitements de haut-niveau pour les stimuli pertinents : ceux intéressants du point de vue de la tâche. Le seul contrôle de l'individu sur sa perception est donc dans la définition de ses priorités concernant les stimuli à suivre pour réaliser correctement sa tâche. Ces mécanismes ont un rôle important lorsque la charge perceptive est basse puisqu'il permet d'éviter que la perception d'un stimulus non pertinent ne vienne perturber notre tâche.

Ce modèle a pour conséquence une diminution du traitement d'un potentiel stimulus distracteur lors d'une hausse de la charge perceptive. La distraction est donc plus difficile dans ce cas. Au contraire, une hausse de la charge cognitive peut engendrer l'échec des mécanismes permettant de maintenir la priorité aux traitements des stimuli pertinents. En conséquences, un stimulus non pertinent a plus de chance d'être traité. La distraction est donc plus probable dans ce cas.

Selon ce modèle, de la même manière que celui proposé par Yantis et Johnston (1990), il existe un filtre attentionnel flexible dont la position au sein des traitements dépend du niveau de ressources demandé par la tâche. Cependant, ici, ce ne sont pas les objectifs seuls du participant qui définissent le mode de filtrage utilisé, mais bien les caractéristiques de la tâche en elle-même (que celle-ci implique une charge perceptive élevée ou faible, c'est-à-dire qu'elle implique un coût élevé ou faible de ressources attentionnelles).

Arguments en faveur de la PLT

Un premier argument en faveur du modèle de Nilli Lavie est une étude qu'elle réalise l'année suivant la proposition de son modèle (Lavie, 1995). Dans cette étude, elle réalise trois expériences en vision adaptées du paradigme de la *Flanker task* et détaillées ci-dessous.

La première expérience comprend deux conditions de charge perceptive dans lesquelles la tâche est identique, mais l'affichage diffère. Dans un premier bloc d'essais correspondant à la condition de charge perceptive basse, l'écran comprend une lettre centrée verticalement contre 6 dans le second bloc qui correspond à la condition de charge élevée. Au-dessus ou au-dessous des lettres centrales, l'écran présente une lettre distractive. Le participant

doit alors identifier le plus vite possible sa cible parmi deux possibles en appuyant sur un bouton ou l'autre. Le distracteur est neutre, compatible ou incompatible, c'est-à-dire qu'il ne correspond à aucune des deux cibles potentielles, à la cible émise ou à la seconde non utilisée dans l'essai. La lettre cible apparaît aléatoirement à l'une des 6 positions centrales utilisées dans la condition de charge élevée. Ceci permet d'évaluer l'impact de la distance entre le distracteur et la lettre cible. Dans cette expérience, l'effet de la compatibilité n'existe qu'en condition de charge perceptive basse et est plus prononcé dans les essais où la lettre cible est plus éloignée du centre de l'écran. À noter que le centre de l'écran correspond ici au centre de l'attention. Par conséquent, lorsque la cible s'éloigne de cette zone, elle est moins bien traitée, d'où l'effet plus grand du distracteur sur les temps de réaction dans cette condition.

Lors de la seconde expérience, la ligne centrale comprend deux stimuli : une lettre et un symbole. Le symbole conditionne la réponse (protocole dit « go/no-go »). En condition de charge perceptive basse, le participant n'identifie sa cible que lorsque le symbole est bleu alors qu'en condition de charge élevée, le symbole doit recueillir deux caractéristiques : être rond et rouge ou carré et bleu. Ici, l'augmentation de la charge perceptive n'a d'effet que sur l'interférence produite par un distracteur incompatible.

Enfin, lors de la troisième expérience, dans la condition de charge perceptive basse, la ligne centrale de l'écran comprend une lettre accompagnée d'un symbole (go) ou d'une autre lettre (no-go). Dans la condition de charge élevée, la lettre centrale est toujours accompagnée d'un symbole, la condition pour répondre est que ce symbole soit de la bonne taille et à la bonne position. Dans cette dernière expérience, l'effet d'incompatibilité ne se retrouve de nouveau qu'en condition de charge perceptive basse.

En conclusion, cette étude pointe bien une diminution de l'interférence apportée par un distracteur en condition de charge perceptive élevée, comme le prévoit la PLT. De plus, l'interférence augmente pour une cible périphérique plutôt que centrale.

En ce qui concerne maintenant l'effet d'une hausse de la charge cognitive, celle-ci vient être appuyée par l'équipe de Nilli Lavie dans une étude plus récente (Lavie *et coll.*, 2004). Cette étude était décomposée en cinq expériences. Les essais expérimentaux se déroulaient

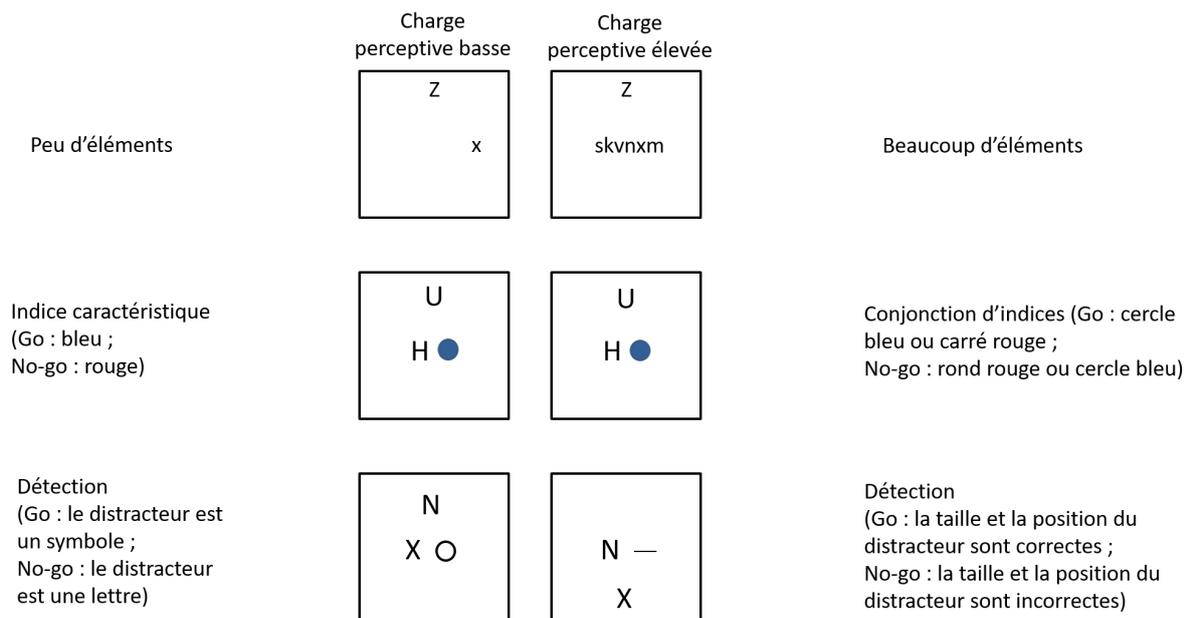


FIGURE 2.7 – Schéma simplifié des écrans affichés au participant lors des expériences de Lavie (1995), inspiré de Chen et Cave (2016). Dans chacune des expériences, la condition de distracteur incompatible est représentée ici.

de la manière suivante :

1. Présentation d'un écran d'éléments à mémoriser.
2. Présentation d'un écran de masques : des étoiles (*) remplaçaient chaque élément de l'écran précédent.
3. Une tâche d'attention sélective nécessitant l'identification d'une cible en appuyant sur un bouton ou un autre selon la cible présente (parmi deux possibles). Dans cette tâche, un distracteur était présent et devait être ignoré. L'affichage de stimuli était identique à celui présenté sur la première ligne de la figure 2.7.
4. Réponse du participant à la tâche de mémorisation.

Lors de la première et la seconde expérience, la charge cognitive variait avec une condition de charge basse consistant à la mémorisation d'un chiffre contre six chiffres pour la condition de charge élevée. La seconde expérience faisait varier la consigne : retenir ces chiffres dans sa tête ou par la répétition à haute voix. Lors de ces deux premières expériences, l'effet de la compatibilité du distracteur sur les temps réaction à l'identification de la cible a bien varié en augmentant dans la condition de charge cognitive élevée par rapport à la condition de charge cognitive basse.

La troisième expérience apportait en plus une variation de la charge perceptive avec une condition basse ne comportant aucun élément non-cible autre que le distracteur à ignorer et une condition de charge perceptive élevée comprenant cinq éléments non-cibles en plus du distracteur à ignorer. Là encore, la hausse de la charge cognitive a entraîné une hausse du traitement du distracteur à ignorer. En revanche, la hausse de la charge perceptive a engendré une diminution du traitement de ce distracteur.

Les deux dernières expériences de l'étude ont consisté à inverser l'ordre du déroulement expérimental en demandant la réponse à la tâche de mémorisation avant la tâche d'attention sélective. Ainsi la charge cognitive est relâchée au moment de la tâche d'attention sélective. Ceci a permis de comparer cette condition à une seconde dans laquelle il n'y avait plus à réaliser que la tâche d'attention sélective. Ces dernières expériences ont permis de mettre en évidence un effet plus grand de la compatibilité du distracteur avec la cible en condition de double tâche. Ce qui confirme la PLT concernant la nécessité d'avoir des ressources cognitives disponibles pour maintenir la priorité sur le traitement des stimuli pertinents.

2.3 Attention divisée

Puisque les capacités attentionnelles semblent limitées et que l'attention est sélective par nature, est-il possible de partager nos ressources pour réaliser plusieurs tâches à la fois ? Si oui, dans quelle mesure ? À quel point sommes-nous efficaces et quelles sont les limites de cette division ? Si on s'en réfère à notre expérience quotidienne, il semble que nous soyons effectivement capables de diviser notre attention entre plusieurs éléments dans certaines situations alors que cela semble plus complexe dans d'autres situations. Lemaire et Didierjean (2018) proposent l'exemple intéressant de la conduite. Lors des premières heures de conduites, il est difficile pour un conducteur de tenir une discussion, car cette nouvelle tâche lui semble très difficile et nécessite toute son attention. Avec le temps et la pratique, la conduite lui semble de plus en plus facile et il n'a plus aucun soucis à tenir une discussion avec son passager. Bien que cet exemple d'évolution dans le temps fasse référence à l'aspect non traité dans cette thèse de l'automatisation des processus, il reste intéressant de noter que l'interférence entre les deux tâches semble dépendre du niveau d'attention requis pour la réalisation de chacune d'entre elles. De fait, il semble

que lorsqu'il s'agit d'étudier l'attention dans des situations nécessitant la réalisation de plusieurs tâches, l'attention puisse se représenter comme un système composé d'un ou plusieurs réservoirs de ressources dans lequel on viendrait puiser plus ou moins en fonction du besoin.

2.3.1 Modèle d'une ressource unique

La réflexion à propos d'une représentation de l'attention sous la forme d'un réservoir de capacités a mené Kahneman à proposer un nouveau modèle concernant le fonctionnement de l'attention permettant de prendre en compte la question du partage de l'attention. Dans le chapitre 2 de son ouvrage *Attention and Effort* publié en 1973, il indique le cheminement de pensées suivant. Kahneman rapporte que le système cognitif est considéré comme un ensemble de structures réagissant chacune à un stimulus particulier. De cette manière, les stimuli sont identifiés en fonction de la structure qui s'active en sa présence. Or, cette vision pousse à ne s'intéresser qu'aux connexions entre les différentes structures ainsi qu'à leur niveau d'activation et il n'est pas nécessaire d'avoir une vision globale des capacités d'attention. De fait, dans cette situation, les modèles de l'attention agissant comme un filtre suffisent. Cependant, ils ne permettent pas de répondre clairement à la question de la manière dont l'attention peut se partager entre plusieurs tâches. Le niveau de difficulté pour la réalisation d'une tâche semble être influencé par deux facteurs : l'éveil et l'ajout d'une tâche secondaire qui serait déjà compliquée à réaliser seule. Ces deux constats mènent Kahneman à proposer un nouveau modèle dans lequel les capacités d'attention fonctionnent à la manière d'un réservoir dans lequel l'individu vient piocher en fonction de ses besoins pour la réalisation de chaque tâche (illustration du modèle en figure 2.8).

Ce réservoir a une capacité maximale qui dépend du niveau d'éveil de l'individu et il y a, par conséquent, une limite de capacités utilisables en un temps donné. Il ajoute que tous les stades de l'analyse d'un stimulus ne requièrent pas forcément d'attention. Ainsi, les premiers stades associés à l'analyse sensorielle ne demandent pas d'attention puisque chaque caractéristique physique vient activer une structure ou l'autre. Les stades suivants en revanche, chargés de l'analyse perceptive et permettant l'identification du stimulus, semblent demander de l'attention puisque l'identification peut être plus compliquée, voire impossible en présence d'une seconde tâche. Ces stades de l'analyse sont donc soumis à ce

maximum de capacités utilisables contrairement aux premiers stades. Une tâche devient réalisable dès lors que des capacités lui sont allouées, dans le cas contraire la tâche ne peut être réalisée. De plus, une tâche plus difficile est nécessairement plus demandeuse. Le maximum de capacités est donc directement lié à la réussite d'une tâche et est aussi à l'origine des interférences pouvant exister entre deux tâches en compétition pour l'accès à ces capacités. Si une tâche impose une demande trop grande par rapport aux capacités disponibles, celle-ci risque d'être altérée ou d'échouer. De même, la consommation de ressources par une tâche diminue les ressources disponibles pour la réalisation d'une seconde tâche. Si l'une des deux est trop demandeuse et prioritaire, la seconde risque alors de ne plus bénéficier d'assez de ressources pour un traitement optimal et sera donc altérée ou échouera. Bien entendu, Kahneman note qu'une tâche peut aussi échouer pour d'autres raisons telles que le manque d'informations utiles.

D'après Kahneman, en comparant ce modèle basé sur les capacités avec ceux reposant sur des origines structurales à la sélection telles que la présence de filtres, l'interprétation des interférences entre deux tâches diffère. Ici, l'interférence est uniquement due à un manque de ressources et deux tâches interfèrent automatiquement dès lors qu'elles engendrent une demande plus grande que les capacités disponibles à l'instant où elles sont réalisées. Tandis que selon les modèles impliquant des filtres, l'interférence est due à la nécessité pour deux tâches d'accéder à une même structure de traitement en même temps alors que celle-ci n'est capable que d'un traitement en série et ne peut donc pas traiter les deux tâches à la fois. L'interférence est inexistante si les deux tâches ne font pas appel aux mêmes processus.

2.3.2 Modèle de ressources multiples

Concernant la manière dont l'attention se divise pour permettre la réalisation de plusieurs tâches en parallèle, Wickens propose un second modèle s'opposant à celui de Kahneman (1973) : le *modèle de ressources multiples* (*multiple resources model*). Bien que ce modèle ait été formalisé et diffusé dans l'ouvrage de Parasuraman et Davies (1984), Wickens pose les bases de son modèle quelques années auparavant (Wickens, 1981).

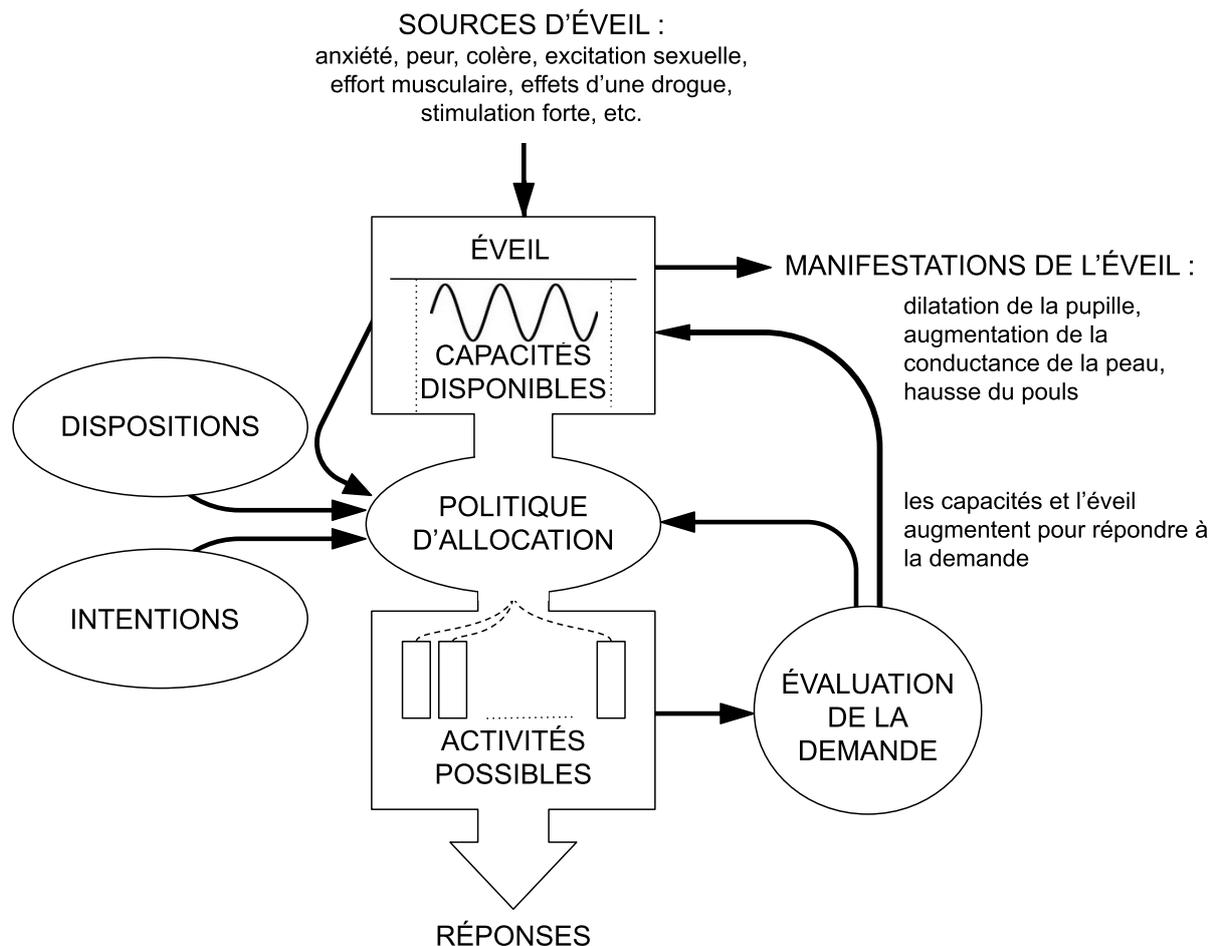
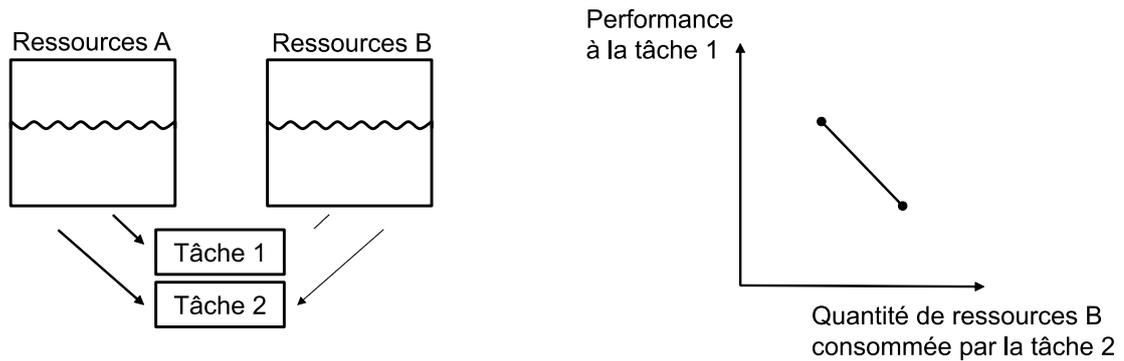


FIGURE 2.8 – Modèle de capacité unique de Kahneman (1973, figure traduite et adaptée à partir des figures 1-2 et 2-2). La politique d'allocation définit la répartition des capacités disponibles entre les différentes activités possibles. Elle tient compte du niveau de capacités disponibles, de la demande (qui évolue avec le nombre d'activités à réaliser), des dispositions (règles définissant l'allocation réflexe de l'attention) et des intentions (règles d'allocation de l'attention définies par les objectifs de l'individu)

Contrairement au modèle de Kahneman proposant une ressource unique et partagée, le modèle de Wickens avance que les ressources attentionnelles se répartissent en plusieurs réservoirs dont chacun est associé au traitement d'un aspect particulier de la tâche. De plus, chaque tâche nécessite la mobilisation de plusieurs types de ressources et vient donc puiser dans plusieurs réservoirs. Ainsi, en situation multitâche, deux tâches n'ont de risque d'interférer entre elles que si elles viennent puiser dans un (ou plusieurs) réservoirs communs. Au plus deux tâches partagent des aspects similaires pouvant nécessiter l'accès à un même réservoir de ressources tel que le fait de partager une modalité d'entrée ou sortie, au plus elles risquent d'interférer. La figure 2.9 illustre la comparaison entre les modèles d'une ressource unique et de ressources multiples.

Cas où les tâches mobilisent les mêmes ressources en attention



Cas où les tâches mobilisent des ressources en attention distinctes

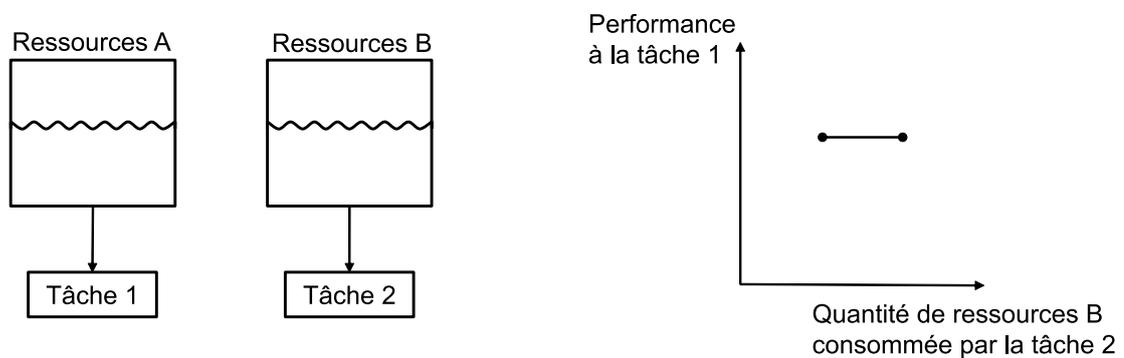


FIGURE 2.9 – Deux représentations possibles de l’influence de la consommation de ressources par une tâche 2 sur la performance à une tâche 1 selon Wickens (1981). Dans le cas où les deux tâches puisent dans les mêmes réservoirs de ressources, la performance à la tâche 1 est diminuée à mesure que la quantité de ressources puisée dans l’un des réservoirs communs par la tâche 2 augmente. À l’inverse, dans le cas où les deux tâches puisent dans un réservoir de ressources différent, la performance à la tâche 1 ne dépend pas de la quantité de ressources puisée dans le réservoir B par la tâche 2.

Concernant la manière dont se répartissent les ressources attentionnelles, après une revue de littérature des études traitant de l’efficacité d’un individu à réaliser deux tâches en parallèle, Wickens (1984) aboutit à une représentation en trois dimensions qu’il complète pour une représentation quatre dimensions (Wickens, 2008) illustrée en figure 2.10.

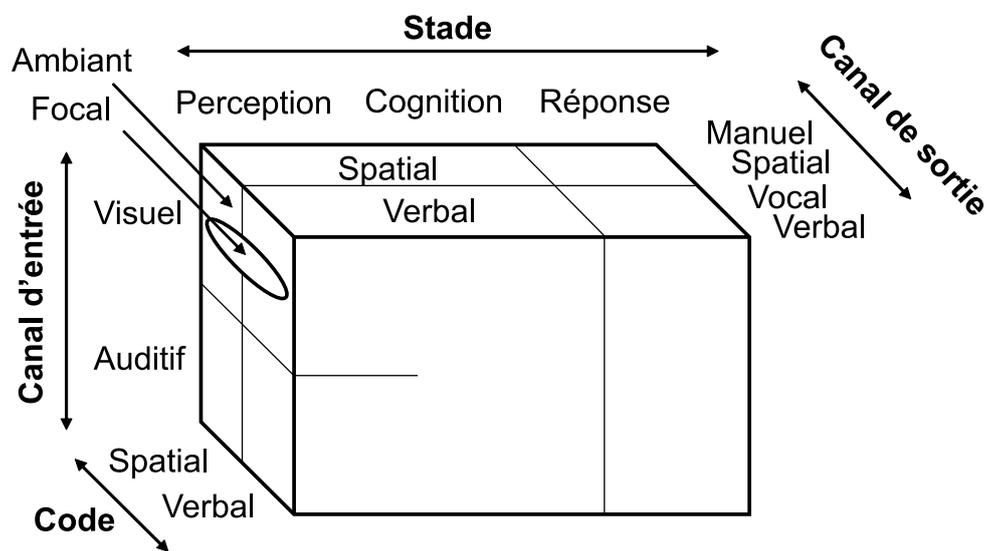


FIGURE 2.10 – Traduction de l'illustration du modèle de ressources multiples en quatre dimensions proposé par Wickens (2008).

Chapitre 3 : Échecs de l'attention

3.1 Échec à la détection d'une cible lors d'une présentation en série

Lors d'une présentation rapide d'une série d'images pouvant contenir une ou deux cibles – *Rapid Serial Visual Processing* (RSVP) – Broadbent et Broadbent (1987) mettent en lumière un nouvel effet attentionnel : une incapacité à détecter une seconde cible visuelle (*T2* ou *probe*) si celle-ci apparaît entre 100 et 500 ms après la première cible (*T1*, figure 3.1). Ce déficit engendré par la première cible n'apparaît pas lorsqu'elle est ignorée et résulte donc bien d'un phénomène de masquage attentionnel. Raymond *et coll.* (1992) nomment cet effet **clignement attentionnel** (AB, *Attentional Blink*). Ils font l'analogie avec un clignement d'œil qui apparaît généralement après l'acquisition d'une information dans la scène. Ainsi, dans leur étude, la diminution du taux de détection de la seconde cible apparaît après l'entière identification de la première cible.

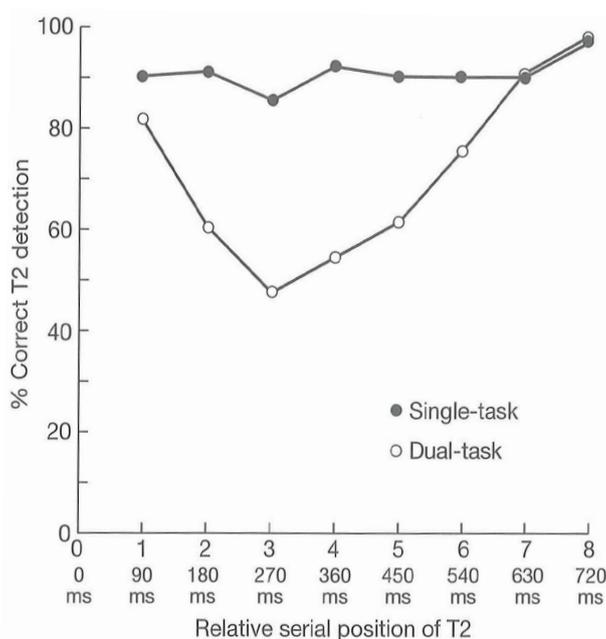


FIGURE 3.1 – Pourcentage moyen de détection correcte de T2 en fonction de la position de T2 par rapport à T1. Les cercles pleins associés à la légende « *single-task* » correspondent à la condition dans laquelle les participants ne doivent détecter que T2. Les cercles vides, « *dual-task* » correspondent à la condition dans laquelle les participants ont pour instruction la détection de T1 et T2. Figure de Raymond *et coll.* (1992) adaptée par Shapiro (2001).

Shapiro (2001, Chapitre 1), s'appuyant sur ses précédentes études, indique que plusieurs éléments augmentent l'importance de l'AB en termes de durée de l'effet ou de niveau de masquage de l'information. Ces éléments sont l'augmentation de la difficulté à analyser la première cible ou la seconde, ainsi que l'augmentation de la similarité entre les cibles. À noter toutefois que le cas particulier où les deux cibles sont identiques entraîne l'*aveuglement à la répétition* détaillé plus tard (section 3.2). Chun (1997) met en évidence la différence entre aveuglement à la répétition et AB pourtant proches à première vue : L'AB diminue lorsque la distinction cible/distracteur (ou cible 1/cible 2) est facilitée alors que ce n'est pas le cas de l'aveuglement à la répétition. L'augmentation du nombre de cibles potentielles est aussi un facteur amplifiant le clignement attentionnel. L'étude de Ward *et coll.* (1996) apporte des précisions sur les « cibles potentielles ». Dans cette étude, les participants doivent répondre à une cible rouge dans une condition et verte dans l'autre. Il n'y a donc qu'une seule cible dans ces conditions. Lors d'une troisième condition, les participants doivent répondre cette fois à une cible identifiée par le fait qu'elle soit rouge ou verte. Il y a donc bien deux cibles potentielles. Concernant le nombre d'attributs permettant d'identifier la cible (par exemple, la couleur seulement ou la couleur plus une orientation), celui-ci n'a pas d'impact sur l'importance de l'AB. Enfin, l'augmentation du nombre d'éléments total présentés dans la série augmente aussi l'AB Isaak *et coll.* (1999).

Le phénomène de clignement attentionnel est donc un phénomène très décrit dans le domaine de la vision mais son origine reste incertaine et fait l'objet de nombreux modèles et hypothèses dont aucun ne permet une explication complète de l'ensemble des observations faites sur l'AB (pour une synthèse de l'ensemble de ces théories, voir Dux et Marois, 2009 ; Martens et Wyble, 2010).

En dehors des études en vision, le clignement attentionnel a aussi été mis en évidence du côté de l'audition (Duncan *et coll.*, 1997 ; Tremblay *et coll.*, 2005 ; Shen et Mondor, 2006) lors de présentation en séquences de type RASP (*Rapid Audio Sequential Processing*, équivalent auditif de la procédure RSVP Suied *et coll.*, 2013).

3.2 Échec à la détection d'une cible répétée

L'effet dont il est question ici apparaît lorsqu'une cible est répétée. Observé la première fois par Potter (1984), d'après Coltheart (2011), lors d'une expérience de type RSVP, puis de nouveau par Kanwisher et Potter (1989), cet effet correspond à une incapacité à rapporter les occurrences d'une cible si celle-ci est répétée. Kanwisher et Potter le nomme donc **cécité à la répétition** (RB, *Repetition Blindness*). Bien qu'il semble a priori se rapprocher du clignement attentionnel, Chun (1997) met en évidence la différence entre ces deux effets. Le clignement attentionnel nécessite que cibles et distracteurs partagent des caractéristiques communes et peut exister si les cibles et les distracteurs n'ont pas la même couleur. Ces deux observations sont invalidées en ce qui concerne le RB. De plus, ce dernier agit sur une durée plus courte que le clignement attentionnel ($\sim 200 - 300$ ms). Une autre différence entre ces deux effets mise en évidence par Luo et Caramazza (1996) est le fait que le RB puisse exister même lors d'une présentation simultanée des éléments, une présentation en série n'est donc pas nécessaire.

Les études en vision concernant cet effet ont montré qu'il était très robuste. En effet, celui-ci peut entraîner un individu à manquer divers éléments :

- Un mot (Kanwisher, 1987), que les deux mots répétés correspondent parfaitement ou qu'ils ne partagent qu'une partie des lettres positionnées dans le même ordre (Bavelier *et coll.*, 1994). De même, deux mots homophones peuvent subir le RB.
- La couleur (Kanwisher, 1991 ; Kanwisher *et coll.*, 1995).
- Des images ou visages familiers (Coltheart, 2011).
- Des objets (Bavelier, 1994), même s'ils sont nouveaux et inconnus (Coltheart *et coll.*, 2005) ou ne sont pas présentés sous le même angle si l'image n'est pas dégradée (Buffat *et coll.*, 2013).

Toutefois, les études pointent aussi vers certaines limites au RB. Deux synonymes, par exemple, ne sont pas sujets au RB et vont même diminuer le risque de RB (Kanwisher et Potter, 1990 ; Altarriba et Soltano, 1996). De même pour les non-mots Coltheart (2011). Enfin, Goldfarb et Treisman (2011) indique que regrouper les éléments identiques permet de les protéger du RB. Cette dernière observation est appuyée par l'étude de Soto-Faraco

et Spence (2001) qui conclue à une augmentation de l'importance du RB lorsque les cibles répétées se trouvent séparées dans l'espace contrairement au cas inverse.

Bien que le RB ait été nommé ainsi par Kanwisher et Potter (1989) en faisant l'hypothèse d'un effet n'existant qu'en vision, Miller et Mackay (1994); Miller et MacKay (1996); Soto-Faraco et Spence (2001) démontrent l'existence de ce même phénomène en audition. Miller et Mackay nomment cet équivalent auditif **surdité à la répétition** (RD, *Repetition Deafness*).

3.3 Échec à la détection d'un changement

3.3.1 Cécité au changement

Au cours d'une expérience, Rensink *et coll.* (1997) présentent à un participant une série d'images contenant deux paires d'images (A et A'). La seconde paire d'image est en fait la même que la première, à l'exception d'un détail qui a changé. Un écran blanc de 80 ms sépare chaque image dont la durée d'exposition est de 240 ms. Le participant a pour tâche d'appuyer sur une touche lorsqu'il repère un changement et de le décrire.

Lors d'une seconde expérience, l'écran blanc qui se trouve entre deux images d'une même paire est comblé par l'image en question. De sorte que, finalement, il n'y ait que deux images dont la durée d'exposition est allongée à $240 + 80 + 240$ ms.

Enfin, une troisième expérience est réalisée en partant de la première mais en ajoutant, au début de l'essai, un mot donnant un indice (valide ou non) sur la localisation du changement en vue d'y attirer l'attention ou de l'en éloigner.

De ces trois expériences, Rensink *et coll.* font la conclusion suivante : l'attention est un point clé de l'identification d'un changement. En effet, l'indice valide permettant d'attirer l'attention au bon endroit entraîne un meilleur taux de bonnes réponses que la condition sans indice. À l'inverse, un mauvais indice entraîne une chute du taux de réponses correctes.

Le nom que donnent Rensink *et coll.* à cette incapacité à détecter un changement dans une scène visuelle est la **cécité au changement** (CB, *Change blindness*). Bien qu'il partage des ressemblances avec la cécité attentionnelle, la distinction doit être faite

(Simons, 2007). Si la cécité attentionnelle correspond à l'incapacité à repérer un événement ou objet évident dans une scène visuelle, la cécité au changement concerne la capacité à remarquer l'évolution d'un objet dans la scène. Ce dernier implique donc la mémoire dans un processus de comparaison de l'avant et de l'après changement. Le lien entre cet effet et l'attention est clairement établie Levin et Simons (1997); O'Regan *et coll.* (1999); Kevin O'Regan *et coll.* (2000). En effet, lorsque l'attention est dirigée vers le changement à venir, celui-ci est plus souvent détecté.

3.3.2 Surdité au changement

Eramudugolla *et coll.* (2005) mettent en évidence un équivalent auditif de la cécité au changement : la **surdité au changement** (CD, *Change deafness*). Effectivement, dans leur étude Eramudugolla *et coll.* (2005) remarquent que des participants dont la tâche est d'écouter une scène auditive entrecoupée d'une pause présentent des difficultés à y repérer un changement lorsque leur attention n'est pas dirigée sur l'instrument cible par un indice : le nom de l'instrument écrit à l'écran à la place du texte « essai suivant ».

Cette surdité au changement est aussi mise en évidence à plusieurs reprises, que ce soit à l'aide de données comportementales (Vitevitch, 2003; Petsas *et coll.*, 2016), où les temps de réaction ainsi que les taux de détection associés au changement sont impactés – les RT augmentant alors que les taux de détection diminuent, ou bien à l'aide de données physiologiques (Chait *et coll.*, 2012; Barascud *et coll.*, 2014). Cette dernière étude permet de confirmer une hypothèse soulevée par Rensink *et coll.* (1997), un changement a bien la possibilité d'être masqué par un autre changement le précédent si l'écart de temps qui les séparent est trop court. Ceci est dû au fait que les capacités perceptives soient limitées et seulement certain nombre d'éléments peut être traité simultanément. De plus, l'étude de Puschmann *et coll.* (2013) permet d'ajouter concernant la surdité au changement qu'un changement manqué est tout de même représenté dans le système auditif. Il doit donc trouver sa source dans des processus de plus haut niveau que le simple encodage sensoriel.

3.4 Échecs de la capture de l'attention

L'attention sélective est une des fonctions cognitives indispensables au quotidien. En effet, celle-ci permet à un individu de focaliser son attention sur une tâche ou un stimulus tout en ignorant les autres stimuli environnementaux qui pourraient le distraire. L'une des démonstrations les plus impressionnantes de l'attention sélective est le phénomène de cécité attentionnelle (Mack et Rock, 1998). Le phénomène de cécité attentionnelle correspond au fait qu'un individu dont l'attention est focalisée sur une tâche risque de manquer des stimuli visuels environnementaux inattendus. Ceci alors même que ces stimuli seraient impossibles à manquer dans une situation où son attention serait disponible.

L'importance de ce phénomène de cécité attentionnelle est mise en évidence dans l'étude de Simons et Chabris (1999). Lors de cette étude, les expérimentateurs présentent une vidéo à leurs participants et s'intéressent à leur réaction à un stimulus visuel inattendu. Cette vidéo comprend deux équipes, l'une habillée en blanc et l'autre en noir. Chacune des deux équipes a une balle en main et réalise des passes de basket-ball. Les participants ont alors pour tâche de compter le nombre de passes réalisées par l'une des deux équipes définies par les expérimentateurs. Au cours de la séquence vidéo, un homme déguisé en gorille traverse la scène, s'arrête au centre et frappe sa poitrine avant de repartir de l'autre côté de la scène. À l'issue de la présentation de la vidéo, les participants sont questionnés concernant la présence du gorille. Les résultats de l'expérience indiquent que dans 36 % des cas, les participants ne sont pas capables de repérer l'homme déguisé en gorille traversant la scène au premier plan. Lors d'une seconde condition plus complexe, Simons et Chabris demandent aux participants d'effectuer un décompte des passes pour chacune des deux équipes. Le pourcentage de cas dans lesquels l'homme déguisé en gorille est manqué passe à 55 %. Le lien entre l'attention requise pour la tâche, liée à sa difficulté, et le nombre d'évènements manqués est clairement mis en lumière, même dans une situation où la scène est dynamique. Un autre fait intéressant mis en évidence dans cette étude est l'importance des caractéristiques physiques du stimulus critique sur sa détection. En effet, pour un groupe de participant, la consigne est de suivre l'équipe blanche alors qu'un second groupe a pour consigne de suivre l'équipe noire. Dans ce second groupe, le nombre de participants qui remarquent le gorille est bien plus élevé que dans le premier groupe. Ce qui suggère

que, puisque le gorille est noir, il sera plus facilement détecté si les cibles sont noires elles aussi. En revanche, s'il partage la même couleur que l'équipe à ignorer, il risque d'être ignoré lui aussi.

Ce phénomène de cécité attentionnelle et les situations dans lesquelles il apparaît ont fait l'objet de nombreuses études (Neisser et Becklen, 1975 ; Becklen et Cervone, 1983 ; Yantis et Johnston, 1990 ; Newby et Rock, 1998 ; Simons, 2000, 2010 ; Most *et coll.*, 2000, 2001 ; Most, 2013 ; Cartwright-Finch et Lavie, 2007 ; Koivisto et Revonsuo, 2007 ; Kreitz *et coll.*, 2016b,a ; White *et coll.*, 2018).

3.4.1 Surdité attentionnelle

Le phénomène de c c t  attentionnelle possède un équivalent en audition : la surdité attentionnelle (nommée ainsi par Mack et Rock, 1998). Celle-ci correspond à l'incapacité d'un individu à remarquer un stimulus auditif lors de la réalisation d'une tâche si celui-ci n'est pas pertinent en regard de la tâche.

Comment mesurer la surdité attentionnelle ?

Par définition, l'étude de la surdité attentionnelle nécessite la réalisation d'au moins une tâche par un participant tandis qu'au moins un stimulus auditif lui est présenté. L'objectif est alors de mesurer son niveau de conscience de la présence de ce stimulus par différents moyens. L'objectif de cette partie est de rapporter quelques méthodes fréquemment utilisées. Cependant, d'autres méthodes plus originales peuvent être employées, comme c'est le cas par exemple dans l'étude de Parks *et coll.* (2009) qui observent l'évolution d'un réflexe lié à l'audition.

Mesures comportementales

Questionnaire La mesure comportementale la plus évidente est de questionner le participant de sorte à déterminer s'il a été sujet à la surdité attentionnelle ou non. C'est le type de mesure retrouvé dans les études portant sur l'effet de l'attention auditive (Cherry, 1953 ; Moray, 1959) lors de la réalisation d'une tâche de shadowing. Bien que ces études ne se présentent pas initialement comme des études portant sur la surdité attentionnelle, un stimulus auditif y est bien manqué du fait que l'attention soit portée sur une tâche.

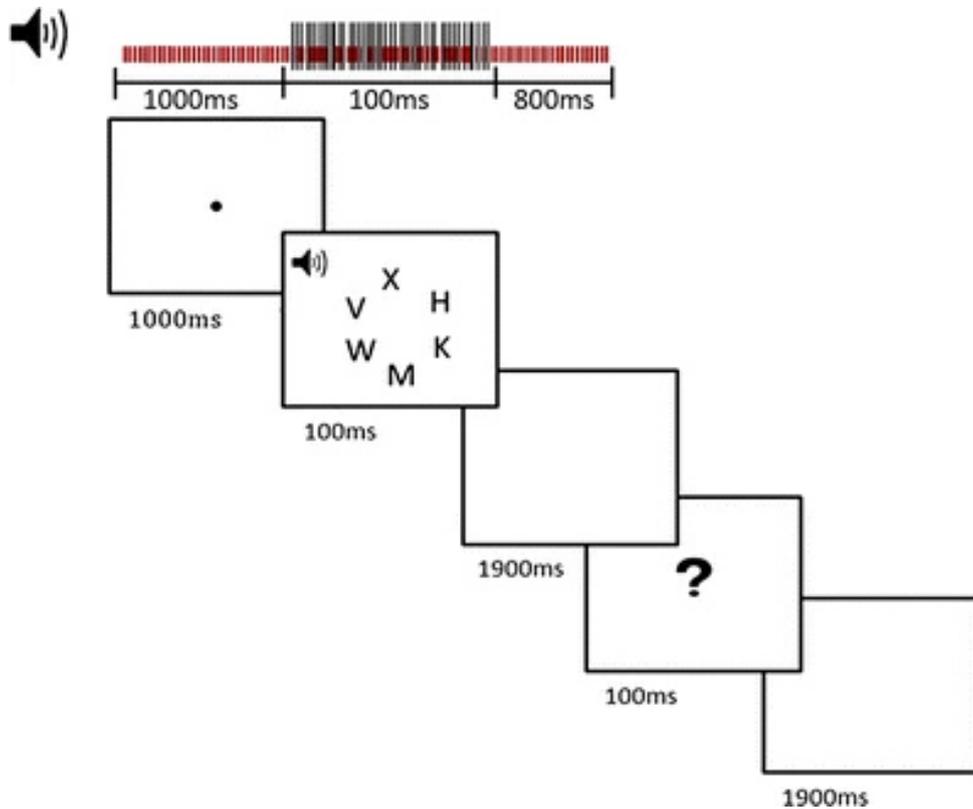
Obtention du d' L'étude de Raveh et Lavie (2015) met en œuvre une autre méthode de mesure comportementale : la mesure des taux de détection et de fausses alarmes afin de calculer l'indice de sensibilité d' . Cet indice nécessite une double tâche pour que le participant ait une tâche de détection associée à la présence du stimulus critique. Dans ce cas, un participant répondant toujours « oui » à la question de la présence du stimulus aura forcément 100 % de détection. L'indice d' a donc l'avantage de tenir compte des fausses alarmes. En effet, un nombre élevé de fausses alarmes fera diminuer la valeur du d' . Cet indice permet donc de représenter plus fidèlement la performance que le taux de détection uniquement.

Les participants à cette étude effectuaient une double tâche comprenant une tâche de recherche visuelle dont la charge perceptive variait via la similarité entre les lettres cibles et non-cibles et une tâche de détection d'un stimulus auditif. La tâche visuelle (figure 3.2a) consistait à reconnaître si la lettre cible était un « X » ou un « N ». Les autres lettres étaient toutes des « O » en condition de charge perceptive faible alors qu'en condition de charge perceptive élevée toutes les lettres étaient différentes. Un bruit blanc était émis durant la présentation des lettres et pouvait être accompagné d'un stimulus auditif (stimulus critique). La tâche de détection consistait à indiquer si le stimulus critique était présent. L'étude était décomposée en 4 phases :

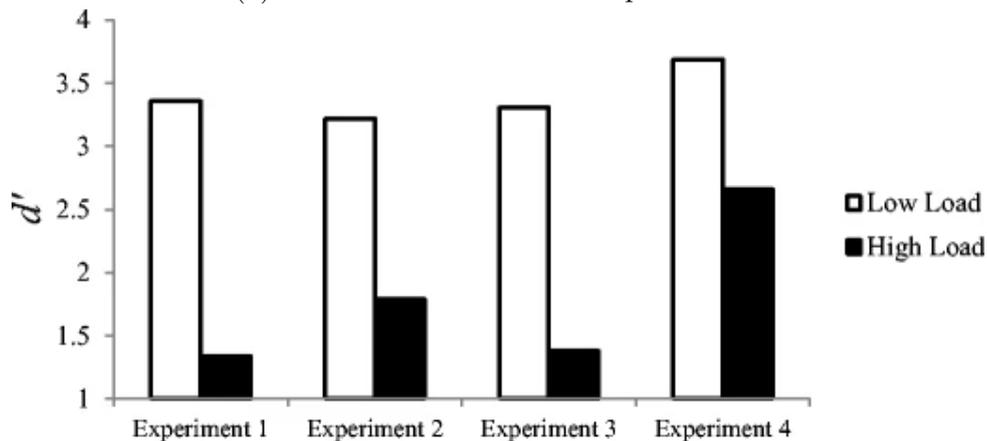
1. Le stimulus critique était présent dans 17 % des essais et l'ordre des réponses était : (1) tâche visuelle, (2) tâche auditive.
2. L'ordre des réponses changeait pour : (1) tâche auditive le plus rapidement possible, (2) tâche visuelle.
3. La procédure 1 était reprise en augmentant la fréquence d'apparition du stimulus critique à 50 %.
4. La procédure 3 était reprise en retirant le bruit blanc de manière à rendre le stimulus critique plus détectable.

Les taux de réponses correctes et fausses alarmes étaient combinés pour obtenir un d' . Les résultats obtenus par Raveh et Lavie (2015) aux 4 phases expérimentales reportés en figure 3.2b démontrent la présence de surdité attentionnelle lors des 4 phases. En effet, la performance de détection était systématiquement plus faible en condition de charge

perceptive élevée, quelle que soit la phase expérimentale. À noter que la différence de charge entre les conditions faible et élevée était vérifiée par la hausse des temps de réaction (en anglais *reaction time*, RT) et le nombre d'erreurs à la tâche visuelle dans la condition de charge élevée.



(a) Schéma du déroulement expérimental



(b) Résultats obtenus lors des 4 phases expérimentales

FIGURE 3.2 – Déroulement expérimental et résultats de l'étude de Raveh et Lavie (2015) (tiré de leur article)

Mesures physiologiques

Si le rôle de l'attention est mis en avant par des mesures comportementales comme le démontrent les études utilisant la méthode du shadowing (Cherry, 1953; Moray, 1959, voir chapitre 5 p.30), l'attention auditive peut aussi être observée à l'aide de mesures physiologiques. C'est ce que démontrent les études de Hillyard *et coll.* (1973); Woldorff et Hillyard (1991) dans lesquelles les électroencéphalogrammes (EEG) de participants ont été enregistrés pendant une écoute dichotique. Durant l'écoute, les participants devaient suivre les sons d'une oreille tout en ignorant ceux présents dans l'autre oreille. Une seconde écoute était réalisée avec les mêmes stimuli en demandant aux participants d'inverser les oreilles suivie et ignorée. Cette procédure a permis la comparaison des potentiels évoqués (ERP, *Event Related Potential*) déclenchés par l'écoute d'un son en présence et en l'absence d'attention. Un lien entre l'attention portée à un stimulus auditif et l'amplitude de deux ondes cérébrales a ainsi été mis en évidence. Lorsque l'attention est portée sur un stimulus auditif, l'amplitude des ondes N1 et P20-50 augmente (Figure 3.3). L'onde N1 (ou N100) correspond à une variation négative de l'amplitude du potentiel évoqué survenant 100 ms après l'écoute d'un stimulus auditif. Les ondes P20-50 correspondent à une variation positive de l'amplitude du potentiel évoqué observé 20 à 50 ms après l'écoute. À noter que certaines études portent sur la différence de deux mesures, celle réalisée à l'écoute d'un stimulus sur lequel l'attention est portée et celle réalisée en l'absence d'attention (Woldorff *et coll.*, 1991). Cette différence est appelée négativité de discordance (en anglais *mismatch negativity*, MMN) et permet de comparer efficacement les deux situations.

Une autre mesure physiologique mettant en évidence les phénomènes attentionnels en audition est la magnétoencéphalographie (MEG) qui indique une activation plus intense des aires corticales associées à la présence d'un stimulus auditif lorsque celui-ci fait l'objet d'un focus attentionnel (Woldorff *et coll.*, 1993).

Ces études permettent de mettre en évidence le rôle de l'attention en audition via des mesures d'EEG et MEG, il semble donc qu'il soit aussi possible de traquer la surdité attentionnelle à l'aide des mêmes méthodes. C'est ce que démontrent notamment Dehais *et coll.* (2019) avec des mesures d'EEG.

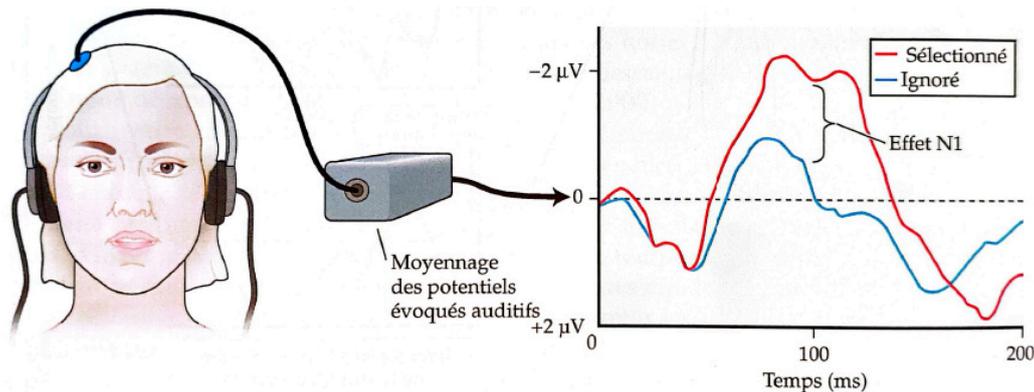


FIGURE 3.3 – Schéma représentant la différence des ondes N1 mesurées lorsqu'un participant réalise une écoute dichotique en ignorant un stimulus auditif ou en focalisant son attention dessus. Illustration issue du livre de Bartolami *et coll.* (2012) schématisant les données obtenues par Hillyard *et coll.* (1973).

EEG L'étude menée par Dehais *et coll.* (2019) visait à évaluer le niveau de surdité attentionnelle des participants lors d'un vol en simulateur à l'aide de mesures d'électroencéphalogramme (EEG). Les participants recrutés étaient des militaires pilotes d'avion et réalisaient deux scénarios durant lesquels des alarmes auditives pouvaient être émises. Le premier visait à générer un faible niveau de charge perceptive et cognitive et consistait à superviser le déroulement du vol lorsque le pilote automatique était enclenché. Le second, beaucoup plus complexe, visait à générer un fort niveau de charge perceptive et cognitive. Cette fois, les participants devaient réaliser un atterrissage sans visibilité avec de la fumée provenant d'un feu en cabine. Un moniteur accompagnait les participants lors des deux scénarios pour augmenter encore le niveau de stress des participants.

Pendant toute la durée de l'expérience, les électroencéphalogrammes (EEG) et électrocardiogramme (ECG) des participants étaient mesurés. De même pour leur taux d'alarmes manquées. Lors de cette expérience, les ECG et taux d'alarmes manquées confirmaient la variation de charge attendue entre les deux scénarios. De plus, l'évolution du taux d'alarmes manquées entre les deux scénarios a indiqué la présence de surdité attentionnelle. Le scénario de charge faible était à l'origine de seulement 0,33 % d'alarmes manquées contre 57,73 % pour le scénario de charge élevée.

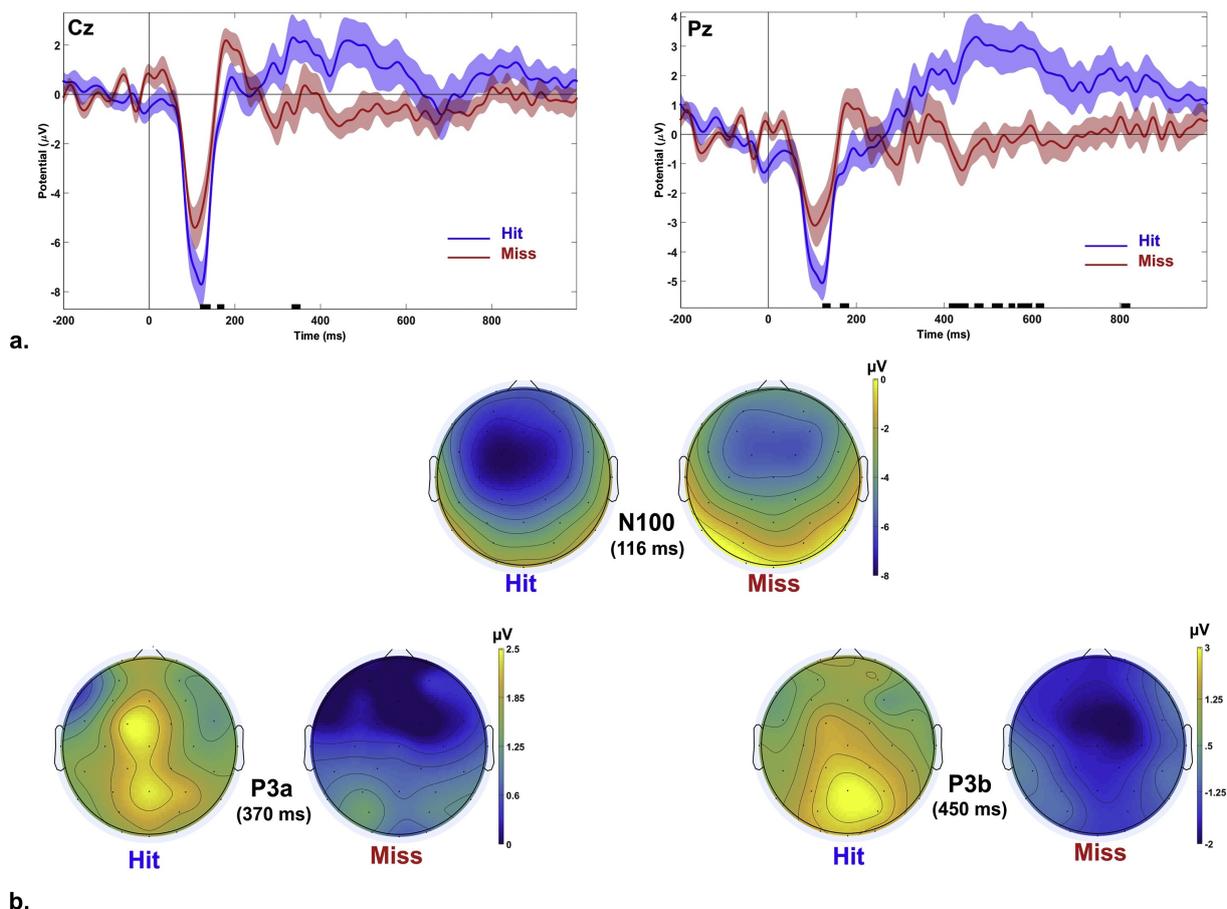


FIGURE 3.4 – Figure de l'article de Dehais *et coll.* (2019) regroupant les ERP montrant une évolution significative en comparant les ondes moyennes associées à une détection et celles associées à une alarme manquée lors du scénario complexe. En (a) Les ondes récupérées au niveau de deux électrodes différentes. Les formes plus larges représentent les écarts-types. En (b) les vues topographiques pour les alarmes détectées et manquées à 116 ms (haut, N100), 370 ms (gauche, P3a) et 450 ms post-stimulus (droite, P3b)

Lors de cette étude, les ondes moyennes P3a, P3b, et N100 étaient significativement différentes lors de la détection d'une alarme et lors d'une alarme manquée. Cette étude est en faveur de l'intérêt des mesures physiologiques dans la détection et l'évaluation de la surdité attentionnelle.

Surdité attentionnelle lors d'une tâche auditive

La partie précédente indique que la surdité attentionnelle semble apparaître dans de nombreuses situations lorsque la tâche sur laquelle se porte l'attention est visuelle (la tâche principale dans le cas d'une double tâche). En revanche, lorsque la tâche est auditive, toutes les situations n'entraînent pas de surdité attentionnelle. En effet, certaines études

parviennent à observer ce phénomène en présence d'une charge auditive (Francis, 2010; Dalton et Fraenkel, 2012; Dalton et Hughes, 2014; Masutomi *et coll.*, 2016; Fairnie *et coll.*, 2016) quand d'autres n'y parviennent pas (Gomes *et coll.*, 2008; Murphy *et coll.*, 2013).

Le lien entre surdité attentionnelle et tâche auditive a été mis en évidence à l'aide de différents protocoles. C'est le cas par exemple dans l'étude de Dalton et Fraenkel (2012) dont l'objectif était de reproduire l'expérience de Simons et Chabris (1999) en audition. Dans cette étude, les auteurs ont mis en place un protocole dans lequel des participants procédaient à l'écoute d'une scène sonore spatialisée comprenant quatre personnes préparant une fête. Dans cette scène, deux hommes s'occupaient de préparer la nourriture et les boissons d'un côté de la pièce, tandis que deux femmes emballaient un cadeau de l'autre côté de la pièce. Au cours de la scène, un troisième homme passait à proximité de deux des locuteurs (les hommes ou les femmes) en répétant la phrase « I am a gorilla »¹. Les participants n'étaient pas informés au préalable de la présence de cet homme. Tout d'abord, les participants avaient pour instruction de suivre la discussion d'un des deux groupes de locuteurs : le groupe des hommes pour la moitié des participants et celui des femmes pour l'autre moitié. L'instruction indiquait aux participants qu'ils seraient ensuite questionnés à propos des actions de leur groupe cible. Cependant, les questions après l'écoute visaient en fait à déterminer si un événement inattendu avait été remarqué, sans indiquer précisément qu'il s'agissait d'un troisième homme. Ensuite, il était demandé aux participants de réécouter la scène en se concentrant sur les voix masculines pour tenter d'y repérer quelque chose d'inattendu. Les questions précédentes étaient alors de nouveau posées aux participants de sorte à déterminer s'ils avaient pu remarquer le « gorille auditif ». Lorsque le gorille passait à proximité des hommes, il était remarqué lors de la première écoute par 90 % des participants qui avaient l'instruction de suivre les hommes alors qu'il était remarqué par seulement 30 % des participants ayant l'instruction de suivre les femmes. Lors d'une seconde condition où le gorille passait à proximité des femmes, parmi les participants qui devaient suivre la discussion des hommes, ils n'étaient plus que 65 % à le remarquer lors du premier essai. À l'inverse, parmi ceux qui devaient suivre la discussion des femmes, la proportion de participants remarquant le gorille augmente en passant à 45 %. En premier lieu, cette étude vient appuyer la possibilité d'une surdité attentionnelle engendrée par une tâche auditive. En second lieu, elle met en évidence une modulation

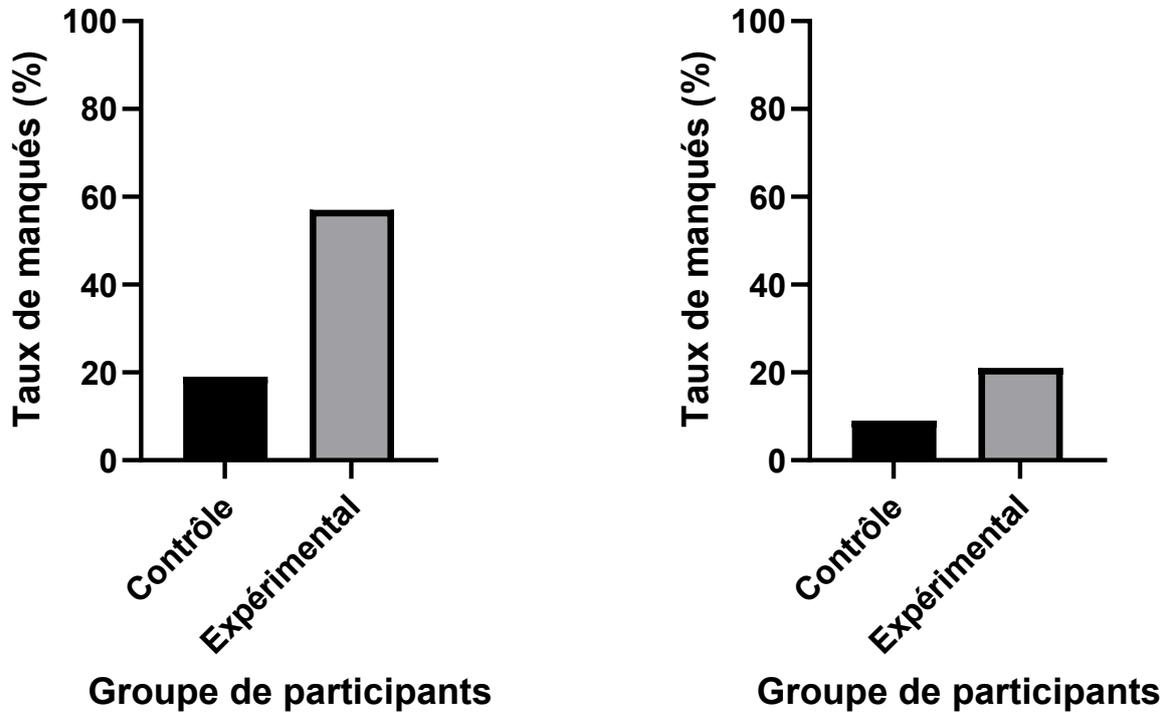
1. Lien vers la scène auditive : <https://www.youtube.com/watch?v=zGKADgFCoeU&t=64s>.

de l'effet de la surdité attentionnelle engendrée par une tâche auditive en fonction de la distinction physique entre la cible et le stimulus critique manqué. En effet, ici, un stimulus partageant une caractéristique avec le stimulus cible (ici la fréquence fondamentale de la voix) a moins de risque d'être manqué.

Dans une seconde étude (Koreimann *et coll.*, 2014), quatre groupes de participants réalisaient une écoute d'un extrait de musique orchestrale au casque (Richard Strauss - Also Sprach Zarathustra, Op. 30) dans lequel un morceau de guitare était ins r ². Dans une première expérience, le premier groupe réalisait une écoute passive tandis que le second devait compter le nombre de battements présents dans l'extrait musical. Dans une seconde expérience, le troisième et quatrième groupe avaient exactement les mêmes consignes mais, pour eux, le morceau de guitare inclus était plus saillant (en termes de durée, nombre de notes, timbre, rythme, etc.). Les participants sélectionnés connaissaient tous l'extrait musical utilisé mais pouvaient se répartir en deux groupes : ceux le connaissant très bien et étaient capables de donner des informations dessus tel que le nom du compositeur et ceux le connaissant assez peu et l'ayant peu entendu. Aussi, les participants pouvaient être répartis en deux groupes : pratiquants de musique confirmés ou amateurs. Comme l'indique la figure 3.5, les participants des deux groupes réalisant une écoute passive (groupes contrôles) manquaient toujours moins le morceau de guitare que ceux des deux groupes ayant pour consigne de compter les battements (groupes expérimentaux). Dans l'expérience 1, 57 % des participants du groupe expérimental l'ont manqué contre seulement 19 % du groupe contrôle. Dans l'expérience 2, 21 % des participants du groupe expérimental l'ont manqué contre seulement 9 % du groupe contrôle. Ceci appuie le rôle de l'attention dans la détection d'un stimulus en audition et l'existence d'une surdité attentionnelle lorsque l'attention est impliquée dans une tâche auditive. De plus, les deux groupes réalisant l'expérience avec un morceau de guitare plus saillant présentaient un nombre plus faible de stimuli manqués, même dans la condition expérimentale où leur attention est impliquée dans la tâche de comptage. Il semble donc que la surdité attentionnelle soit dépendante de la saillance d'un stimulus : un stimulus plus saillant a moins de risque d'être manqué. Le niveau de familiarité avec l'extrait musical et le niveau d'expertise musicale ont aussi tous les deux montré une incidence significative sur le niveau

2. Extraits musicaux incluant le morceau de guitare disponibles ici : <https://link.springer.com/article/10.1007/s00426-014-0552-x>

de surdité attentionnelle engendré. Une meilleure connaissance de l'extrait musical ou un meilleur niveau de pratique musicale diminue le niveau de surdité attentionnelle à un stimulus auditif inattendu.



(a) Expérience 1, le stimulus critique est peu saillant

(b) Expérience 2, le stimulus critique est plus saillant que dans l'expérience 1

FIGURE 3.5 – Taux de stimuli critiques (morceau de guitare) manqués lors de l'écoute d'un extrait de musique orchestrale dans les deux expériences de l'étude de Koreimann *et coll.* (2014). Le groupe expérimental qui devait compter le nombre de battements présents dans l'extrait musical manquait toujours plus souvent le stimulus critique que le groupe contrôle, réalisant une écoute passive (sans aucune tâche).

Rôle de la charge perceptive Les paragraphes précédents mettent en lumière l'existence de la surdité attentionnelle lors d'une tâche auditive. Cependant, pour aller plus loin, la théorie de la charge perceptive de Nilli Lavie prévoit que le niveau de surdité attentionnelle varie avec le niveau de charge perceptive.

En effet, selon cette théorie, la position du filtre attentionnel dépend du niveau de charge perceptive. Une forte charge perceptive doit donc entraîner un filtrage précoce des informations générant un fort niveau de surdité attentionnelle.

En revanche, une charge perceptive faible doit entraîner un filtrage tardif des informations qui seront donc entièrement analysées et ne seront pas sujettes au phénomène de surdité attentionnelle. Dans cette condition, un stimulus ayant un intérêt ne doit donc théoriquement jamais être manqué. D'après la théorie de la charge perceptive, le niveau de surdité attentionnelle doit être variable et dépendre directement du niveau de charge perceptive.   noter toutefois que cette théorie prévoit que le filtre agit sur la base des caractéristiques des stimuli pour déterminer quels sont les stimuli cibles et qui doivent bénéficier d'un traitement, la ressemblance entre la cible et le stimulus critique (celui qui risque d'être manqué) doit donc aussi avoir un impact, ce qui semble appuyé par l'étude de Dalton et Fraenkel (2012) détaillée plus tôt.

En vue de tester la validité de ce modèle en audition lorsque la charge perceptive provient d'une tâche auditive, plusieurs études ont été réalisées mettant en œuvre différentes manieres d'agir sur le niveau de charge. Une approche de la théorie de Nilli Lavie consiste à conditionner la réponse à la tâche principale en fonction de la présence d'une seule ou de plusieurs caractéristiques physiques. Ceci permet de faire varier le niveau de charge perceptive afin d'étudier le niveau de traitement des stimuli inattendus. Les taux de réussites et d'erreurs ainsi que les temps de réaction dans la tâche principale renseignent alors sur l'efficacité du protocole à générer différents niveaux de charge perceptive. Le niveau de surdité attentionnelle est évalué de manière directe via l'étude de la proportion de stimuli inattendus manqués ou via l'étude de leur interférence avec la tâche principale, un stimulus inattendu non traité ne créant aucune interférence.

Cette approche était celle mise en place dans l'étude de Francis (2010) où le participant avait pour tâche principale d'identifier une cible auditive en présence d'un distracteur à ignorer pouvant être congruent ou non avec la cible. En condition de charge perceptive basse, le participant devait répondre à la tâche principale uniquement si sa cible comportait des modulations (ou si elle n'en comportait pas). Par contre, en condition de charge élevée, il ne devait répondre que si sa cible comportait une combinaison de deux caractéristiques physiques : présence de modulations et fréquence grave ou absence de modulations et fréquence aiguë. L'expérience était réalisée au casque. Le son cible était émis dans les deux oreilles mais le participant ne devait suivre qu'une oreille. Le stimulus critique était émis dans l'oreille non-cible ou dans les deux oreilles (expérience 1 ou 2). Quel que soit

le type de présentation du stimulus critique, augmenter la charge perceptive a toujours entraîné une baisse de l'interférence qu'il a engendré sur les temps de réaction à la tâche d'identification (interférence = $RT_{incongruent} - RT_{congruent}$). Ces résultats viennent donc appuyer la théorie de la charge perceptive en audition en indiquant que la surdité attentionnelle dépend du niveau de charge perceptive auditive. Cette conclusion est confirmée par l'étude de Masutomi *et coll.* (2016) dont la troisième expérience s'appuie aussi sur la manipulation du nombre de caractéristiques servant à identifier une cible pour entraîner une variation du niveau de charge perceptive auditive. Là encore, la hausse de la charge perceptive a engendré une hausse du niveau de surdité attentionnelle.

Dans le but d'éprouver à nouveau la théorie de la charge perceptive dans le domaine de l'audition, Sabri *et coll.* (2013) ont réalisé des enregistrements d'ERP et d'IRMf de participants placés en situation d'écoute dichotique. Leur tâche principale consistait à détecter un son pur dans un bruit blanc présenté dans l'oreille suivie. Le rapport signal sur bruit (SNR) entre le son pur et le bruit blanc variait de sorte à obtenir quatre niveaux de charge perceptive. Des syllabes anglaises prononcées par des locuteurs masculins étaient présentées dans l'oreille à ignorer. Lors de cette étude, le niveau de surdité attentionnelle augmentait lorsque le niveau de charge augmentait en passant d'une performance à la détection d' d'environ 2,7 dans la condition de charge la plus faible à environ 1,9 dans la condition de charge la plus élevée. Dans le même temps, les réponses neuronales aux syllabes ignorées diminuaient lorsque le niveau de charge augmentait, ce qui vient appuyer les données comportementales et confirme l'hypothèse d'un lien entre charge perceptive et niveau de surdité attentionnelle.

En revanche, dans certains cas, l'augmentation de la charge auditive (charge perceptive liée à une tâche auditive) ne semble pas être en lien avec une augmentation de la surdité attentionnelle (Gomes *et coll.*, 2008 ; Murphy *et coll.*, 2013). L'étude de Gomes *et coll.* (2008), par exemple, consistait à mesurer les EEG de participants réalisant une tâche de détection d'une cible auditive tout en ignorant des stimuli critiques lors d'une présentation dichotique au casque. Le canal à suivre était indiqué au préalable par l'expérimentateur au participant. Dans l'un des deux canaux du casque, les stimuli étaient des sons purs à 1000 Hz tandis que le second comprenait des sons purs à 2000 Hz. Les stimuli pouvaient être émis à 82 dB SPL ou 76 dB SPL. Les premiers étaient dits « standard ». Les seconds

représentaient les cibles dans le cas où ils étaient émis dans le canal suivi, ou les stimuli critiques s'ils étaient émis dans le canal à ignorer. En vue de moduler le niveau de charge perceptive, les auteurs avaient prévu 3 taux de présentation : rapide, moyen et long. Le premier correspondait à un temps inter-stimulus (ISI) de 300 ms en moyenne contre, respectivement, 600 et 900 ms pour les taux moyen et long. Un participant réalisait chacune des 6 conditions possibles : suivre le canal à 1000 Hz pour un taux de présentation rapide, moyen et long ; de même avec le canal à 2000 Hz. Au cours de cette expérience, les auteurs ont pu vérifier que la manipulation des temps inter-stimulus entraînait bien une variation de charge en relevant une diminution du taux de cibles détectées proportionnelle à la diminution du temps inter-stimulus. Concernant les EEG, une différence significative est mesurée entre l'amplitude de l'onde P3b correspondant aux cibles et celle correspondant aux stimuli critiques. Ceci indique la présence de surdité attentionnelle puisque les stimuli ignorés ont bien bénéficié d'un traitement moins approfondi que les stimuli suivis. En revanche, les EEG mesurés dans cette étude ne montrent aucune augmentation du niveau de surdité attentionnelle avec la charge. De même, le taux de fausses alarmes engendrées par la présence d'un stimulus critique n'a pas augmenté lorsque la charge a augmenté. Ce qui appuie que le lien entre surdité attentionnelle et charge perceptive ne soit pas établi ici.

Surdité attentionnelle lors d'une tâche visuelle

La surdité attentionnelle semble être régulièrement engendrée par une tâche visuelle et devenir plus grande en condition de charge perceptive élevée (Isreal *et coll.*, 1980 ; Raveh et Lavie, 2015 ; Tellinghuisen *et coll.*, 2016 ; Molloy *et coll.*, 2015, 2018 ; Parks *et coll.*, 2009, voir tableau A.3 en annexe pour une liste plus complète).

Un exemple de surdité attentionnelle engendré par une tâche visuelle provient de l'étude de Macdonald et Lavie (2011). De plus, cette étude a été très importante du point de vue de cette thèse puisqu'elle a orienté la réflexion lors de la mise au point de l'expérience 2 qui fait l'objet du chapitre 5. Lors de cette étude, des participants réalisaient 7 essais d'une tâche visuelle durant laquelle un bruit blanc était émis (figure 3.6). La tâche visuelle de ces 7 essais comprenait deux niveaux de charge perceptive. Le groupe de participants réalisant la condition de charge basse devaient rapporter quel était le bras bleu d'une croix

présentée à l'écran. Ceci en appuyant sur un bouton différent si c'était le bras horizontal ou le bras vertical. Le second groupe de participants qui réalisait cette fois-ci la condition de charge élevée devait indiquer lequel des deux bras était le plus long, sachant que la différence entre les longueurs des deux bras était faible. Lors du dernier essai, un stimulus critique auditif³ était émis au sein du bruit blanc. Immédiatement après avoir répondu à sa tâche visuelle, le participant était questionné pour déterminer s'il avait repéré le stimulus critique. Ensuite, le participant réalisait un 8^e essai servant de contrôle. Dans celui-ci, les stimuli étaient identiques mais il était demandé aux participants de détecter le stimulus critique. Seules les données de ceux ayant réussi à cette tâche étaient analysées.

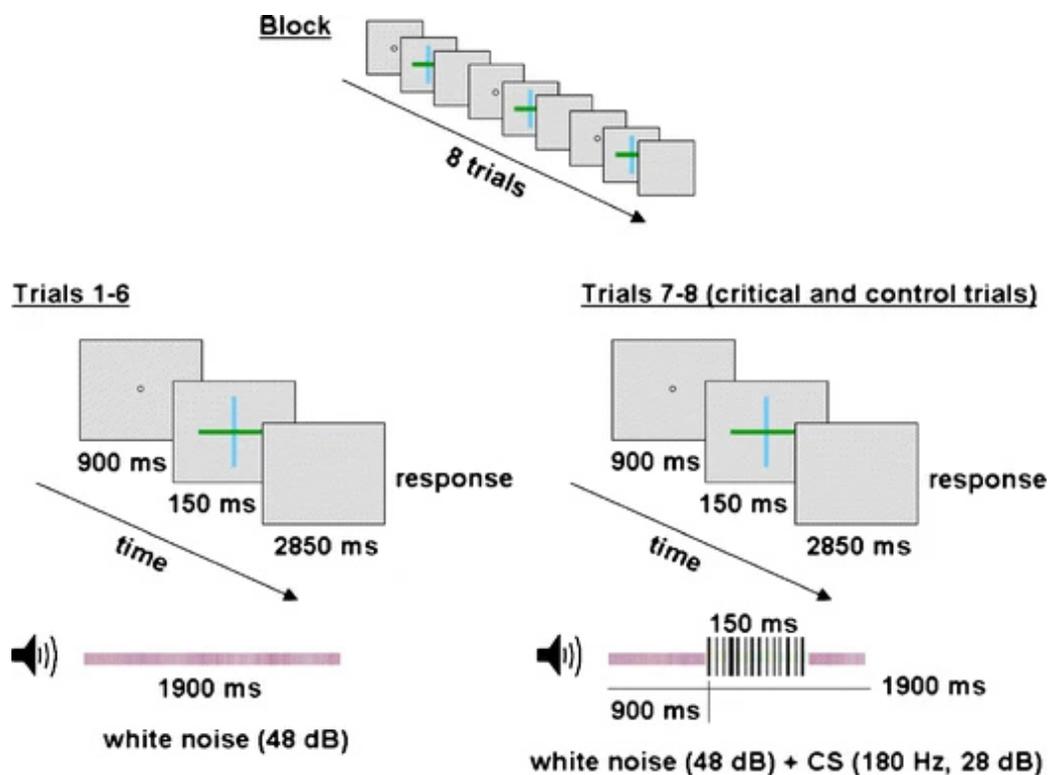


FIGURE 3.6 – Schéma du déroulement expérimental de l'étude de Macdonald et Lavie (2011) (figure de l'article)

3. Un son pur à 180 Hz 20 dB en dessous du bruit blanc

Cette expérience a été réalisée 2 fois en retirant le bruit blanc puis en allongeant le nombre d'essais de sorte qu'un participant passe 50 % d'essais en condition de charge basse et 50 % d'essais en condition de charge élevée. Afin de garder une consigne identique dans les deux conditions, un essai en condition de charge basse consistait à déterminer quel était le bras le plus long, cependant la différence était plus évidente que dans la condition de charge élevée. Selon les auteurs, l'objectif de cette 3^e expérience en mélangeant des essais des deux conditions était de s'assurer que l'implication des participants soit la même dans les deux conditions. En effet, une condition plus facile nécessite une plus faible implication dans la tâche pour la réussir. Les résultats obtenus dans toutes les phases expérimentales de cette étude indiquent bien la possibilité pour une tâche visuelle d'engendrer de la surdité attentionnelle (figure 3.7).

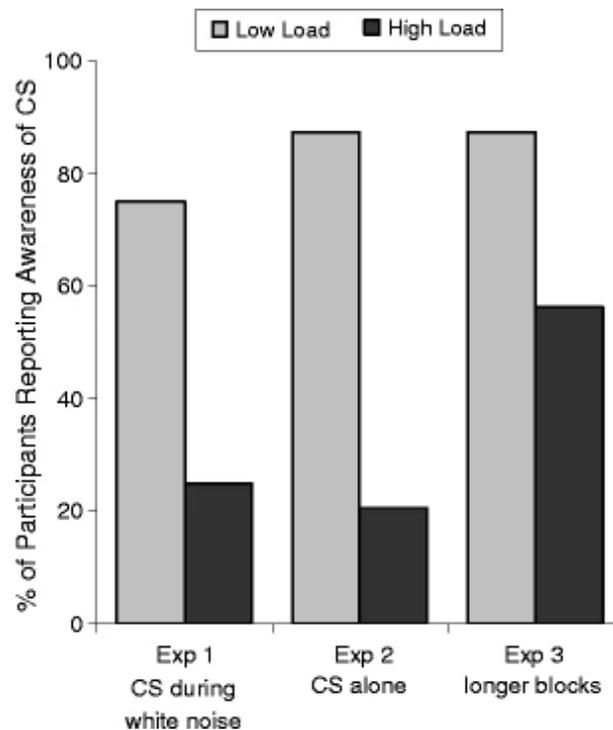


FIGURE 3.7 – Résultats obtenus dans les 3 phases expérimentales de l'étude de Macdonald et Lavie (2011) (figure de l'article). Une surdité attentionnelle est observée dans toutes les phases expérimentales.

Surdité attentionnelle en situation opérationnelle

En plus d'être observée en conditions strictes de laboratoire, la surdité attentionnelle a été mise en évidence lors d'expériences en simulateur. En effet, les résultats de l'étude de Dehais *et coll.* (2019) développée plus tôt dans ce chapitre et mettant en évidence le lien entre surdité attentionnelle et alarmes manquées ont été reproduits à de multiples reprises lors de situation de vol simulé (Dehais *et coll.*, 2014, 2016 ; Durantin *et coll.*, 2017) ou de simulations de suivi du trafic réalisé par des contrôleurs aériens (Causse *et coll.*, 2016).

Par ailleurs, la surdité attentionnelle a aussi pu être mise en évidence lors d'un vol réel. En effet, le phénomène de surdité attentionnelle est constaté chez des pilotes via des EEG enregistrés pendant un vol. Le vol comprenait le pilote, un instructeur ainsi qu'un ingénieur. L'instructeur faisait réaliser un circuit complexe au pilote afin d'engendrer un fort niveau de charge. De plus, durant le vol, deux stimuli audio de type chirp d'une durée de 100 ms étaient émis. Le premier chirp voyait sa fréquence évoluer en augmentant de 2 à 4 kHz et le second chirp voyait sa fréquence diminuer de 4 à 2 kHz. L'un était émis 20 % du temps et devait entraîner un appui sur un bouton de la part du pilote alors que l'autre, émis le reste du temps, devait être ignoré. Ici, la cible était donc aussi le stimulus critique, celui qui sert à évaluer la surdité attentionnelle. Lors de cette expérience, 38,1 % des stimuli critiques ont été manqués, ce qui indique la présence de surdité attentionnelle. De plus, un lien a pu être mis en évidence entre les occurrences de stimuli manqués et la cohérence de phase des EEG entre les essais (ITC). Simplement, si l'ITC est importante, les ondes comparées sont presque en phases. À l'inverse, si l'ITC est nul, les phases sont très différentes. Ici, les ondes relevées à chaque essai au moment d'un stimulus détecté présentent une ITC élevée alors qu'elle chute lors d'un stimulus manqué. La présence de surdité attentionnelle notée via l'analyse comportementale durant le vol est donc appuyée par l'étude des EEG.

Prises ensemble, ces études démontrent que la surdité attentionnelle ne se limite pas qu'aux situations de laboratoire et peut être source de danger en étant à l'origine d'alarmes sonores manquées comme l'atteste d'autres études (Bliss, 2003 ; Dehais *et coll.*, 2012 ; Edworthy, 2013). Il est donc nécessaire d'approfondir les recherches concernant les modalités d'apparition de la surdité attentionnelle et les manières de l'atténuer.

Deuxième partie

Expériences

Chapitre 4 : Expérience 1

4.1 Introduction

L'étude de l'attention comprend généralement deux grandes thématiques : l'attention sélective et l'attention divisée. Chacune correspond à l'étude de deux situations du quotidien. La première est la capacité d'un individu à focaliser son attention sur une tâche en ignorant les stimuli extérieurs qui pourraient le distraire. La seconde est la capacité d'un individu à réaliser plusieurs tâches à la fois. L'étude de ces deux thématiques a mené à la mise en place de plusieurs modèles de l'attention. Cependant, que ce soit l'attention sélective ou l'attention divisée, aucune de ces deux thématiques n'a vu émerger un modèle permettant de l'expliquer pleinement et faisant consensus.

En ce qui concerne l'attention sélective. Certains modèles la décrivent comme une conséquence de la présence de goulets d'étranglements au niveau de certaines structures impliquées dans le traitement. Ces goulets d'étranglements auraient donc l'effet d'un filtre en ne laissant passer qu'une partie des informations en entrée. Les premiers modèles mis en place sont des modèles de sélection précoce, en ce sens qu'ils prévoient que le filtre attentionnel soit positionné très tôt dans les traitements perceptifs, avant même que le stimulus n'atteigne le stade du traitement sémantique. Dans ce cas, l'information est sélectionnée sur la base de ses caractéristiques physiques pour privilégier le traitement des stimuli pertinents pour la tâche (Broadbent, 1958 ; Treisman, 1964a). Cette vision est appuyée par des études telles que celle de Cherry (1953) traitant de l'effet Cocktail Party, capacité à suivre une discussion avec un interlocuteur même dans une salle remplie d'autres personnes qui parlent entre elles juste à côté.

En parallèle, le modèle de Deutsch et Deutsch (1963) propose plutôt l'existence d'une sélection tardive effectuée après l'analyse sémantique automatique des stimuli. Cette vision s'appuie sur la constatation d'échecs de la sélection attentionnelle. Effectivement, lors d'une écoute dichotique, il semble que sous certaines conditions un message à ignorer bénéficie malgré tout d'un traitement sémantique (Moray, 1959 ; Corteen et Wood, 1972 ; Corteen et Dunn, 1974).

Cette dichotomie entre les différents modèles de l'attention sélective semble résolue par un

modèle plus récent (Lavie et Tsal, 1994 ; Lavie, 2005). Selon celui-ci, la sélection réalisée dépend du niveau de charge perceptive induit par la tâche. Nilli Lavie décrit la charge perceptive comme la demande en ressources attentionnelles évoluant avec le nombre d'éléments d'une tâche ou le nombre d'opérations perceptives nécessaire à sa réalisation. Selon ce modèle, toutes les ressources disponibles sont toujours utilisées. En condition de charge perceptive faible, le reste des ressources disponibles est alors automatiquement alloué au traitement des stimuli environnementaux. De fait, pour éviter la distraction, des processus cognitifs entrent en jeu afin d'éviter qu'ils n'engendrent une réaction comportementale. Dans cette situation, la sélection est donc tardive. En revanche, lorsque la charge perceptive est élevée, les stimuli les moins pertinents voient leur traitement interrompu par manque de ressources. Dans ce cas, la sélection est donc précoce. Enfin, Nilli Lavie ajoute qu'une hausse de la charge cognitive peut entraîner, par manque de ressources nécessaires, l'échec de la sélection tardive menant à la priorisation des stimuli non pertinents. Dans ce cas, un distracteur potentiel bénéficiera donc d'un meilleur traitement alors que la hausse de la charge perceptive aurait l'effet inverse.

En ce qui concerne maintenant l'attention divisée, deux grands modèles s'opposent. Le modèle de Kahneman (1973) qui prévoit que les ressources attentionnelles sont limitées, communes et partagées entre toutes les modalités sensorielles. En situation multitâche, deux tâches entrent donc obligatoirement en concurrence pour l'accès aux ressources. En comparaison, le modèle de Wickens 1984 propose que les ressources attentionnelles soient réparties en plusieurs réservoirs. Chacun de ces réservoirs est alors spécialisé dans les traitements d'un aspect particulier de la tâche. L'interférence de deux tâches n'existe donc que si elles viennent puiser dans un même réservoir de ressources. Là encore, une demande en ressources plus grande que ce dont dispose ce réservoir est à l'origine d'une dégradation des traitements de cet aspect particulier de la tâche, d'où les phénomènes d'interférence entre deux tâches. L'une des propositions de ce modèle est que les ressources sont réparties, entre autres, par modalité sensorielle. Ainsi, deux tâches auditives peuvent interférer entre elles, au contraire de deux tâches réalisées dans des modalités distinctes (auditive et visuelle par exemple). Ces deux grands modèles de l'attention s'accordent donc sur l'interférence attendue de deux tâches auditives entre elles.

Dans ce contexte, la surdité attentionnelle, incapacité d'un individu pris dans une tâche à repérer un stimulus auditif extérieur à sa tâche, est régulièrement étudiée en vue d'éprouver les différents modèles de l'attention. Par exemple, l'étude de Macdonald et Lavie (2011) démontre l'occurrence de la surdité attentionnelle chez des participants réalisant une tâche visuelle uniquement lorsque la charge visuelle est élevée. Cette étude a donc la volonté d'éprouver à la fois la théorie de la charge perceptive de Nilli Lavie et le partage des ressources attentionnelles.

Pourtant, l'intérêt de l'étude de la surdité attentionnelle n'est pas limitée aux renseignements qu'elle apporte sur l'attention puisqu'elle peut représenter un problème de sécurité en étant source d'alarmes sonores manquées. En effet, le lien entre surdité attentionnelle et alarmes manquées a été démontré en simulateur (Dehais *et coll.*, 2014, 2016, 2019; Giraudet *et coll.*, 2015; Causse *et coll.*, 2016; Durantin *et coll.*, 2017) ainsi qu'en situations opérationnelles (Bliss, 2003; Dehais *et coll.*, 2012; Edworthy, 2013; Callan *et coll.*, 2018). Il semble donc primordial d'étudier la surdité attentionnelle sous un autre angle en cherchant à déterminer comment limiter la surdité attentionnelle.

L'objectif principal de cette étude était de tester un protocole visant à placer des participants en situation de surdité attentionnelle. Dans ce but, une double tâche purement auditive a été utilisée, comme c'est le cas dans l'expérience de Fairnie *et coll.* (2016). Ce choix est aussi appuyé par les modèles de l'attention divisée s'accordant sur le fait que deux tâches d'une même modalité doivent interférer entre elles. L'étude de Macdonald et Lavie (2011) indique que la surdité attentionnelle n'apparaît qu'en condition de charge perceptive élevée. L'objectif secondaire était donc de reproduire cet effet de la charge. C'est pourquoi, la tâche principale utilisée ici présentait deux niveaux de charge perceptive.

En ce qui concerne la tâche principale, une tâche de type « speech-in-speech » (Coordinate Response Measure (CRM), Bolia *et coll.*, 2000) utilisée pour la recherche sur les communications multilocuteurs a été choisie. Ce choix s'explique par la volonté d'user d'une tâche écologique par rapport à la situation où un opérateur manquerait une alarme lors d'une communication radio. La tâche CRM consiste à rapporter deux informations entendues dans une phrase cible en anglais. La difficulté de cette tâche varie avec le SNR

(*Sound-to-Noise Ratio*, Brungart *et coll.*, 2001), elle a donc l'avantage de permettre d'obtenir plusieurs niveaux de charge auditive. Une tâche de détection d'alarme a été choisie pour la tâche secondaire en vue d'évaluer le niveau de surdité attentionnelle.

4.2 Méthodes

4.2.1 Participants

Des participants ont été recrutés sur la base militaire de Versailles Satory. La tâche multilocuteurs utilisée ici était très similaire à la tâche d'un contrôleur de la circulation aérienne. Par conséquent, les participants qui connaissaient déjà cette tâche n'étaient pas autorisés à participer à l'expérience. Selon ce critère, quinze militaires ont pu participer à l'expérience. Il s'agissait de 12 hommes et 3 femmes, d'âge moyen $43,67 \pm 10,98$ ans. Il se trouve que ces participants avaient déjà réalisé une expérimentation similaire, ce qui fait qu'ils avaient déjà été familiarisés à la tâche et aux stimuli. De plus, leurs audiogrammes avaient déjà été recueillis.

4.2.2 Stimuli

Stimuli de la tâche CRM (tâche principale) Le corpus Coordinate Response Measure est composé de 2048 phrases standardisées qui peuvent être prononcées indifféremment par un homme ou une femme. Il y a quatre locuteurs masculins et quatre autres féminins. Toutes les phrases ont la même forme : « Ready [identifiant] go to [color] [number] now », où l'identifiant indique à qui la phrase est adressée. Il y a une phrase pour chaque combinaison de huit identifiants (« Arrow », « Baron », « Charlie », « Eagle », « Hopper », « Laker », « Ringo », « Tiger »), quatre couleurs (« White », « Blue », « Red », « Green ») et huit chiffres (de 1 à 8). Soit un total de 2048 phrases dans le corpus. Un exemple pourrait être « Ready Baron go to white five now. » Dans cette expérience, nous n'avons utilisé que des phrases prononcées par des locuteurs masculins, il y avait donc 1024 phrases dans notre sélection. Au cours d'un essai, trois phrases qui ne partageaient aucune information similaire (identifiant, couleur ou numéro) étaient jouées simultanément. La phrase cible était celle avec l'identifiant « Baron ». Les deux autres phrases étaient appelées « phrases distractrices ». Il y avait deux conditions basées sur le rapport

signal sur bruit (SNR, *Sound-to-Noise Ratio*) existant entre la cible et la somme des deux phrases distractrices (basé sur la définition de Brungart *et coll.*, 2001). Dans la condition facile, la cible était jouée 6 dB (SPL) au-dessus de la somme des phrases distractrices (SNR = $+6\text{ dB}$). Dans la condition difficile, la cible avait le même niveau que la somme des phrases distractrices (SNR = 0 dB).

Stimuli de la tâche de détection (tâche secondaire) En plus des phrases, 50% des essais contenaient un stimulus critique (CS, *critical stimulus* dans la littérature). Celui-ci était un sinus pur à 700 Hz commençant à un moment aléatoire pendant l'émission de la phrase cible. Ce sinus était joué 6 dB (SPL) au-dessous la phrase cible. Sa durée était de 50 ms en comptant deux rampes cosinusoidales de 5 ms en entrée et sortie de sorte à éviter les clics.

4.2.3 Matériel

Le logiciel MatLab est utilisé pour créer, modifier et générer l'ensemble des stimuli qui sont ensuite émis via un casque Beyerdynamic DT 770 PRO $250\ \Omega$ à un volume d'écoute confortable. La réponse du participant à la tâche CRM est récupérée via un boîtier conçu pour l'expérience (figure 4.1a) et la réponse à la tâche de détection est récupérée à l'aide d'un bouton « oui »/« non » (figure 4.1b). L'ensemble est relié à un TDT RX8 pour ensuite envoyer les données vers MatLab en vue de leur traitement.



FIGURE 4.1 – Photographies des boîtiers fournis aux participants pour donner leurs réponses. En (a) le boîtier servant à la tâche principale, en (b) celui servant à la tâche secondaire.

4.2.4 Procédure

Compte tenu que les participants connaissaient déjà la tâche et les stimuli de l'expérience, il n'y avait donc pas de phase d'entraînement à la tâche. Ils réalisaient directement la phase expérimentale qui consistait en une double tâche dont la passation durait environ 30 minutes.

Double tâche Dans le but de mettre les participants dans une situation de surdité attentionnelle, ils réalisaient une double tâche.

- **Tâche CRM** Le participant devait écouter les phrases entièrement. Lorsque le son était terminé, il lui était demandé de rapporter la couleur et le numéro de la phrase cible sur le boîtier (un bouton par couleur ou numéro). L'instruction indiquait aux participants que c'était leur tâche prioritaire, quitte à échouer sur la seconde.
- **Tâche de détection** Immédiatement après avoir répondu à la tâche CRM, le participant devait indiquer si le stimulus critique était présent ou non. Ils utilisaient pour cela le second boîtier (bouton vert pour « oui » et rouge pour « non »).

Il y avait 28 répétitions \times 2 conditions de présence du CS (présents ou absents) \times 2 conditions SNR qui ont conduit à 112 essais. Les 112 essais étaient donc répartis en 8 blocs pour permettre aux participants de faire des pauses. Quatre de ces blocs correspondaient à la première condition SNR (SNR = +6 dB) et les quatre autres correspondaient à la deuxième condition SNR (SNR = 0 dB). Les blocs de chaque condition SNR alternaient, si bien que deux blocs consécutifs ne concernaient jamais la même condition SNR. La moitié des participants commençait avec la condition où le SNR = 0 dB tandis que l'autre partie commençait avec l'autre condition.

Tâche de contrôle Après la double tâche, les participants réalisaient une tâche de contrôle. Les stimuli étaient générés de la même manière, mais les participants ne devaient réaliser que la tâche de détection du CS. Ils avaient pour instruction d'ignorer les phrases et de concentrer leur attention sur le CS. L'objectif ici était de s'assurer que les stimuli critiques manqués lors de la double tâche pouvaient bien être imputés à l'attention accordée à la tâche principale.

4.3 Analyse des données

Tâche CRM

Dans un premier temps, les analyses concerneront la tâche CRM. Une première analyse portera sur la performance à la tâche CRM considérée comme une variable dépendante observée continue. Une ANOVA à mesures répétées visera à tester les effets de la présence ou non du stimulus critique à détecter et l'effet de la charge perceptive basse ($\text{SNR} = +6$) ou élevée ($\text{SNR} = 0$) ainsi que l'interaction éventuelle, à savoir est-ce que l'effet de la charge est le même en présence ou non du stimulus critique. Chaque participant est son propre témoin vis-à-vis de la présence ou non du stimulus aussi bien que vis-à-vis de la valeur du SNR.

La performance à la tâche CRM sera déclinée selon trois types de performance :

1. Réponse juste pour à la fois la couleur et le chiffre.
2. Réponse juste pour uniquement la couleur.
3. Réponse juste pour uniquement le chiffre.

Une deuxième analyse similaire portera sur le temps de réponse à la tâche CRM par l'intermédiaire du temps de réponse à la couleur puisque le participant à cette tâche de restitution de la couleur et du chiffre commence toujours par répondre au sujet de la couleur. Donc de la même manière que pour la performance à la tâche, une ANOVA à mesures répétées testera sur les temps de réponse à cette tâche CRM, les effets de la présence ou non du stimulus critique et l'effet de la charge ($\text{SNR} = 0$ ou $+6$ dB) ainsi que l'interaction éventuelle entre ces deux facteurs.

Tâche de détection

Dans un second temps, les analyses concerneront la tâche de détection. Après avoir établi le bilan du nombre de détections, omissions, fausses détections et rejets corrects, des tests de lien, à savoir test de χ^2 ou test exact de Fisher lorsque les effectifs théoriques sont inférieurs à 5, seront réalisés concernant ces effectifs. Un premier test évaluera s'il y a des différences significatives entre la situation de double tâche et la tâche contrôle.

Ensuite, des tests regarderont si une différence significative est présente entre charge élevée et charge faible, d'une part pour la double tâche et d'autre part pour la tâche contrôle.

À partir des effectifs de détections correctes et de fausses alarmes, des calculs de d' permettant d'évaluer pour chacun la difficulté de la tâche seront effectués pour chaque participant. Ces d' seront relatifs à la tâche de détection pendant la double tâche.

Une ANOVA testera si la valeur du SNR (0 ou +6 dB) a un effet significatif sur la valeur de d' .

Concernant les temps de réponse à la tâche de détection pendant la double tâche, une ANOVA à mesures répétées comparera les valeurs pour les détections correctes et pour les fausses alarmes, ainsi que l'effet de la charge et de l'interaction éventuelle entre les deux facteurs. Cette analyse ne sera menée qu'à titre indicatif, car le participant donnant en premier sa réponse à la tâche CRM puis seulement dans un second temps sa réponse pour la détection, seul le délai entre la question et la réponse à la tâche CRM peut être considéré comme un temps de réponse. Le délai entre la réponse à la tâche CRM et la réponse à la détection est ce qui est désigné comme temps de réponse à la tâche de détection, mais ce n'en est pas un *stricto sensu*, donc son analyse est uniquement réalisée à titre indicatif. L'ajout ici de l'analyse des temps de réponse de détection également pour la tâche contrôle est donc jugée inutile.

Lien entre tâche CRM et tâche de détection

Après un bilan du nombre d'erreurs (omissions et fausses détections) pour les essais avec réussite à la tâche CRM d'une part et pour les essais avec échec à cette tâche d'autre part, et cela, pour les deux niveaux de charge, des tests de lien seront réalisés.

Dans un premier temps, ils testeront l'effet de la réussite à la tâche CRM sur le nombre d'erreurs pour chacune des conditions de charge.

Dans un second temps, ils testeront l'effet de la condition de charge sur le nombre d'erreurs en ne considérant que les essais réussis du point de vue de la tâche CRM, puis en ne considérant que les essais ratés.

Une analyse complémentaire sera menée en réalisant un bilan, non plus sur les essais, mais sur les 15 participants ayant réussi ou non à l'une ou l'autre tâche. Ceux-ci seront répartis selon 2 groupes « bon » ou « moins bon » du point de vue du pourcentage de performance à la tâche CRM avec coupure à la médiane et selon deux groupes également du point de vue de leur d' « haut » et « moins haut » avec également coupure à la médiane. Un test de lien sera mené pour tester si la réussite à la tâche CRM influence la réussite à la tâche de détection.

Audiogrammes

Les audiogrammes des participants étaient exploités à l'aide de l'indicateur de surdité professionnelle, nommé par la suite « I_{pro} ». Cet indicateur est issu de la moyenne des valeurs d'audiogramme mesuré à 500, 1000, 2000 et 4000 Hz. C'est l'indice indiqué dans le code du travail pour évaluer l'état auditif des professionnels (Artières *et coll.*, 2006).

Dans un premier temps, des corrélations seront testées entre d'une part les 3 indices I_{pro} pour l'oreille gauche, l'oreille droite et les deux oreilles et d'autre part les 6 variables suivantes : d' en condition de charge faible, d' en condition de charge élevée, performance   la tâche CRM en condition de charge faible, performance   la tâche CRM en condition de charge élevée, temps de réponse à la tâche CRM en condition de charge faible, temps de réponse à la tâche CRM en condition de charge élevée.

Dans un second temps, les participants seront répartis suivant deux groupes de « bon » ou « moins bon » audiogramme en fonction de chacun des 3 indices I_{pro} suivant une coupure à la médiane. Des ANOVA testeront si les 6 variables définies ci-dessus diff rent suivant le groupe (« bon » ou « moins bon ») des participants.

Vérifications des conditions d'application des tests

- Pour toutes les analyses de variance, les conditions de normalité et d'homog nit  de la variance pour l'ensemble des groupes testés sont vérifiées. En cas de non-conformité à ces conditions d'application, une analyse statistique non paramétrique équivalente est menée.
- Pour les analyses de variance à mesure répétées, les conditions de sphéricité sont vérifiées. En cas de non-conformité, une correction de Grenhouse-Geiser est ap-

portée pour corriger l'écart à la sphéricité au travers d'un ajustement des degrés de liberté.

- Concernant les tests de liens, des tests de χ^2 sont utilisés. La condition d'application à respecter consiste à avoir un minimum de 5 pour chacun des effectifs théoriques attendus, à savoir les effectifs en cas d'absence de lien entre les variables testées. Dans le cas contraire, un test exact de Fisher, ne nécessitant pas d'effectifs théoriques minimum, est réalisé.

Une valeur de $p < 0,05$ sera considérée comme significative.

Les analyses statistiques sont réalisées grâce au logiciel Statistica (TIBCO®).

4.4 Résultats

4.4.1 Tâche CRM

Effet de la charge et de la présence du stimulus critique sur la performance à la tâche CRM Un effet principal très significatif du SNR est observé ($F(1,14) = 328$; $p < 0,001$) dans le sens d'une meilleure performance à la tâche CRM en pourcentage pour la condition de charge faible comparé à la condition de charge élevée.

En revanche, la présence ou non du stimulus critique n'a pas d'impact significatif sur la performance à la tâche CRM. De la même façon, aucune interaction significative n'est observée entre la présence ou non du stimulus critique avec l'effet de la charge. Ceci indique que l'effet de la charge sur la tâche CRM est donc le même en présence ou non du stimulus critique.

Le même schéma se retrouve pour les déclinaisons de la performance à la tâche CRM en ne considérant que la réponse à la couleur ou que la réponse au chiffre. Le même effet significatif est obtenu pour l'effet de la charge sur la performance de réponse à la couleur ($F(1,14) = 208$; $p < 0,001$) et sur la performance de réponse au chiffre ($F(1,14) = 272$; $p < 0,001$) et aucun effet de la présence ou non du stimulus critique ni d'une quelconque interaction entre sa présence et l'effet de la charge.

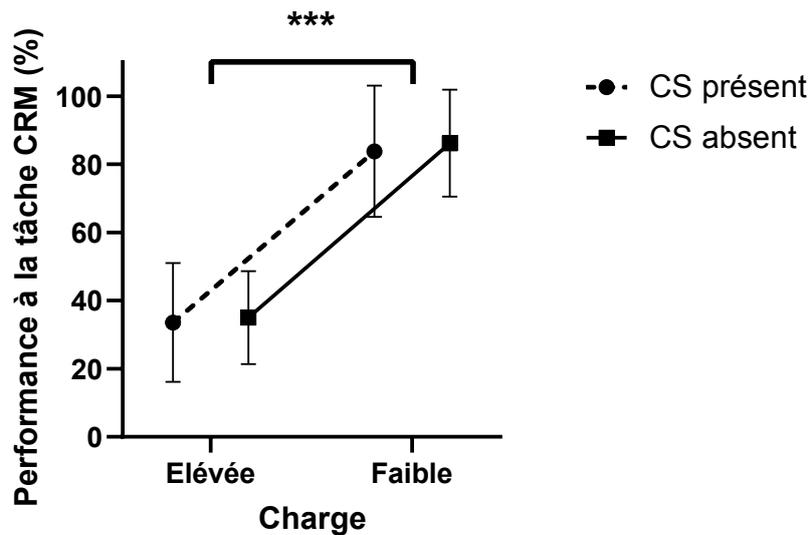


FIGURE 4.2 – Performance à la tâche CRM (%) en fonction du niveau de charge et la présence ou non du stimulus critique. Une performance significativement meilleure en condition de charge faible est observée dans les deux cas, mais aucun effet de la présence du stimulus critique ou d’interaction n’existe.

Effet de la charge et de la présence du stimulus critique sur le temps de réponse à la tâche CRM L’analyse sur les temps de réponse à la tâche CRM indique les mêmes conclusions que pour les performances à cette tâche (figure 4.3). L’effet du SNR est significatif ($F(1,14) = 6,5; p < 0,023$) dans le sens d’un temps de réponse meilleur pour la charge la plus faible.

Concernant la condition de charge élevée, une plus grande variabilité des temps de réponse est observée lorsque le stimulus est absent par rapport à lorsqu’il est présent. La différence s’avère néanmoins non significative au test de variance de Levene. Compte tenu que les effectifs sont réduits, ce résultat non significatif peut résulter d’un manque de puissance, mais quoi qu’il en soit, en cas d’écarts aux conditions de sphéricités requises, les corrections de Greenhouse-Geiser sont réalisées pour les analyses à mesures répétées.

4.4.2 Tâche de détection du stimulus critique

Effectifs concernant la détection du stimulus critique

La description du nombre de détections, d’omissions, de fausses détections et de rejets corrects pour les différentes conditions est la suivante :

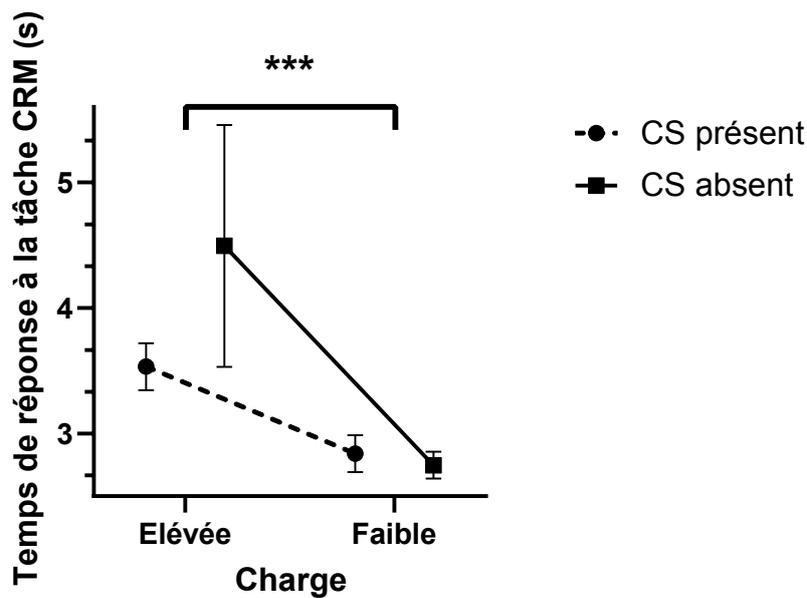


FIGURE 4.3 – Temps de réponses à la tâche CRM (s) en fonction du niveau de charge et de la présence ou non du stimulus critique. Une performance significativement meilleure en condition de charge faible est observée dans les deux cas, mais aucun effet de la présence du stimulus critique ou d’interaction n’existe.

- En condition de double tâche, à savoir en effectuant la tâche CRM :
 - Pour la condition de charge faible :
 - Sur les 420 essais (28 pour par participant) pour lesquels un stimulus critique est présent, 9 omissions sont constatées pour 411 détections ce qui donne 97,86 % de détection.
 - Considérant maintenant les 420 essais pour lesquels le stimulus critique n’est pas présent, 14 fausses détections sont relevées, 1 absence totale de réponse d’un participant et 405 rejets corrects.

	CS présent	CS absent	Total
Réponse « Présent »	411	14	425
Réponse « Absent »	9	405	414
Total	420	419*	839

Tableau 4.1 – Récapitulatif des résultats de détection pour la condition de charge faible en double tâche. (*) Une réponse est manquante.

- Pour la condition de charge élevée :
 - Sur les 420 essais pour lesquels le stimulus critique est présent, 4 omissions sont constatées pour 416 détections, ce qui donne 99,05 % de détection.

- Concernant les 420 essais sans stimulus critique, 10 fausses détections sont présentes, 2 absences totales de réponse et donc 408 rejets corrects.

	CS présent	CS absent	Total
Réponse « Présent »	416	10	426
Réponse « Absent »	4	408	412
Total	420	418*	838

Tableau 4.2 – Récapitulatif des résultats de détection pour la condition de charge élevée en double tâche. (*) Deux réponses sont manquantes.

- En tâche contrôle, avec écoute des phrases de la tâche CRM mais sans avoir à restituer une réponse les concernant :
 - Pour la condition de charge faible :
 - Sur les 105 essais (7 par participant) pour lesquels un stimulus critique est présent, 3 omissions sont constatées pour 102 détections, ce qui donne 97,14 % de détection.
 - Considérant maintenant les 105 essais pour lesquels le stimulus critique n'est pas présent, 3 fausses détections sont présentes et 102 rejets corrects.
 - Pour la condition de charge élevée :
 - Sur les 105 essais pour lesquels un stimulus critique est présent, 2 omissions sont constatées pour 103 détections, ce qui donne 98,10 % de détection.

	CS présent	CS absent	Total
Réponse « Présent »	103	0	103
Réponse « Absent »	2	105	107
Total	105	105	210

Tableau 4.3 – Récapitulatif des résultats de détection pour la condition de charge faible en tâche contrôle.

- Considérant maintenant les 105 essais pour lesquels le stimulus critique n'est pas présent, aucune fausse détection n'est constatée, ce qui donne 105 rejets corrects.

	CS présent	CS absent	Total
Réponse « Présent »	102	3	105
Réponse « Absent »	3	102	105
Total	105	105	210

Tableau 4.4 – Récapitulatif des résultats de détection pour la condition de charge élevée en tâche contrôle.

Les tests ne révèlent aucune différence significative concernant la proportion de détection entre les conditions de contrôle et de test.

De même, aucune différence significative n'est constatée entre condition de charge élevée et condition de charge faible, ni pour la tâche contrôle, ni pour la double tâche.

Un calcul des d' de détection pour chaque participant en condition de double tâche conduit aux valeurs présentées dans le tableau 4.5.

Participant	Charge élevée		Charge faible	
	d'	Catégorie	d'	Catégorie
1	4,20	d' haut	3,90	d' haut
2	4,20	d' haut	3,90	d' haut
3	4,20	d' haut	3,90	d' haut
4	3,57	d' moins haut	4,20	d' haut
5	4,20	d' haut	3,17	d' moins haut
6	4,20	d' haut	3,34	d' moins haut
7	3,61	d' moins haut	3,57	d' moins haut
8	4,20	d' haut	4,20	d' haut
9	3,90	d' moins haut	3,90	d' haut
10	4,20	d' haut	4,20	d' haut
11	3,57	d' moins haut	3,57	d' moins haut
12	3,27	d' moins haut	2,87	d' moins haut
13	3,90	d' moins haut	4,20	d' haut
14	3,61	d' moins haut	3,27	d' moins haut
15	3,90	d' moins haut	4,20	d' haut

Tableau 4.5 – Valeurs et catégorisation des d' pour chaque participant

La moyenne des d' est comme attendu légèrement supérieure pour la condition de charge élevée que pour la condition de charge faible, mais le test d'ANOVA portant sur les valeurs de d' pour les 15 participants ne révèlent toutefois aucun effet significatif du niveau de charge.

Temps de réponse concernant la détection du stimulus critique

L'analyse comparant conjointement les temps de réponse pour les détections correctes versus ceux pour les fausses alarmes lors de la double tâche et l'effet de la charge sur ces derniers indique que les temps de réponse sont significativement plus élevés pour les

fausses alarmes (ANOVA mesures répétées, $F(1,14) = 12,68$; $p < 0,01$) avec un effet significatif de la charge dans le sens d'un temps de réponse plus élevé pour la condition de charge élevée (ANOVA mesures répétées, $F(1,14) = 19,93$; $p < 0,001$). L'interaction entre les deux est tendancielle (ANOVA mesures répétées, $F(1,14) = 4,48$; $p = 0,053$), indiquant que l'effet de la charge sur les temps de réponse est présent aussi bien pour les détections correctes que pour les fausses alarmes, mais son effet serait plus marqué pour les fausses alarmes. Formulé autrement, les temps de réponse sont meilleurs pour les détections correctes ($TR = 0,723$ s) que pour les fausses alarmes ($TR = 0,779$ s) en condition de charge faible et cet écart entre détections correctes ($TR = 0,791$ s) et fausses alarmes ($TR = 0,944$ s) se creuse pour la condition de charge élevée. Les temps de réponse diminuent entre condition de charge élevée et faible significativement pour les fausses alarmes (test post hoc PLSD de Fisher, $p < 0,001$) et seulement tendancielllement pour les détections correctes (test post hoc PLSD de Fisher, $p = 0,055$). Par ailleurs, la différence entre les temps de réponse liés aux détections correctes et ceux liés aux fausses alarmes sont significativement différents en condition de charge élevée (test post hoc PLSD de Fisher, $p < 0,001$) et ne sont plus significativement différents en condition charge faible (figure 4.4).

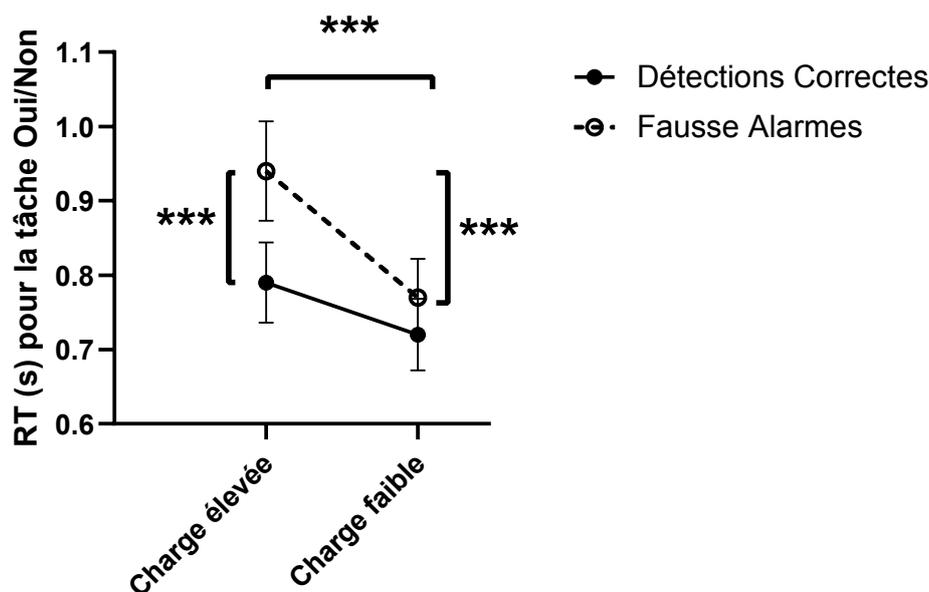


FIGURE 4.4 – Temps de réponse (s) pour la tâche Oui/Non en fonction de la charge pour les détections correctes et les fausses alarmes

4.4.3 Lien entre succès à la tâche de détection du stimulus critique et performance à la tâche CRM

Analyses portant sur les essais

À l'issue de tous les essais, peu d'erreurs de détection (omissions ou fausses alarmes) sont observées comme le montre la figure 4.5. En effet, cette figure indique le nombre respectif d'erreurs en fonction de la charge et de la réussite ou non à la tâche CRM. Ce très faible effectif d'erreurs risque de rendre difficile la mise en évidence de la surdité attentionnelle, à savoir le lien éventuel entre les quelques erreurs et la réussite à la tâche CRM pour les deux niveaux de charge.

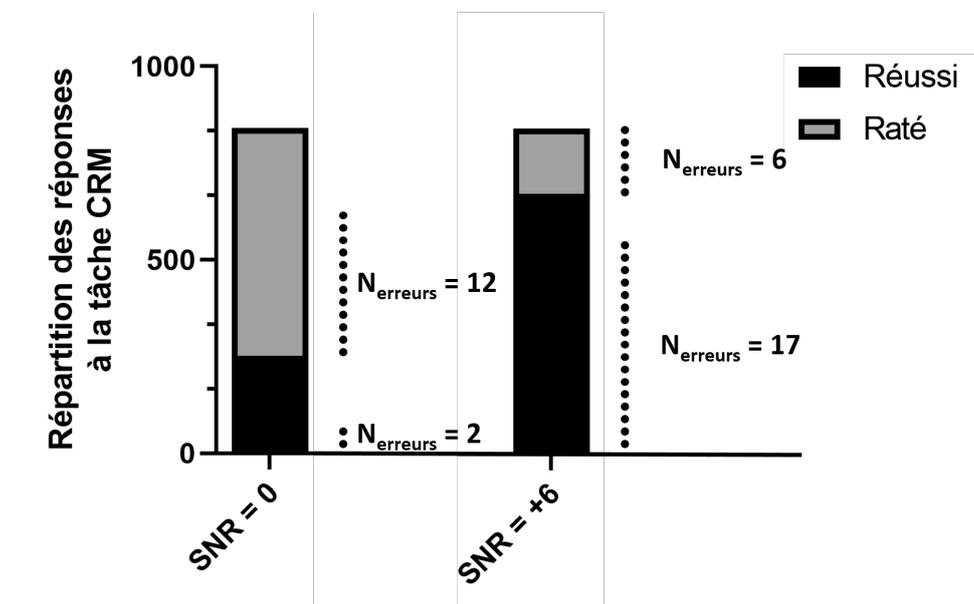


FIGURE 4.5 – Nombre d'erreurs selon la réussite à la tâche CRM pour la charge faible (SNR = +6) et la charge élevée (SNR = 0)

En distinguant selon le niveau de charge

- Pour la condition de charge élevée, 588 des 840 essais ont été ratés du point de vue de la couleur, du chiffre ou les deux à la tâche CRM et 252 ont été réussis, ce qui donne respectivement 70% d'essais ratés et 30% d'essais réussis sur l'ensemble des essais. Parmi les 252 essais réussis, 2 erreurs (omissions ou fausses alarmes) sont observées contre 250 réponses justes (détections ou rejets corrects). Parmi les 588 essais ratés, 12 erreurs sont constatées et 576 réponses justes (voir tableau 4.6). Le test de lien sur ces effectifs conduit à un résultat non significatif, à savoir que

concernant la condition de charge élevée, il n'y a pas davantage d'erreurs lorsque la tâche CRM est réussie, $2/252 = 0,79\%$ que lorsqu'elle est ratée, $12/588 = 2,04\%$.

	Tâche Oui/Non		
	Erreurs	Réponses correctes	Total
CRM réussi	2	250	252
CRM raté	12	576	588
Total	14	826	840

Tableau 4.6 – Effectifs observés concernant la répartition des réponses à la tâche Oui/Non selon la réussite à la tâche CRM pour la condition de charge élevée

- Pour la condition de charge faible, 168 essais ont été ratés et 672 réussis parmi le total de 840 essais, soit respectivement 20 % d'essais ratés et 80 % d'essais réussis du point de vue de la tâche CRM. Concernant les 168 essais ratés pour la tâche CRM, 6 erreurs sont observées pour 162 réponses justes et pour les 672 essais réussis, 17 erreurs sont constatées et 655 réponses justes (voir tableau 4.7). Le test de lien sur ces effectifs conduit à un résultat non significatif, à savoir que concernant la condition de charge faible, il n'y a pas davantage d'erreurs lorsque la tâche CRM est réussie, $17/672 = 2,53\%$ que lorsqu'elle est ratée, $6/168 = 3,57\%$.

	Tâche Oui/Non		
	Erreurs	Réponses correctes	Total
CRM réussi	17	655	672
CRM raté	6	162	168
Total	23	817	840

Tableau 4.7 – Effectifs observés concernant la répartition des réponses à la tâche Oui/Non selon la réussite à la tâche CRM pour la condition de charge faible

Quel que soit le niveau de charge, il n'y a pas de différence observée concernant le nombre d'erreurs entre les situations où le CRM est réussi et celles où il est raté.

Effet de la charge sur la tâche de détection selon la réussite ou non à la tâche CRM Pour les situations de CRM réussis, 2 erreurs et 250 réponses justes sont constatées en charge élevée tandis que 17 erreurs et 655 réponses justes sont observées en charge faible (voir tableau 4.8).

Le résultat se révèle non significatif ($\chi^2(1) = 2,74$; $p = 0,097$) à savoir que le nombre d'erreurs commises lorsqu'on réussit n'est pas significativement différents selon la charge élevée ou basse.

		Tâche Oui/Non		
		Erreurs	Réponses correctes	Total
CRM réussi	Charge élevée	2	250	252
	Charge faible	17	655	672
	Total	19	905	924

Tableau 4.8 – Effectifs observés concernant la répartition des réponses à la tâche Oui/Non en fonction de la charge lorsque la tâche CRM est réussie

Pour les situations de CRM ratés, 12 erreurs et 576 réponses justes sont observées pour la charge élevée tandis que 6 erreurs et 163 réponses justes sont obtenues pour la charge faible.

		Tâche Oui/Non		
		Erreurs	Réponses correctes	Total
CRM raté	Charge élevée	12	576	588
	Charge faible	6	162	168
	Total	18	738	756

Tableau 4.9 – Effectifs observés concernant la répartition des réponses à la tâche Oui/Non en fonction de la charge lorsque la tâche CRM est ratée

Le résultat se révèle comme ci-dessus non significatif ($\chi^2(1) = 1,31, p = 0,25$) à savoir que le nombre d'erreurs commises lorsqu'on rate la tâche CRM n'est pas significativement différents selon la charge élevée ou faible.

Analyses complémentaires portant sur les participants

Aucun lien n'est identifié entre la réussite à la tâche CRM et la tâche de détection du stimulus critique en considérant l'ensemble des essais. Cette absence de lien est confirmée par une autre analyse portant sur la répartition des 15 participants. En effet, en répartissant chaque participant dans une catégorie de meilleure ou moins bonne réussite à la tâche CRM d'une part et dans une catégorie de meilleur ou moins bon d' pour la tâche de détection, les répartitions des participants sont les suivantes pour chacune des conditions de charge :

- Pour la condition de charge élevée, parmi les 8 participants ayant une plutôt bonne réussite à la tâche CRM avec la coupure à la médiane sur le pourcentage de performance à la tâche CRM : 4 d'entre eux ont un meilleur d' et 4 un moins bon d' selon également la coupure à la médiane pour les d' . Parmi les 7 ayant une moins bonne

performance à la tâche CRM, 3 ont un d' haut et 4 ont un d' moins haut (tableau 4.10). Il n'y a pas de lien significatif entre la réussite des participants à la tâche CRM et leur aisance à la tâche de détection pour la condition de charge élevée.

	d' haut	d' moins haut	Total
CRM bon	4	4	8
CRM moins bon	3	4	7
Total	7	8	15

Tableau 4.10 – Lien entre les participants réussissant la performance à la tâche CRM et à la tâche de détection pour la condition de charge élevée

- Pour la condition de charge faible, parmi les 7 participants ayant une plutôt bonne réussite à la tâche CRM avec la coupure à la médiane sur le pourcentage de performance à la tâche CRM : 4 d'entre eux ont un meilleur d' et 3 un moins bon d' selon également la coupure à la médiane pour les d' . Parmi les 8 participants ayant une moins bonne performance à la tâche CRM, 5 ont un d' haut et 3 ont un d' moins haut (tableau 4.11). De la même manière que pour la condition de charge élevée, il n'y a pas de lien significatif dans la condition de charge faible entre la réussite des participants à la tâche CRM et leur aisance à la tâche de détection.

	d' haut	d' moins haut	Total
CRM bon	4	3	7
CRM moins bon	5	3	8
Total	9	6	15

Tableau 4.11 – Lien entre les participants réussissant la performance à la tâche CRM et à la tâche de détection pour la condition de charge faible

4.4.4 Lien avec les audiogrammes

Les analyses de corrélation en fonction des 3 variables I_{pro} ne révèlent qu'une seule corrélation significative. Le d' à la détection en condition de charge élevée indique une difficulté significativement ($R = -0,58$; $p = 0,023$; $N = 15$) plus importante pour les participants ayant une moins bonne audition à l'oreille gauche (figure 4.6). Aucun résultat significatif toutefois concernant l'oreille droite ni sur la moyenne des deux oreilles.

L'ANOVA sur les d' en fonction de l'indice I_{pro} moyenné sur les deux oreilles (appelé $I_{pro,GD}$) indique un effet tendanciel ($F(1,13) = 4,20$; $p = 0,06$) en condition de charge élevée. Le d' passe de 4,10 pour les participants bénéficiant d'un meilleur $I_{pro,GD}$ à 3,79

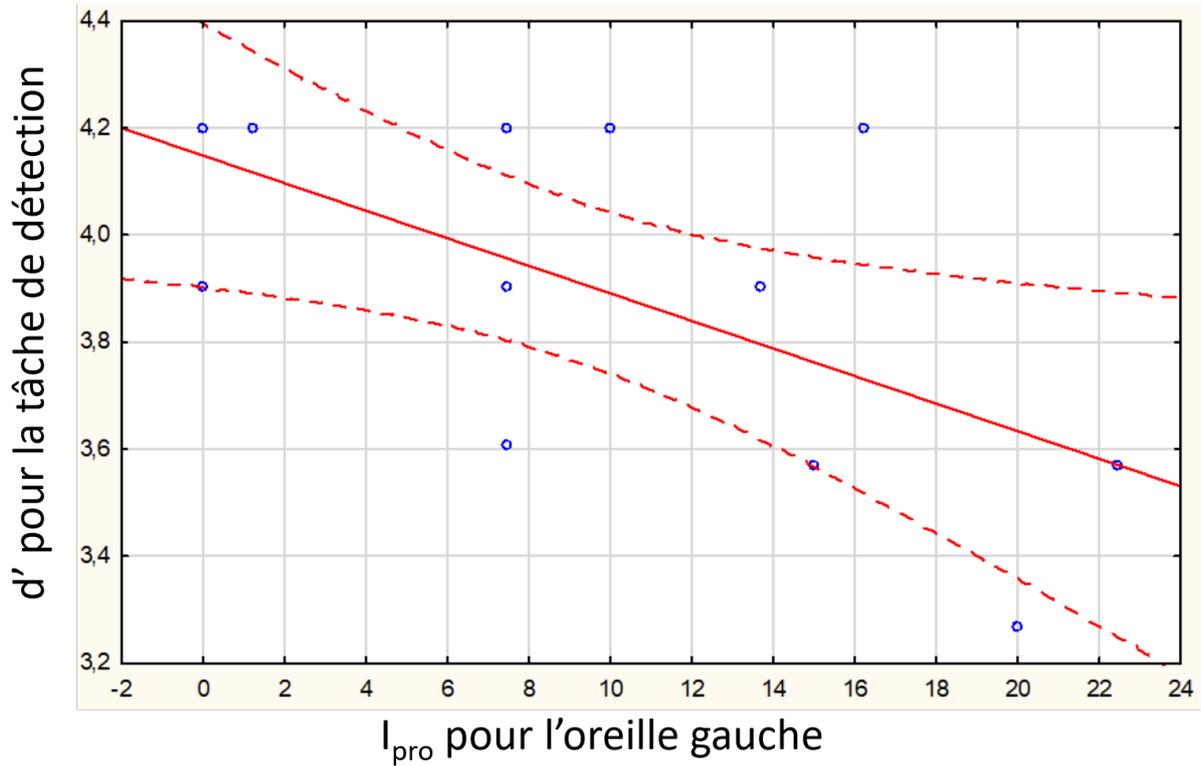


FIGURE 4.6 – Corrélation entre le d' pour la tâche de détection en condition de charge élevée en fonction de l'indice I_{pro} pour l'oreille gauche

pour les autres (figure 4.7). En revanche, aucun effet n'est observé en condition de charge faible.

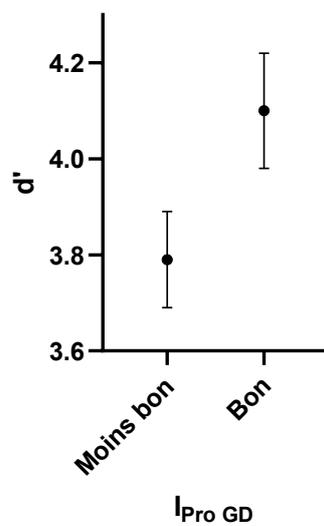


FIGURE 4.7 – d' en fonction de la valeur I_{pro} moyennée sur les deux oreilles ($I_{pro,GD}$)

L'ANOVA sur la performance CRM indique également un effet tendanciel ($F(1,13) = 3,31$; $p = 0,09$) en condition de charge élevée dans le sens d'une meilleure performance pour les participants ayant un meilleur $I_{pro,GD}$. La performance à la tâche CRM passe de 41,96 % de réussite pour les participants ayant un bon indice $I_{pro,GD}$ à 29,17 % pour les autres (figure 4.8). En revanche, aucun effet n'est observé en condition de charge faible.

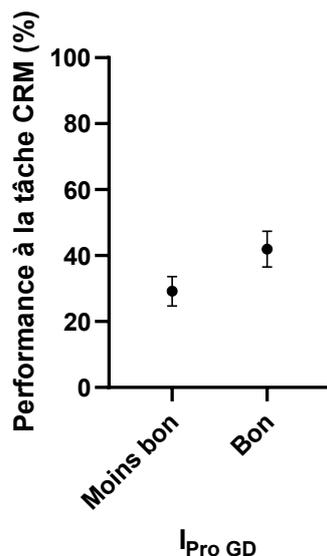


FIGURE 4.8 – Pourcentage de performance à la tâche CRM en condition de charge élevée en fonction de l'indice $I_{pro,GD}$

Les ANOVA sur les temps de réponse de la tâche CRM ne révèlent aucun effet significatif en fonction de l'indice $I_{pro,GD}$ des participants, même si qualitativement, une légère tendance à la baisse est observée pour les participants de meilleure audition.

Une MANOVA réalisée sur les 3 variables, d' de la détection, pourcentage de performance à la tâche CRM et temps de réponse à la tâche CRM révèle à nouveau un effet tendanciel dans le sens de meilleure performance générale (Wilks Lambda = 0,52; $F(3,11) = 3,34$; $p = 0,060$) pour les participants de meilleur $I_{pro,GD}$ en condition de charge élevée.

Une MANOVA réalisée sur ces 3 mêmes variables en fonction de l'indice $I_{pro,GD}$ ne donne pas de résultats de significatif pour la condition de charge faible.

4.5 Discussion

L'analyse statistique a mis en évidence une meilleure performance à la tâche CRM lorsque le SNR était de +6 dB plutôt que de 0 dB que ce soit en termes de pourcentage de réussite (respectivement, 85 % contre 34,28 %) ou en termes de temps de réaction (respectivement, 2,79 s contre 4,01 s en moyenne). Ceci permet de conclure que la variation du SNR a bien entraîné la variation de charge perceptive attendue. La condition de SNR = 0 dB et la condition de SNR = +6 dB peuvent bien être discutées en tant que condition de charge (perceptive) élevée et faible.

Aucun effet de la présence du stimulus critique sur la réussite à la tâche CRM n'a été mis en évidence. Cette dernière n'a donc pas été impactée dans sa difficulté par la présence du stimulus associé à la tâche secondaire. De ce point de vue, l'utilisation combinée de ces deux tâches était donc intéressante.

Cependant, aucune différence du taux de détection du stimulus critique n'a été observée entre la phase de test comportant la double tâche et la condition contrôle ne comprenant que la réponse à la tâche Oui/Non. Pourtant, d'après les deux grands modèles de l'attention divisée, deux tâches dans une même modalité doivent interférer entre elles si la consommation de ressource dépasse la capacité disponible (Kahneman, 1973; Wickens, 1980). Ceci suggère que la tâche CRM n'ait pas été assez demandeuse pour entraîner de la surdité attentionnelle et, donc, une baisse de la détection.

Cette hypothèse est appuyée par l'absence d'effet de la condition de charge sur le taux de détection ou la difficulté à répondre à cette tâche, représentée par le d' . En effet, le modèle Lavie (1995) prévoit que certains stimulus non pertinents en regard de la tâche principale ne peuvent pas être traités en condition de charge perceptive élevée, contrairement à ce qui a été observé ici. Cela suggère donc que même en condition de charge élevée, la tâche CRM n'a pas été suffisamment demandeuse en ressources pour engendrer de la surdité attentionnelle.

Par ailleurs, un effet significatif de la charge est observée sur le temps de réponse à la tâche de détection. Ceci vient appuyer les interprétations précédentes. Si les deux tâches

n'interféraient pas du tout, cet effet serait nul. Cela indique donc que la charge engendrée par la tâche CRM a bien eu un impact négatif sur le traitement des stimuli associés à la tâche secondaire mais, cependant, elle a été insuffisante pour être source d'erreurs. Le très faible nombre d'erreurs à la tâche Oui/Non relevé quelle que soit la réussite à la tâche CRM et quelle que soit la charge confirme que, bien que la tâche CRM ait entraîné une hausse des temps de réponse en condition de charge élevée, cela n'a pas été suffisant pour mettre le participant en échec dans la tâche secondaire.

En ce qui concerne le lien entre la performance de détection des participants et leur audiométrie, seule celle relevée sur l'oreille gauche est significative. Ni l'audiométrie de l'oreille droite ni la moyenne des deux oreilles ne montre d'effet significatif sur la performance de détection. L'effet observé du côté gauche est donc peut-être dû au hasard.

Toutefois, il est intéressant de noter qu'un effet tendanciel de l'audiométrie sur la difficulté à la tâche de détection et la performance à la tâche CRM en condition de charge élevée. Il semble qu'une meilleure audition puisse être reliée à une plus grande facilité à réaliser ces deux tâches.

4.6 Conclusion

Cette première expérience n'a pas été en mesure de mettre en évidence de surdité attentionnelle. En effet, très peu de stimuli critiques ont été manqués. De manière plus générale, la tâche secondaire n'a fait l'objet que de très peu d'erreurs, même en comptant les fausses alarmes. La confrontation des différents résultats obtenus mène à conclure que la variation du SNR dans la tâche CRM utilisée en vue de faire varier le niveau de charge perceptive n'a pas engendré une demande suffisante. Cependant, dans la condition de charge la plus élevée ($\text{SNR} = 0 \text{ dB}$) les participants n'atteignaient plus que 34,28 % de réponses correctes à la tâche CRM. Il semblait donc nécessaire à ce stade d'adapter le protocole en vue de générer un plus fort niveau de charge perceptive. C'est l'objet de l'expérience 2 au chapitre 5.

Chapitre 5 : Expérience 2

5.1 Introduction

Un lien entre surdité attentionnelle et alarmes manquées a été mis en évidence en simulateur (Dehais *et coll.*, 2014, 2016, 2019; Giraudet *et coll.*, 2015; Causse *et coll.*, 2016; Durantin *et coll.*, 2017) ainsi qu'en situations opérationnelles dans le domaine de l'aviation (Bliss, 2003; Dehais *et coll.*, 2012; Callan *et coll.*, 2018) ou bien dans le domaine médical (Edworthy, 2013).

Une première expérience présentée au chapitre précédent visait à étudier la possibilité d'obtenir une situation de surdité attentionnelle et si le niveau de surdité attentionnelle était lié au niveau de charge perceptive. Cependant, lors de l'expérience 1, aucune surdité attentionnelle n'a pu être observée.

Dans la littérature, les conditions dans lesquelles la surdité attentionnelle apparait ne sont pas clairement établies. La surdité attentionnelle semble être régulièrement engendrée par une tâche visuelle (Macdonald et Lavie, 2011; Raveh et Lavie, 2015; Tellinghuisen *et coll.*, 2016; Molloy *et coll.*, 2015, 2018). De même, une tâche auditive génère souvent de la surdité attentionnelle (Dalton et Fraenkel, 2012; Koreimann *et coll.*, 2014). Si l'influence du niveau de charge perceptive sur le niveau de surdité attentionnelle n'est pas toujours démontré (Gomes *et coll.*, 2008; Murphy *et coll.*, 2013; Sabri *et coll.*, 2013; Masutomi *et coll.*, 2016), il semble que dans la majorité des cas un fort niveau de charge perceptive reste une condition nécessaire à l'apparition de la surdité attentionnelle (Francis, 2010; Fairnie *et coll.*, 2016). Ce qui suggère que les résultats expérimentaux obtenus lors de la première expérience relèvent plutôt du protocole utilisé.

En effet, plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces résultats. Tout d'abord, le protocole utilisé impliquait le participant dans une double tâche. Il semble que la surdité attentionnelle survienne plus généralement lorsque le stimulus critique (celui qui peut être manqué) est inattendu (Macdonald et Lavie, 2011; Dalton et Fraenkel, 2012; Koreimann *et coll.*, 2014). Or, lors d'une double tâche le stimulus critique (ici, le stimulus à

détecter dans la tâche secondaire) n'est pas inattendu. Ensuite, bien que la surdité attentionnelle ait pu être observée en simulateur, le niveau de charge imposé dans ces situations était bien supérieur à celui en jeu dans notre tâche principale qui n'a donc peut-être pas suffi à engendrer de la surdité attentionnelle. Ceci mène donc à une seconde hypothèse : le niveau de charge cognitive était trop faible. Enfin, les expériences de Simons et Chabris (1999) et Dalton et Fraenkel (2012) mettent en évidence qu'un stimulus a plus de risque d'être manqué s'il se trouve dans le canal à ignorer plutôt que dans le canal suivi. Une dernière hypothèse est donc qu'il est nécessaire d'avoir deux canaux dont un à ignorer pour engendrer de la surdité attentionnelle.

Ainsi, ici, l'objectif était, d'une part, de réaliser un protocole impliquant une tâche plus compliquée pour le participant afin d'augmenter sa charge perceptive au point de générer de la surdité attention. Ceci dans le but de déterminer s'il était possible de la limiter par l'ajout d'une caractéristique sonore particulière au stimulus critique (celui pouvant être manqué) : la rugosité. Celle-ci correspond au percept associé à la présence de modulations d'amplitude ou de fréquences (Moore, 2012). Des études précédentes ont montré que le percept de rugosité était présent dans les cris humains (alarmes naturelles) et dans des alarmes déjà existantes en environnement professionnel (Arnal *et coll.*, 2015). De plus, le lien entre rugosité et augmentation des réactions comportementale a été établi (Taffou *et coll.*, 2021). La rugosité semblait donc intéressante dans l'objectif de limiter la surdité attentionnelle. Enfin, une autre particularité de ce protocole était de ne faire apparaître le stimulus critique qu'une seule fois lors de la phase expérimentale pour s'assurer qu'il soit réellement inattendu et qu'il ne bénéficie d'aucune attention.

En résumé, les hypothèses testées étaient les suivantes :

1. Une charge perceptive supérieure à celle mise en jeu dans la première expérience est requise pour mettre en évidence de la surdité attentionnelle.
2. Une meilleure focalisation de l'attention par le biais d'une tâche plus complexe est requise pour mettre en évidence de la surdité attentionnelle.
3. Un stimulus inattendu a plus de risque d'être manqué.
4. Le stimulus inattendu a plus de risque d'être manqué s'il se trouve dans le canal à ignorer ou à suivre.

5. Ajouter de la rugosité au stimulus inattendu permet de limiter les détections manquées.

Dans l'objectif de répondre aux points 1 et 2, une adaptation de la tâche N-back classique était utilisée pour augmenter à la fois le niveau de charge perceptive ainsi que la complexité de la tâche.

Tâche N-Back La tâche N-back consiste à restituer une information mémorisée lors d'une présentation en série. L'indice N représente la distance séparant la question de l'élément cible. Généralement, l'indice N de la position est défini en notant $N = 0$ le dernier élément avant la question. L'avant-dernier élément est donc noté $N = 1$, celui qui le précède est $N = 2$ et ainsi de suite. Ainsi, N représente le nombre d'éléments qui sépare la question de celui à rapporter. Cette tâche impose la mémorisation de son élément cible et est donc fréquemment utilisée pour générer une charge cognitive élevée en vue d'augmenter le niveau de difficulté d'une tâche (Owen *et coll.*, 2005). Une tâche N-back classique consisterait, par exemple, à mémoriser plusieurs chiffres présentés au casque les uns après les autres. À la fin, la question serait : « le chiffre 8 faisait-il partie de la séquence ? ». Dans cet exemple, la tâche serait alors dite « 0-Back » si le « 8 » était en dernière position, 1-Back pour l'avant-dernière position et ainsi de suite.

Adaptation de la tâche N-Back utilisée lors de cette expérience Ici, en vue de générer une forte charge perceptive, la tâche N-back était adaptée. Le participant devait réaliser trois fois consécutivement une partie de la tâche CRM (identification de la couleur¹) en mémorisant les trois réponses (figure 5.1). L'ensemble des stimuli et de la procédure est détaillée par la suite. Lors de l'essai final, un stimulus inattendu (nommé stimulus critique par la suite) était émis, de la même manière que dans l'étude de Macdonald et Lavie (2011). Le participant était ensuite questionné pour déterminer s'il avait, ou non, perçu ce stimulus. Si la tâche N-Back est très utilisée lorsque l'objectif est de faire varier le niveau de charge cognitive, ici l'intérêt de cette tâche était plutôt d'obliger le participant à focaliser son attention sur la tâche en augmentant sa difficulté. À noter que cette adaptation a aussi entraîné une hausse de la charge perceptive telle que la définit Lavie (1995) puisque l'essai comprenait plus de stimuli en comparaison de la tâche

1. la tâche complète est détaillée au chapitre 4

proposée dans l'expérience 1.

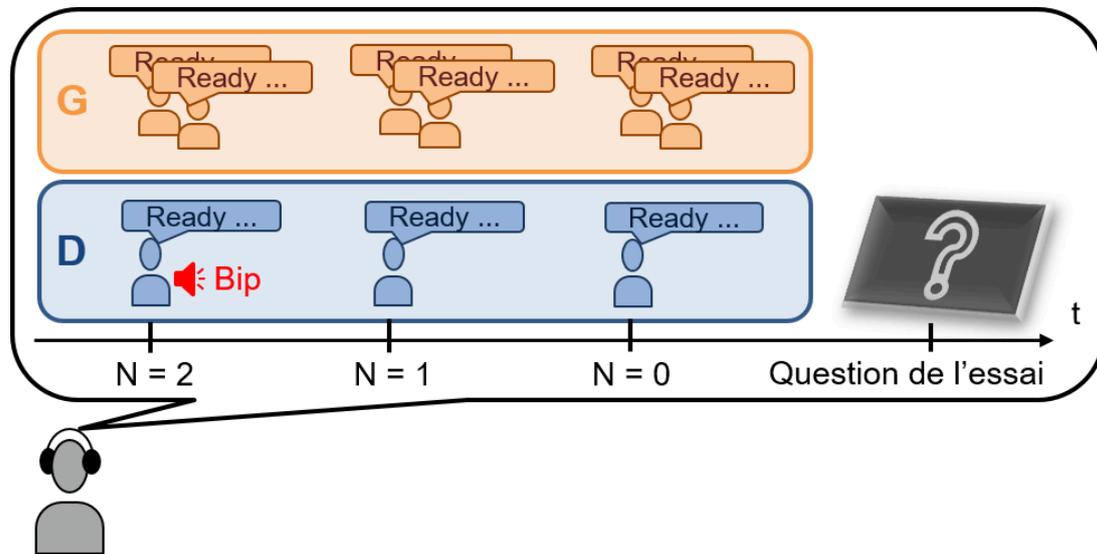


FIGURE 5.1 – Schéma de la procédure de l'expérience 2. À chaque essai, le participant devait suivre 3 phrases successives dans son oreille cible (la droite sur cet exemple) pour retenir un couple réponse, indicateur et couleur, correspondant à chacune d'elles, tout en ignorant les phrases présentées dans son autre oreille. L'essai se terminait par une question demandant de rapporter une information de l'un des 3 couples mémorisés. Lors du dernier essai, un stimulus critique était émis (« Bip » sur le schéma) dans l'oreille cible ou à ignorer durant l'une des 3 phrases de l'oreille cible. Une question supplémentaire portait donc sur la présence de son et, pour ceux l'ayant détecté, sur sa nature.

L'expérimentation consistait alors à mesurer la détection d'un stimulus critique non-attendu pendant la réalisation d'une tâche. Dans cette expérience, la tâche demandée aux participants était une tâche adaptée à partir de deux tâches largement utilisées dans la littérature, la tâche CRM (Bolia *et coll.*, 2000, Coordinate Measure Response) et la tâche N-back. Ces adaptations seront décrites précisément dans la partie méthodes. Afin de s'assurer que l'absence de détection des stimuli non détectés était bien due à de la surdité attentionnelle, une tâche contrôle était réalisée. Elle consistait à détecter ces mêmes stimuli critiques, cette fois-ci attendus par les participants, dans les mêmes conditions sonores.

L'expérimentation prévoyait de tester deux niveaux de rugosité pour le stimulus critique. De plus, deux conditions de présentation du stimulus critique étaient explorées, selon qu'il était émis dans l'oreille cible ou était dans l'oreille à ignorer. Ceci conduisait à constituer 4 groupes de participants.

5.2 Méthodes

5.2.1 Participants

Dans cette expérience, l'objectif était de recruter 4 groupes de 60 participants sur la base des critères d'inclusion suivants :

- Âge compris entre 18 et 40 ans. En effet, 18 ans est l'âge minimum pour pouvoir s'inscrire et être rémunéré sur le site d'expérimentations en ligne utilisé pour le recrutement. Par ailleurs, afin d'éviter des participants présentant une éventuelle presbyacousie, l'âge maximum de 40 était demandé.
- Une répartition équilibrée d'hommes et de femmes par groupe était également souhaitée.
- Une absence de médication était requise, car certains traitements peuvent altérer les performances auditives ou cognitives.
- Des participants natifs anglophones étaient exigés afin d'avoir une bonne compréhension des phrases en anglais utilisées dans l'expérimentation.
- Les participants ne devaient pas présenter de problèmes auditifs sur la base de leur déclaration.
- Les participants devaient présenter une acuité visuelle normale ou corrigée à la normale. Ceci était nécessaire, car la tâche principale nécessitait l'identification de couleurs.
- Les participants devaient avoir une note d'approbation minimum de 90 % aux précédentes expériences auxquelles ils avaient participé via le site de recrutement utilisé (détaillé ci-après), attestant de leur bonne implication en tant que participant.
- Un maximum de 100 participations à des expériences en ligne préalable sur le site de recrutement utilisé était demandé.
- Les participants ne pouvaient être impliqués que dans un seul des quatre groupes expérimentaux de l'étude.
- Les participants devaient obligatoirement disposer d'un casque pour la passation de l'ensemble de l'expérimentation.

Compte tenu de ces critères et des restrictions imposées par le site Prolific utilisé pour le recrutement détaillé ci-après, 52, 55, 55 et 55 participants ont pu être recrutés finalement pour chacune des quatre conditions expérimentales.

5.2.2 Matériel

Site Prolific Le site Prolific a été utilisé pour recruter les participants de cette expérience en ligne. Il s'agit d'un site sur lequel des participants peuvent s'inscrire volontairement et gratuitement pour la passation d'expériences rémunérées. Il est également possible de s'y inscrire en tant qu'expérimentateur pour y recruter des participants parmi les inscrits. Dans ce cas, l'expérimentateur rémunère les participants selon un tarif horaire qu'il définit lors de la mise en place de son expérience via ce site et paye également pour l'usage de cette plateforme. La rémunération du participant par Prolific s'effectue alors grâce au compte PayPal du participant, nécessaire lors de son inscription.

Au moment de l'inscription, chaque inscrit doit renseigner son identité à l'aide de documents officiels (carte d'identité, passeport ou permis de conduire) afin de s'assurer qu'un participant ne puisse pas créer plusieurs comptes et passer plusieurs fois une même expérience. Le site permet d'enregistrer et de sécuriser ces données. Lors de son inscription, un participant remplit un questionnaire personnel concernant différentes informations telles que son âge, son genre, son pays de naissance, son pays de résidence, sa catégorie socio-professionnelle, ses antécédents médicaux, etc. Les réponses sont utilisées par le site Prolific pour définir une liste de critères d'inclusion que les expérimentateurs peuvent sélectionner. Le site propose ensuite l'expérience en diffusant le lien de passation uniquement aux inscrits respectant les critères d'inclusion sélectionnés par les expérimentateurs. Des critères non présents dans la liste prédéfinie par le site peuvent être rajoutés dans la description de l'expérience proposée aux participants. Chaque participation à une expérience donnée proposée par le site s'effectue sur la base du volontariat.

De son côté, après une passation, l'expérimentateur a la possibilité de rejeter les participants n'ayant objectivement pas respecté les termes de l'expérience : expérience inachevée, non-respect d'un des critères d'inclusion défini dans la description, etc. Les validations et rejets d'un participant sont comptabilisés par le site pour lui attribuer une note qui témoigne de sa bonne réalisation des expériences proposées. Cette note peut alors servir de critère d'inclusion aux futurs expérimentateurs. Le site Prolific protège aussi les participants en limitant le nombre de rejets possible pour un expérimentateur dans une expérience donnée, de sorte à s'assurer que l'expérimentateur ne puisse pas récupérer leurs données expérimentales sans avoir à les rémunérer. Dans le cas où un participant aurait une question ou remarque supplémentaire à propos du traitement de ses données ou de sa passation, il lui est possible de contacter l'expérimentateur via la messagerie du site.

Enfin, le site Prolific permet d'assurer l'anonymat des participants. En effet, les expérimentateurs n'ont accès à aucune donnée nominative ou permettant l'identification de ceux-ci.

Site Pavlovia Le site Pavlovia a été utilisé pour le déroulement de l'expérience en ligne. En effet, ce site payant propose des serveurs sécurisés pour l'hébergement d'expériences en ligne et a été utilisé pour héberger le site web conçu pour cette expérimentation. Le principe de Pavlovia est de permettre de télécharger les fichiers sources du site web conçu par un expérimentateur vers les serveurs de Pavlovia en vue de la diffusion du lien vers l'expérimentation en ligne. Concernant la conception des fichiers sources, le site Pavlovia n'autorise que les langages HTML/CSS et JavaScript pour la création de l'interface avec le participant conçu par l'expérimentateur. Ceci s'explique par le fait que JavaScript est un langage dont le code est exécuté dans le navigateur du participant. Il a donc l'avantage de ne pas s'exécuter sur les serveurs de Pavlovia, garantissant leur sécurité. L'autre avantage de ce langage est de garantir aussi la sécurité de la machine du participant puisqu'en s'exécutant dans le navigateur, il n'a pas accès au contenu de son ordinateur. Les deux premiers langages HTML et CSS sont dédiés au contenu statique de la page affichée à l'écran. JavaScript permet quant à lui de rendre la page interactive (évolution du contenu de la page, émission d'un son, d'une vidéo, récupération d'un appui sur un bouton, etc.). En plus de servir d'hébergeur au site web de l'expérimentation en ligne, Pavlovia permet aussi de stocker les données expérimentales des participants de manière sécurisée.

Librairie JsPsych et programme JavaScript La librairie JsPsych (de Leeuw, 2015) a été utilisée pour concevoir l'expérimentation en JavaScript. Cette librairie contient un ensemble de fonctions prédéfinies prévues pour la réalisation d'expériences psychophysiques en ligne exécutées dans le navigateur (fonctions nécessaires à l'enregistrement des données, à la transmission de ces données sur le site Pavlovia, etc.).

Un programme conçu en JavaScript permettait de préparer le déroulement de l'ensemble des essais. Afin de ne pas dépendre des capacités de calcul variables des ordinateurs selon les participants, les calculs nécessaires pour la préparation des essais tel que la sélection, le mixage ou l'égalisation des sons, étaient réalisés dans leur navigateur avant le début de l'expérimentation. De la même façon, le programme JavaScript permettait de palier les éventuels problèmes de pertes de connexion des participants pendant la passation des essais en ligne en téléchargeant automatiquement au préalable tout le contenu multimédia nécessaire à la réalisation de l'expérience dans la mémoire du navigateur de l'ordinateur du participant. Dès lors, la passation entière de l'expérience pouvait se dérouler éventuellement hors connexion si celle-ci venait à manquer (coupure internet ou débit insuffisant).

Matériel participants Concernant le matériel nécessaire pour les participants qui réalisaient l'expérimentation en ligne, ils avaient besoin d'un ordinateur connecté à internet avec écran, clavier, souris ainsi qu'un casque audio (intra-auriculaire, supra-aural ou circum-aural) pour réaliser l'expérimentation. La souris était nécessaire pour cliquer sur les boîtiers boutons qui s'affichaient à l'écran et qui permettaient aux participants d'indiquer leurs réponses (figure 5.2).

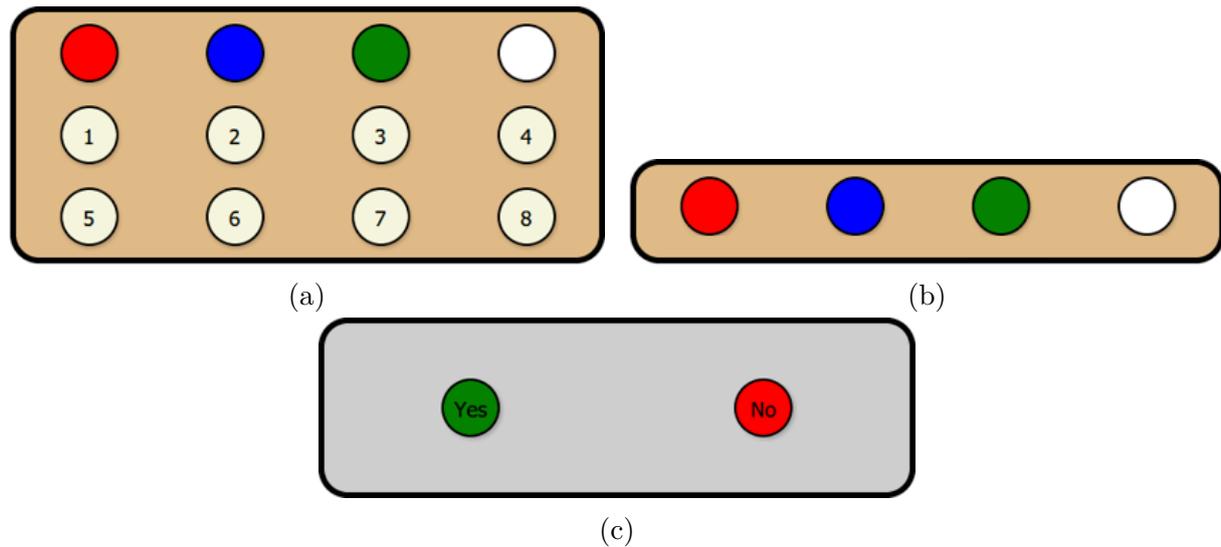


FIGURE 5.2 – Capture d’écran des boîtiers réponses présentés aux participants. En (a), le boîtier réponse utilisé pour indiquer la réponse couleur et chiffre aux phrases CRM lors de la phase d’entraînement. Durant la phase expérimentale, celui-ci ne comportait pas de bouton réponse pour les chiffres afin de ne pas induire les participants en erreur quant à la tâche à réaliser (b). En (c) le boîtier présenté aux participants après qu’ils ont répondu au dernier essai expérimental pour qu’ils indiquent s’ils avaient perçu ou non un son supplémentaire aux phrases CRM (le stimulus critique). Ce même boîtier était utilisé pour la tâche contrôle qui consistait uniquement à indiquer si, oui ou non, le stimulus critique, cette fois attendu, était présent dans l’essai.

5.2.3 Stimuli

Phrases CRM Les phrases utilisées dans la tâche N-back décrite ci-dessous étaient toutes des phrases du corpus CRM (Coordinate Measure Response Bolia *et coll.*, 2000). Celui-ci est disponible librement et utilisé pour des recherches en communications multilocuteurs. Ce corpus a été élaboré à partir de test d’intelligibilité de la parole développé pour la première fois par Moore (1981). La construction des phrases en anglais de ce corpus est toujours identique : « Ready [indicatif] go to [couleur] [chiffre] now ». L’indicatif indique à qui l’instruction est adressée parmi les 8 indicatifs suivants : « Arrow », « Baron », « Charlie », « Eagle », « Hopper », « Laker », « Ringo », « Tiger ». La couleur peut être l’une des quatre suivantes : « Blue », « Green », « Red », « White ». Le chiffre peut être compris entre 1 et 8. Un exemple de phrase peut être : « Ready Baron go to white five now ». 8 locuteurs (4 hommes et 4 femmes) prononcent les 256 phrases possibles conduisant à 2048 phrases au total pour le corpus. Seules les phrases prononcées par les 4 locuteurs hommes ont été utilisées, conduisant donc à un total de 1024 phrases dans le

corpus sélectionné.

Stimuli pour la tâche N-back Dans cette expérience, des phrases du corpus CRM ont été utilisées pour mettre au point une tâche N-back. En vue d'adapter la tâche N-back classique vers une version consistant à réaliser 3 fois consécutivement une tâche CRM, chaque essai de la tâche N-Back comprenait trois groupes successifs de trois phrases simultanées (figure 5.5). La durée séparant chacun des 3 groupes de 3 phrases était aléatoirement comprise entre 500 ms et 700 ms afin que le participant ne retire pas un quelconque indice de la périodicité de la présentation. Les 3 phrases de chacun des groupes étaient présentées de manière dichotique. Ainsi, pour chaque groupe, l'une des 3 phrases était émise dans l'oreille définie comme cible tandis que les deux autres phrases étaient émises dans l'oreille opposée définie comme l'oreille à ignorer. Au cours d'un essai, l'écoute comprenait donc au total de 3 phrases successives dans l'oreille cible et 3 groupes successifs de 2 phrases dans l'autre oreille, celle à ignorer. Parmi les phrases de l'oreille cible, une seule des 3 phrases était considérée comme la phrase cible de l'essai. Lors de la constitution de chacun des trois groupes de phrases d'un essai donné, les critères à respecter étaient les suivants :

- Le locuteur dédié à l'oreille cible et ceux dédiés à l'oreille à ignorer devaient rester constant entre les 3 groupes de 3 phrases d'un essai.
- L'identifiant tiré aléatoirement parmi les 8 possibles pour la phrase cible ne pouvait pas être réutilisé pour les autres phrases de l'essai.
- L'identifiant, la couleur et le chiffre de chacune des 3 phrases émises dans l'oreille cible devaient être différents pour un essai donné.
- De même, au sein d'un groupe de 3 phrases d'un essai, chacune des phrases possédait son propre identifiant, sa propre couleur et son propre chiffre.

Dans ces conditions, la phrase cible ne pouvait jamais partager son identifiant avec une autre phrase de l'oreille cible. En revanche, elle pouvait partager sa couleur et son chiffre avec l'une des phrases émises dans l'oreille à ignorer.

Enfin, le niveau RMS (*Root Mean Square*) du contenu de chacune des deux oreilles était égalisé. L'expérience se déroulant en ligne, il n'était pas possible de connaître le matériel des participants pour réaliser des égalisations en niveau sonore, l'égalisation en

RMS était donc le meilleur compromis pour obtenir des niveaux sonores similaires entre les deux oreilles.

Stimulus critique (CS) Ce stimulus était utilisé pour tester la surdité attentionnelle. La fréquence de ce son pur était de 110 ± 3 Hz, fréquence moyenne des voix masculines du corpus CRM décrit ci-dessus. Ce choix a été fait dans l'optique d'éviter un effet pop-out permettant la détection de ce stimulus sur la simple base de sa fréquence. La durée du son a été définie à 500 ms après une série de pré-tests visant à s'assurer qu'il reste détectable. Ces pré-tests ont aussi permis d'établir le niveau sonore du stimulus, ici aucun gain n'a été apporté à ce stimulus avant de le sommer au contenu de l'oreille de présentation qui pouvait être l'oreille cible ou l'oreille à ignorer. Le stimulus étant très court et préalablement ajusté pour générer un niveau sonore équivalent à celui des phrases du corpus CRM, il n'avait que peu d'impact sur la valeur RMS du contenu de l'oreille de présentation. Enfin, ce stimulus pouvait être rendu rugueux par l'ajout d'une modulation en amplitude (fréquence de modulation $f_{mod} = 70$ Hz et profondeur de modulation $m = 1$).

5.2.4 Procédure

Les participants qui se voyaient proposer l'expérience par le site Prolific avaient accès à une description sommaire de l'expérience et de ses objectifs. Ils étaient également informés de la nécessité d'avoir un casque. Ceux qui souhaitaient participer accédaient au site web de l'expérience hébergé sur Pavlovia en cliquant sur un lien renseigné dans Prolific lors de la création de l'expérience. Les participants pouvaient interrompre leur passation à tout moment. En revanche, si tel était le cas, il n'était pas possible de reprendre la passation. Une passation était décomposée en 7 grandes étapes détaillées ci-dessous pour une durée totale moyenne de 15 minutes.

Étape 1 : Information et consentement

En arrivant sur le site, une fiche d'explication détaillée du déroulement de l'expérience était présentée au participant, suivie d'une fiche de consentement. En vue de s'assurer à distance que les participants étaient bien en accord avec ce consentement, ceux-ci devaient cocher une case. Le bouton permettant d'accéder à la suite ne s'activait qu'à cette condition. Il n'était donc pas possible de poursuivre sans cocher cette case de consentement.

Étape 2 : Vérification de la bonne utilisation d'un casque

Afin de pouvoir vérifier à distance que les participants utilisaient bien un casque, ils commençaient l'expérimentation par la procédure mise au point par Woods *et coll.* (2017). Cette procédure consiste à émettre 3 sons purs à 200 Hz successifs (A, B, C) durant 1 s chacun. Le son A est alors atténué de 6 dB par rapport aux deux autres tandis que le son C voit son canal droit déphasé de 180°. Le participant doit alors indiquer le son qui lui semble le plus faible. Sans casque, l'opposition de phase entre les ondes émises par le haut-parleur gauche et les ondes émises par le haut-parleur droit les rend destructives l'une par rapport à l'autre. La pression acoustique générée est donc plus faible que dans le cas où les ondes sont en phase, comme c'est le cas pour les autres sons (figure 5.3). Au casque, les deux ondes ne se rencontrent pas. De fait, ce phénomène est inexistant lors d'une écoute au casque. Cette manipulation de la phase est donc à l'origine d'un phénomène physique atténuant le niveau sonore d'un son lorsqu'il n'est pas écouté au casque. En conséquence, si le participant utilise bien un casque, ce déphasage n'a pas d'incidence sur sa perception du son C qui lui semble donc être au même niveau sonore que B. Dans ce cas, c'est le son A qui lui paraîtra être le moins fort. En revanche, si le participant n'utilise pas de casque, il lui sera plus difficile d'évaluer quel son est le plus faible entre A et C. La procédure nécessite que le participant règle le niveau sonore à un niveau de confort et n'y touche plus ensuite. D'après l'étude de Woods *et coll.*, un minimum de 6 essais est alors nécessaire pour s'assurer que le participant porte bien un casque et qu'il ne doit pas ses bonnes réponses au hasard (figure 5.4). Ici, 6 essais étaient donc réalisés durant l'expérience en ligne, minimum requis conformément aux résultats obtenus par ces auteurs. Les participants ne réussissant pas ce test n'accédaient pas à la suite de l'expérience et étaient redirigés vers le site Prolific.

Étape 3 : Questionnaire

Les participants ayant validé l'étape de vérification de la bonne utilisation d'un casque devaient ensuite remplir un questionnaire visant à obtenir les informations suivantes : leur âge, leur genre (homme/femme), leur latéralité (gaucher/droitier), leur niveau de pratique musicale (aucune/amateur/professionnelle) et le type de casque audio utilisé (intra-auriculaire/supra-aural/circum-aural).

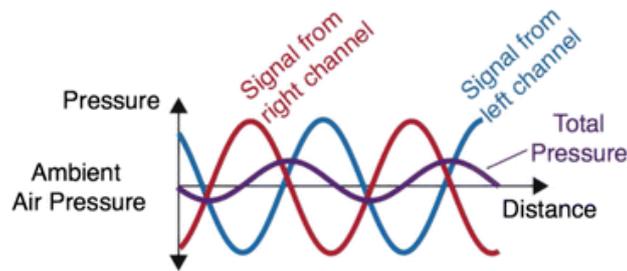


FIGURE 5.3 – Schéma de la pression acoustique générée par le son C dont l'un des deux canaux est en opposition de phase avec l'autre. L'onde issue du canal gauche et celle issue du canal droit sont donc destructives entre elles et la pression acoustique résultante est plus faible que celle générée par chacune des deux ondes prises séparément. (Figure tirée de l'article de Woods *et coll.*, 2017)

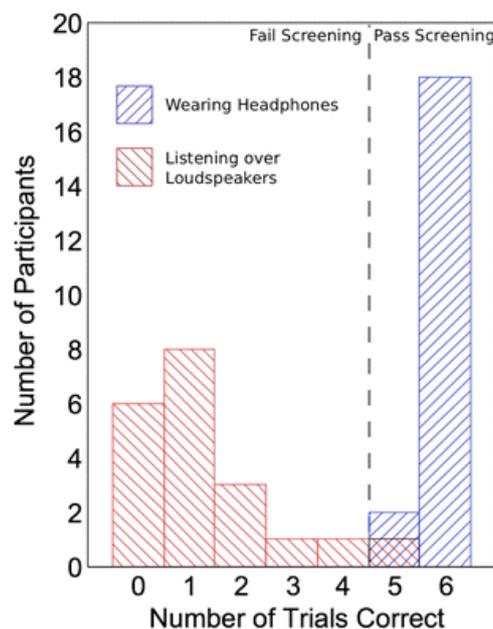


FIGURE 5.4 – Résultats expérimentaux obtenus par Woods *et coll.* (2017). Un minimum de 6 essais est nécessaire pour s'assurer que les participants portent bien un casque (Figure tirée de l'article de Woods *et coll.*).

Étape 4 : Détermination des conditions d'écoute

Avant de passer à l'étape suivante, les participants réalisaient une procédure de recherche de seuils d'audibilité telle que lors d'un audiogramme. De la même manière que lors d'un audiogramme classique, le participant devait répondre par un appui sur la barre espace à chaque son perçu. Pour chaque oreille, droite puis gauche, les sons étaient des bursts de 5 cycles de 300 ms composés de pulses aux fréquences 250, 500, 1000, 2000 et 4000 Hz. La procédure commençait par les fréquences de 1000 à 4000 Hz avant de terminer par celles allant de 1000 à 250 Hz. Un son détecté était de nouveau testé, atténué de 10 dB jusqu'à une limite de -60 dB par rapport au signal initial. Au contraire, un son

manqué était émis avec un gain de 5 dB jusqu'à 10 dB par rapport au signal initial. Étant donné qu'il était demandé aux participants de régler le volume à un confort d'écoute lors de l'étape 2, cette précaution évitait d'émettre un son à trop fort niveau pouvant détériorer l'audition du participant. La procédure pour une fréquence donnée prenait fin lorsqu'une détection suivait un son manqué afin de déterminer le seuil d'audibilité. Cette procédure était donc identique à celle réalisée par un audiomètre. Elle ne pouvait cependant pas être considérée comme un audiogramme classique renseignant sur l'audition du participant. En effet, cela aurait nécessité de connaître précisément le niveau sonore de départ lorsque les sons sont émis sans aucun gain ainsi que la bande passante de la chaîne d'émission qui peut influencer le signal émis en atténuant ou amplifiant certaines fréquences. De plus, pour renseigner sur l'audition du participant, il aurait aussi fallu pouvoir s'assurer qu'il réalise le test en condition de silence total. L'objectif de cette procédure était donc simplement de renseigner sur les sons perceptibles par un participant dans ses conditions d'écoute (bruits environnementaux, qualité de la chaîne d'émission sonore, etc.) et d'obtenir une approximation du profil auditif des participants.

Étape 5 : Familiarisation avec les phrases CRM

Les participants étaient ensuite familiarisés aux phrases du corpus CRM via la réalisation de 10 essais comprenant chacun une seule phrase et dont la tâche consistait à rapporter le chiffre et la couleur comme lors de la tâche CRM classique dans sa forme la plus simple.

Étape 6 : Phase de test

Une fois les étapes préliminaires réalisées, le participant passait à la phase de test qui comprenait un bloc expérimental de 12 essais et un bloc contrôle de 8 essais. Dans chaque bloc, la durée séparant 2 essais était comprise aléatoirement entre 250 *ms* et 2000 *ms* pour que le participant ne puisse s'aider du rythme de l'expérience.

Bloc expérimental La tâche N-back adaptée aux phrases CRM était la suivante : mémoriser l'identifiant et la couleur de chacune des 3 phrases successives de l'oreille cible tout en ignorant le contenu de l'autre oreille (figure 5.5). L'oreille cible pour un participant était attribuée aléatoirement en début d'expérience. À la fin d'un essai, le participant

devait rapporter la couleur associée à l'identifiant indiqué à l'écran en cliquant sur l'un des boutons du boîtier (figures 5.2b) affiché au-dessus de la question. La tâche N-back comprenait 3 conditions : $N = 0$, $N = 1$ et $N = 2$. Le participant pouvait donc être questionné à propos de l'un des 3 identifiants à retenir. Chaque condition était répétée 4 fois menant à un total de 12 essais. Avant cette phase expérimentale, un court entraînement de 3 essais à cette tâche était réalisée : un essai pour chaque valeur de N .

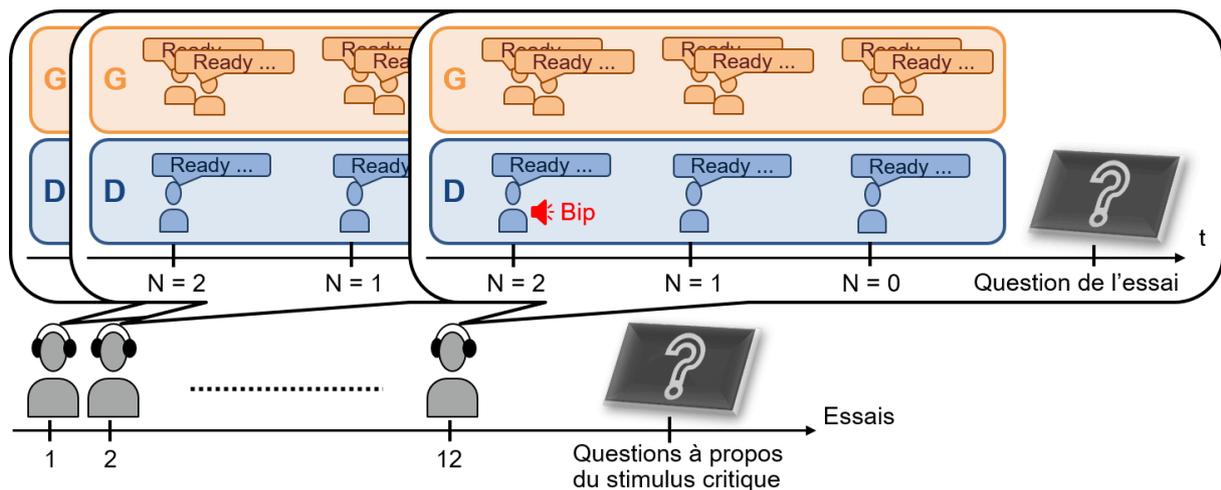


FIGURE 5.5 – Schéma du déroulement des 12 essais.

Après l'entraînement, les participants réalisaient les 12 essais expérimentaux de la phase de test et lors du dernier essai uniquement, un stimulus critique était émis dans l'un des 3 groupes de phrases tiré aléatoirement. Ce stimulus était émis à un moment aléatoire pendant l'émission de la phrase présentée dans l'oreille cible. Ce stimulus pouvait être rugueux ou non, menant ainsi à 4 conditions correspondant chacune à l'un des 4 groupes de participants :

1. Le stimulus critique était non rugueux et présenté dans l'oreille à ignorer.
2. Le stimulus critique était non rugueux et présenté dans l'oreille cible.
3. Le stimulus critique était rugueux et présenté dans l'oreille à ignorer.
4. Le stimulus critique était rugueux et présenté dans l'oreille cible.

À la fin de son dernier essai, après avoir effectué la tâche N-back, le participant recevait alors la question supplémentaire suivante : « Avez-vous entendu quelque chose en plus des phrases ? ». Une zone de texte apparaissant pour ceux ayant répondu « oui » afin qu'ils décrivent ce qu'ils avaient entendu. Ceci permettait de déterminer ceux qui avaient

vraiment entendu le stimulus critique et non pas un bruit autre quel qu'il soit provenant par exemple dans leur environnement tel qu'un bruit dans la rue.

Bloc contrôle Les essais du bloc contrôle étaient formés de manière identique à ceux du bloc expérimental : chacun comprenait donc 3 groupes successifs de 3 phrases CRM. En revanche, 4 des 8 essais de ce bloc comprenaient un stimulus critique. La tâche en contrôle consistait à détecter ce stimulus sans chercher à retenir les phrases prononcées. Celui-ci était présenté au participant au début du bloc via un bouton permettant au participant d'écouter ce son autant de fois qu'il le souhaitait pour se familiariser avec lui et savoir à quoi s'attendre concernant sa détection.

Étape 7 : Fin de la passation

À la fin du bloc contrôle, un écran indiquait aux participants de patienter durant le transfert des données de leur passation sur les serveurs de stockage de Pavlovia. Ils étaient ensuite informés de la réussite de la sauvegarde puis redirigés vers le site Prolific.

5.2.5 Analyse des données

Prétraitement du jeu de données (a) Lors de l'analyse, trois éléments ont été utilisés pour déterminer la validité des données reçues : le score de l'étape de vérification de la bonne utilisation d'un casque, la durée de l'expérience et son achèvement complet. Ainsi, s'il était déterminé que le participant ne portait pas de casque (ou n'était pas en mesure de répondre correctement à cette tâche), ses données étaient considérées invalides et n'étaient pas retenues pour l'analyse. De même, les données d'un participant dont la durée était inférieure au minimum de temps nécessaire pour réaliser l'expérience en entier n'étaient pas retenues pour l'analyse, la durée minimale ayant été déterminée au préalable par des pré-tests. Enfin, les données d'un participant qui ne terminait pas l'expérience n'étaient pas non plus retenues.

Prétraitement du jeu de données (b) Par ailleurs, les participants ayant eu un score de réussite à la tâche contrôle strictement inférieur à 75 % ont été exclus des analyses ultérieures concernant la surdité attentionnelle. En effet, dans leur cas, il n'aurait pas été possible d'interpréter un stimulus critique manqué comme de la surdité attentionnelle, si

la tâche contrôle indiquait qu'ils avaient des difficultés à le percevoir dans un contexte où ils s'attendaient à sa survenue après familiarisation avec lui.

Finalement, 178 participants (83 femmes et 95 hommes) de moyenne d'âge $26,07 \pm 5,88$ ans ont été retenus. La répartition pour chaque groupe est de :

1. 40 participants (19 femmes pour 21 hommes) de moyenne d'âge $27,42 \pm 5,89$ ans pour la présentation d'un stimulus critique non rugueux dans l'oreille à ignorer,
2. 47 participants (24 femmes pour 23 hommes) de moyenne d'âge $25,79 \pm 6,54$ ans pour la présentation d'un stimulus critique non rugueux dans l'oreille cible,
3. 43 participants (18 femmes pour 25 hommes) de moyenne d'âge $26,98 \pm 5,77$ ans pour la présentation d'un stimulus critique rugueux dans l'oreille à ignorer,
4. 48 participants (22 femmes pour 26 hommes) de moyenne d'âge $24,42 \pm 4,95$ ans pour la présentation d'un stimulus critique rugueux dans l'oreille cible.

Prétraitement du jeu de données (c) Le prétraitement des données a également consisté à convertir certains « oui » en « non » pour les réponses de détection du stimulus critique en phase expérimentale. Cette conversion se faisait sur la base de l'analyse verbale de leur commentaire au sujet de ce qu'ils avaient entendu en plus des phrases CRM.

Analyses statistiques

Dans un premier temps, les analyses statistiques visent à analyser les performances à la tâche N-back. La variable dépendante étudiée est le pourcentage de bonnes réponses pour la restitution de la couleur.

Le préalable est de tester avec une ANOVA si les facteurs suivants ont un effet sur cette performance à la tâche N-back :

- L'âge, considéré comme un facteur à deux modalités, avec coupure à la médiane sur l'ensemble des participants, les plus jeunes ($\text{âge} \leq 25$ ans) versus les moins jeunes ($\text{âge} > 26$ ans).
- Le genre (Femme versus Homme).
- La latéralité (Gaucher versus Droitier)

- La pratique musicale, considérée comme un facteur à deux modalités (oui versus non). Seulement 3 participants ont déclaré une pratique professionnelle, ce qui est insuffisant pour constituer un groupe séparé. Ces 3 participants ont donc été ajoutés au groupe des musiciens amateurs pour ne former qu'un seul groupe, qui sera comparé au groupe de ceux n'ayant aucune pratique musicale.
- Le type d'écouteurs utilisés à trois modalités (intra-auriculaire, supra-aural, circum-aural).

L'effet de la difficulté est ensuite analysé, à savoir la dégradation de la performance en fonction de la distance N-back. Chaque participant ayant réalisé les trois niveaux de difficulté, cette analyse est conduite avec une analyse de variance de type ANOVA à mesures répétées, chaque participant étant son propre témoin. En cas d'effet global significatif de la difficulté liée à la distance, des tests post hoc PLSD de Fisher sont réalisés pour tester deux à deux chacune des modalités de distances pour la mémorisation.

Dans un deuxième temps, les analyses sont menées sur la variable dépendante qui permet d'objectiver s'il y a eu surdité attentionnelle ou non, à savoir la proportion de participants ayant réussi la détection du stimulus critique, non-attendu, présent dans le dernier des 12 essais de la tâche N-back.

Comme précédemment, le préalable est de tester les éventuels effets de l'âge, du genre, de la latéralité, du niveau de pratique musicale et du type d'écouteurs sur cette proportion de participants ayant détecté ou non le stimulus critique. Pour cela, des tests de lien entre les proportions, à savoir des tests du χ^2 ou des tests exacts de Fisher sont réalisés.

L'effet de la position du stimulus critique au sein de l'essai, à savoir dans la première ou deuxième ou troisième phrase, sur la proportion de détection du stimulus critique, est testé grâce à un test de lien entre les proportions.

L'effet de l'oreille de présentation, cible ou à ignorer vis-à-vis de la tâche N-back, sur la proportion de détection du stimulus critique, est testé par un test de lien entre les proportions.

L'effet de la rugosité du stimulus à deux modalités, rugueux ou non rugueux, sur la proportion de détection du stimulus critique, est testé par un test de lien entre les proportions.

Un éventuel effet d'interaction est recherché entre la présence de rugosité dans le stimulus critique et l'oreille de présentation, vis-à-vis de la détection du stimulus. Des tests de proportions sont menés pour savoir si l'effet éventuel de la rugosité est le même en fonction de l'oreille cible. Symétriquement, des tests de proportion sont menés pour tester si l'effet éventuel de l'oreille d'écoute, cible ou à ignorer, est le même, que le son soit rugueux ou non.

L'effet de la difficulté à la tâche N-back sur la proportion de détection du stimulus critique est testé avec un test de lien entre les proportions.

L'effet visé dans cette expérience, c'est-à-dire celui du lien pour un participant donné entre sa propre performance à la tâche N-back et sa détection réussie ou non du stimulus critique est étudié de la manière suivante. Les participants sont répartis dans deux groupes au vu de leurs performances à la tâche N-back. Une coupure à la médiane, pour équilibrer les effectifs, à partir de la performance à la tâche N-back, donne 2 modalités possibles pour chaque participant, appartenir au groupe des meilleures performances à la tâche N-back ou appartenir au groupe des moins bons. Un tableau à 4 cases de données appariées est ainsi obtenu, contenant l'effectif des participants ayant une meilleure performance à la tâche N-back et ayant détecté le stimulus critique, l'effectif des participants ayant une meilleure performance à la tâche N-back mais n'ayant pas détecté le stimulus critique, l'effectif des participants ayant obtenu une moins bonne performance à la tâche N-back ayant détecté le stimulus critique et l'effectif des participants ayant une moins bonne performance à la tâche N-back n'ayant pas détecté le stimulus critique. Un test de proportion sur données appariées de McNemar (Schwartz, 1963) est réalisé.

Dans un troisième et dernier temps, des analyses portent sur les seuils d'audibilité, de l'oreille gauche, de l'oreille droite et de la moyenne sur les deux oreilles. Pour chacune de ces trois variables, une coupure à la médiane est réalisée afin d'obtenir deux groupes de participants équilibrés en effectifs, ceux ayant la meilleure acuité auditive et ceux ayant

la moins bonne.

Une ANOVA teste un lien éventuel entre les bons résultats des participants à la procédure de recherche de seuils d'audibilité et leur performance à la tâche N-back.

Un test de χ^2 évalue un lien éventuel entre les participants ayant de bons résultats à la procédure de recherche de seuils d'audibilité et les participants ayant détecté le stimulus critique.

Une analyse MANOVA en prenant en compte les deux variables dépendantes « seuils d'audibilité oreille gauche » et « seuils d'audibilité oreille droite » teste si une différence existe entre les participants inclus et exclus sur la base de leur détection du stimulus critique attendu lors de la tâche contrôle. Pour rappel, l'inclusion nécessitait un score minimum de 75 % de détection dans cette tâche.

Vérifications des conditions d'application des différents tests :

- Pour toutes les analyses de variance, les conditions de normalité et d'homogénéité de la variance pour l'ensemble des groupes testés sont vérifiées. En cas de non-conformité à ces conditions d'application, une analyse statistique non paramétrique équivalente est menée.
- Pour les analyses de variance à mesure répétées, les conditions de sphéricité sont vérifiées. En cas de non-conformité, une correction de Grenhouse-Geiser est apportée pour corriger l'écart à la sphéricité au travers d'un ajustement des degrés de liberté.
- Concernant les tests de liens, des tests de χ^2 sont utilisés. La condition d'application à respecter consiste à avoir un minimum de 5 pour chacun des effectifs théoriques attendus, à savoir les effectifs en cas d'absence de lien entre les variables testées. Dans le cas contraire, un test exact de Fisher, ne nécessitant pas d'effectifs théoriques minimum, est réalisé.

Une valeur de $p < 0,05$ sera considérée comme significative.

Les analyses statistiques sont réalisées grâce au logiciel Statistica (TIBCO®).

5.3 Résultats

5.3.1 Tâche N-back

Effet de l'âge, du genre, de la latéralité, de la pratique musicale ou du type d'écouteurs utilisé Aucun effet significatif de ces différentes variables n'est observé sur la performance à la tâche N-back, ni aucun effet d'interaction, à savoir que l'effet de la distance N reste le même selon les modalités de ces facteurs.

Effet de la distance N sur la performance de restitution de la couleur de la phrase cible Un effet significatif de la distance N est observé sur la performance de restitution de la couleur de la phrase cible ($F(2, 354) = 163,23$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,48$) : augmenter la distance N qui sépare la question de la couleur cible diminue la performance au report de cette cible (figure 5.6).

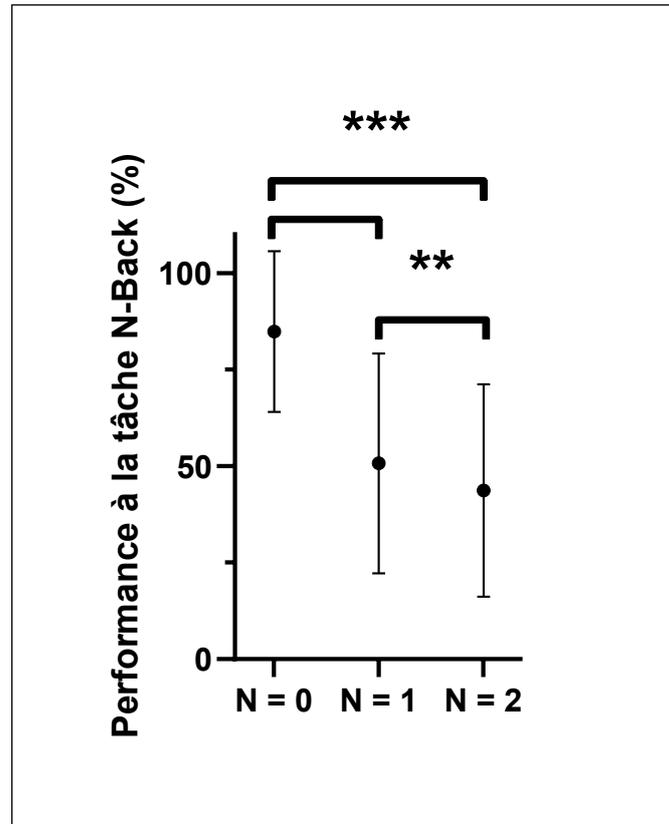


FIGURE 5.6 – Performance à la tâche N-Back en fonction de N . L'augmentation de N entraîne une baisse significative de la performance à cette tâche.

5.3.2 Tâche de détection du stimulus critique

Sur les 178 participants, 139 n'ont pas entendu le stimulus critique soit 78,1%. Ceci peut être attribué à de la surdité attentionnelle puisque ces participants avaient détecté ce même stimulus lors de la tâche contrôle dans laquelle ils devaient focaliser leur attention uniquement sur le stimulus critique sans avoir à réaliser une autre tâche.

Effet de l'âge, du genre, de la latéralité, de la pratique musicale ou du type d'écouteurs utilisé Aucun effet significatif de l'âge, du genre, de la latéralité ou du type d'écouteurs utilisé n'est observé sur la performance   la tâche de détection. En revanche, un effet significatif ($\chi^2(1) = 3,97$; $p = 0,046$) du niveau de pratique musicale est observé en faveur des personnes ayant une pratique musicale en tant qu'amateur ou professionnel sur la performance   la tâche de détection du stimulus critique (tableau 5.1).

	Aucune	Amateur	Professionnel	Total
DéTECTÉS	14 (15,73 %)	22 (25,58 %)	3 (100 %)	39
Manqués	75 (84,27 %)	64 (74,42 %)	0 (0 %)	139
Total	89	86	3	178

Tableau 5.1 – Effectifs de détection ou non du stimulus critique en fonction du niveau de pratique musicale

Effet de la position du stimulus critique au sein de l'essai L'effet de la position du stimulus critique au sein de l'essai, à savoir, dans le premier, deuxième ou troisième groupe de phrases d'un essai donné, n'a pas d'effet sur sa détection.

Effet du côté de présentation Un effet significatif du côté de présentation sur la performance à la détection du stimulus critique est observé ($\chi^2(1) = 22,94; p < 0,001$) en faveur d'une meilleure détection lors d'une présentation dans l'oreille cible. Dans l'oreille cible, le stimulus critique est détecté dans 35,79 % des cas (34/95) contre 6,02 % des cas (5/83) dans l'oreille à ignorer (figure 5.7).

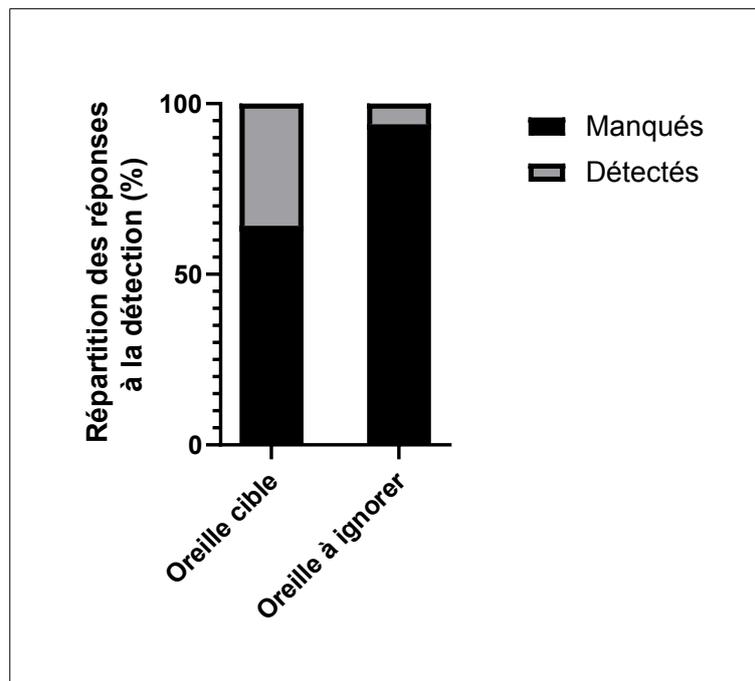


FIGURE 5.7 – Répartition des réponses à la détection en pourcentage en fonction du côté de présentation du stimulus critique. Un avantage significatif est observé pour la détection de stimuli critiques émis dans l'oreille cible.

Effet de la rugosité Aucun effet significatif de la rugosité n'est mis en évidence. Lorsque le stimulus critique comportait de la rugosité, il était détecté dans 23,08 % des

cas (21/91) contre 20,69 % des cas lorsqu'il était non rugueux (18/87). Cependant, la question se pose de l'effet de la rugosité même faible pour améliorer éventuellement le nombre de détections dans le cas d'une présentation dans l'oreille à ignorer pour laquelle on a montré un nombre de détections significativement inférieur vis-à-vis de l'oreille cible.

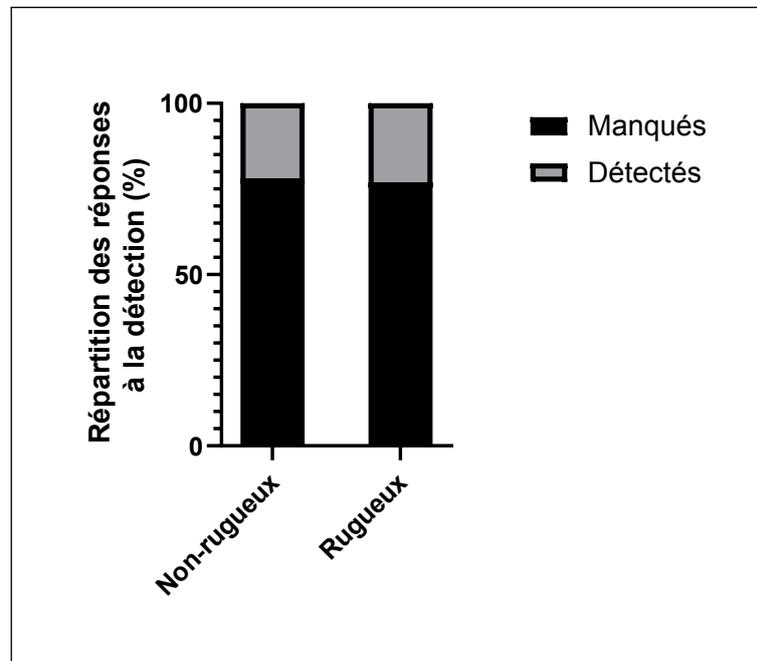


FIGURE 5.8 – Répartition des réponses à la détection en pourcentage en fonction du côté de présentation du stimulus critique. Aucun effet significatif de la rugosité n'est observé.

Effet d'interaction entre la rugosité et l'oreille de présentation Lorsque le stimulus critique était présenté dans l'oreille cible, aucune influence de la rugosité sur sa détection n'est observée, 36,17 % de détection pour un stimulus critique non rugueux (17/47) contre 35,42 % pour un stimulus critique rugueux (17/48) (figure 5.9). Concernant l'oreille à ignorer, il n'y a pas non plus d'effet significatif observé sur la détection du stimulus critique, mais une très légère tendance est observée en faveur de la détection de stimulus critiques rugueux, à savoir 2,50 % pour un stimulus critique non rugueux (1/40) contre 9,30 % pour un stimulus critique rugueux (4/43).

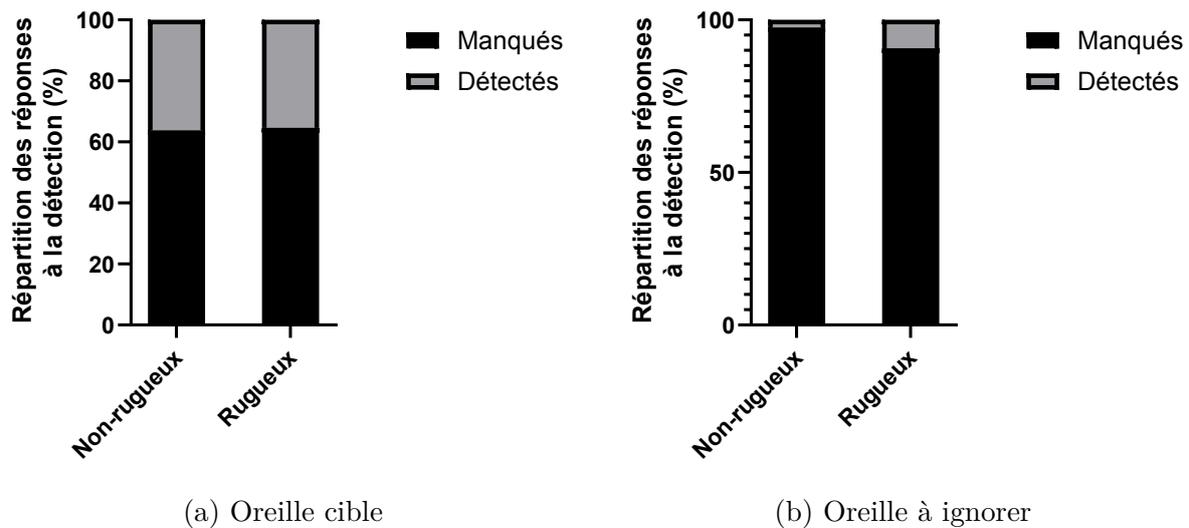


FIGURE 5.9 – Pourcentage de répartition des réponses à la détection du stimulus critique inattendu lors du dernier essai expérimental en fonction de la présence de rugosité pour l’oreille cible (a) et l’oreille à ignorer (b). Aucun effet de la présence de rugosité n’est observé, que ce soit lorsque le stimulus critique est émis du côté de la cible ou du côté à ignorer. Cependant, lors d’une présentation du côté à ignorer, il semble y avoir une légère tendance à l’avantage de la détection d’un son rugueux.

Parallèlement, l’effet de l’oreille de présentation est étudié pour un stimulus critique non rugueux puis rugueux (figure 5.10). Lors de la présentation d’un stimulus critique non rugueux, l’effet significatif de l’oreille de présentation en faveur d’une meilleure performance de détection pour l’oreille cible est confirmé ($\chi^2(1) = 14,93$; $p < 0,001$) avec 36,17 % de détection pour l’oreille cible (17/47) contre 2,5 % pour l’oreille à ignorer (1/40).

De même, lors de la présentation d’un stimulus critique rugueux, l’effet significatif de l’oreille de présentation en faveur d’une meilleure performance de détection pour l’oreille cible est également confirmé ($\chi^2(1) = 8,71$; $p < 0,01$) avec 35,42 % de détection pour l’oreille cible (17/48) contre 9,30 % pour l’oreille à ignorer (4/43).

Il y a donc toujours un plus grand niveau de surdité attentionnelle lorsque le stimulus critique se trouve dans l’oreille à ignorer plutôt que dans l’oreille cible, que le stimulus critique présente ou non de la rugosité.

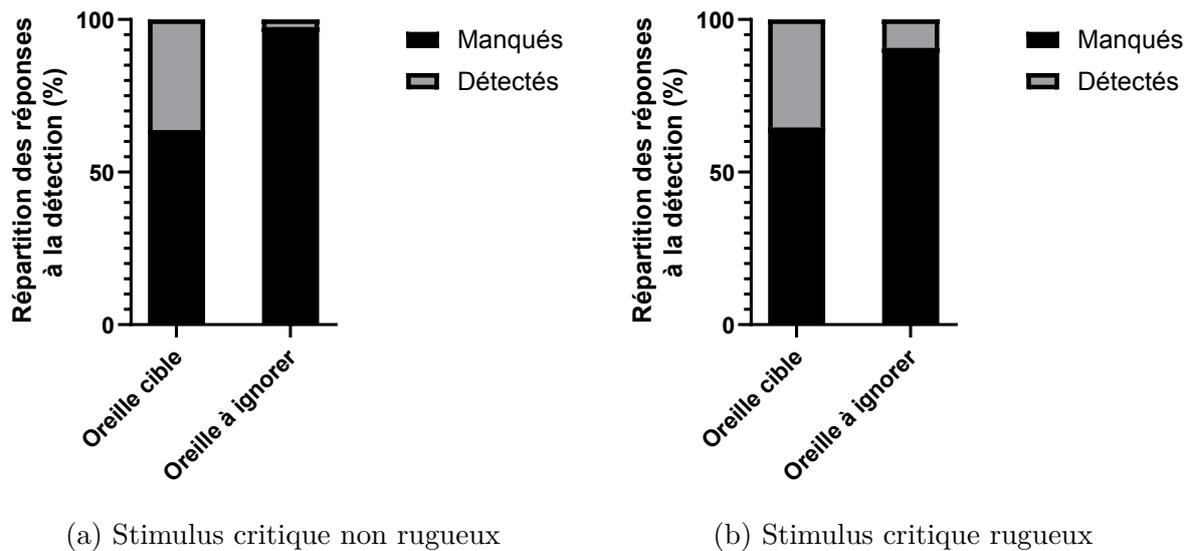


FIGURE 5.10 – Pourcentage de répartition des réponses à la détection du stimulus critique inattendu lors du dernier essai expérimental en fonction du côté de présentation pour un stimulus critique non rugueux (a) et rugueux (b). Dans les deux cas, un effet significatif du côté de présentation est observé en faveur de la détection d’un stimulus inattendu lorsqu’il est présenté du même côté que les cibles.

5.3.3 Lien entre les performances de la tâche N-back et de la tâche de détection du stimulus critique

Les 178 participants sont répartis en 2 groupes définis comme « les plus performants à la tâche N-back » ou « les moins performants à la tâche N-back », à partir de la coupure à la médiane de la variable de performance à la tâche N-back. Par ailleurs, pour chaque participant, sa réponse pour la détection « oui » ou « non » est comptabilisée dans le tableau 5.2.

	Participants les plus performants à la tâche N-back	Participants les moins performants à la tâche N-back	Total
Détection Réussie	18	21 (B)	39
Détection Manquée	74 (A)	65	139
Total	92	86	178

Tableau 5.2 – Effectifs observés pour la détection du stimulus critique en fonction du groupe d’appartenance des participants concernant la performance à la tâche N-back

La proportion des participants ayant détecté le stimulus critique parmi le groupe le plus performant à la tâche N-back est de 19,57 % (18/92) et est de 24,42 % (21/86) pour le groupe le moins performant à la tâche N-back.

La détection du stimulus critique est significativement meilleure pour le groupe qui a la moindre performance à la tâche N-back ($K = \frac{(A-B)^2}{A+B} = \frac{(74-21)^2}{74+21} = 29,56$, K suit une loi de χ^2 à 1 degré de liberté, $p < 0,001$).

5.3.4 Analyses complémentaires en lien avec les seuils d'audibilité

Le recueil des seuils d'audibilité concernant l'oreille gauche, l'oreille droite ainsi que la moyenne des deux oreilles a permis de constituer des groupes de « meilleurs seuils d'audibilité » ou « moins bons seuils d'audibilité » pour ces trois catégories de seuils d'audibilité grâce à une coupure à la médiane pour chacun.

Oreille droite :

- groupe de meilleurs seuils d'audibilité de -60 à -35 dB d'atténuation du signal² ($N = 87$),
- groupe de moins bons seuils d'audibilité de -34 dB d'atténuation du signal à 14 dB de gain ($N = 91$).

Oreille gauche :

- groupe de meilleurs seuils d'audibilité de -60 à -22 dB d'atténuation du signal ($N = 84$),
- groupe de moins bons seuils d'audibilité de -21 dB d'atténuation du signal à 12 dB de gain ($N = 94$).

Concernant la moyenne sur les deux oreilles :

- groupe de meilleurs seuils d'audibilité de -60 à -29 dB d'atténuation du signal ($N = 88$),

2. Classiquement, les audiogrammes s'expriment en dB(HL) cependant, ceux-ci nécessitent de connaître le niveau de référence, à savoir celui auquel est émis le premier son pour chaque fréquence lors de la réalisation de l'audiogramme. Or, ce niveau de référence n'est pas connu ici puisque l'expérience se déroule en ligne. C'est donc le gain ou l'atténuation appliquée aux stimuli qui sont exprimés ici.

- groupe de moins bons seuils d'audibilité de -28 dB d'atténuation du signal à 13 dB de gain ($N = 90$).

Effet sur la tâche N-back Cette analyse a montré qu'il n'y avait pas de différence significative concernant la performance à la tâche N-back en fonction du groupe de meilleurs ou moins bons seuils d'audibilité pour l'oreille droite. En revanche, un effet significatif (ANOVA à mesures répétées $F(1,176) = 4,97$; $p = 0,03$) est trouvé dans le sens d'une meilleure performance à la tâche N-back pour les participants du groupe ayant de meilleurs seuils d'audibilité pour l'oreille gauche 5.11. Cet effet significatif concernant la performance à la tâche N-back disparaît lorsque les groupes de meilleurs ou moins bons seuils d'audibilité concernent la moyenne pour les deux oreilles.

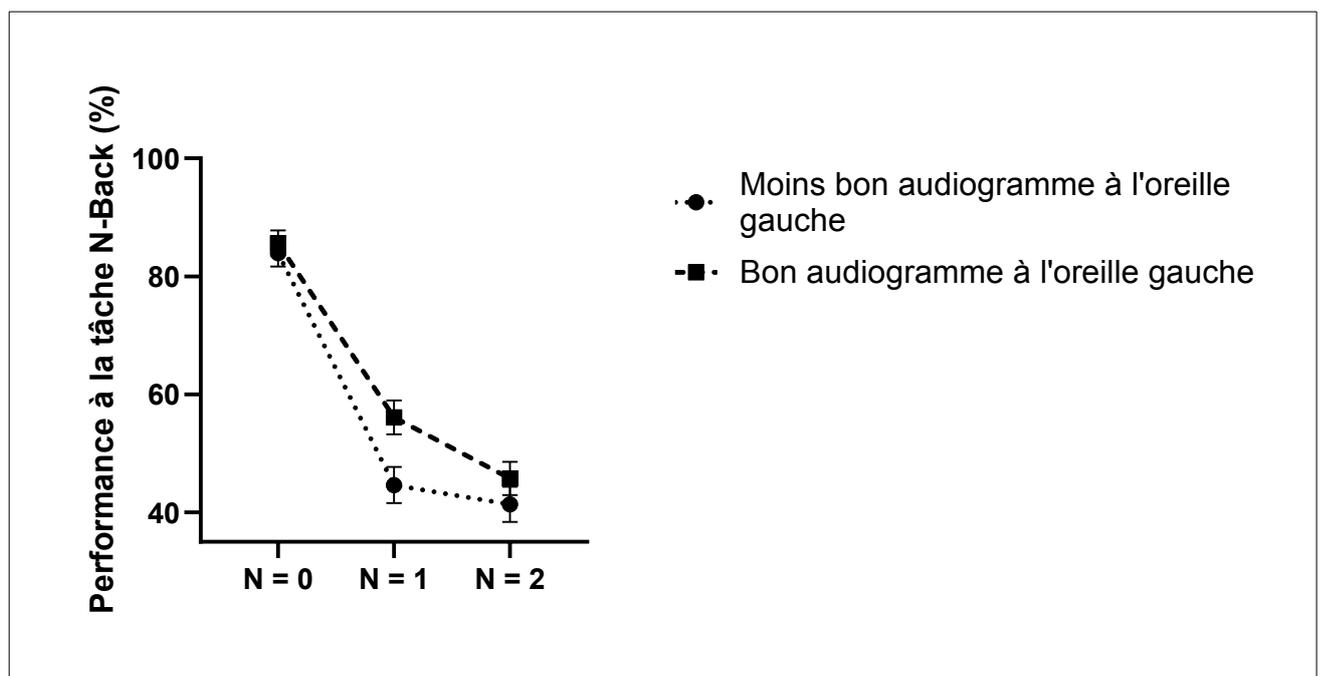


FIGURE 5.11 – Lien entre les seuils d'audibilité de l'oreille gauche et la performance à la tâche N-back. Une meilleure performance pour la tâche N-back est observée pour les participants ayant de meilleurs seuils d'audibilité à l'oreille gauche (sur le graphique : « Bon audiogramme à l'oreille gauche »).

Effet sur la détection du stimulus critique Cette analyse a montré qu'il n'y pas de différence significative concernant la détection du stimulus critique en fonction du groupe de meilleurs ou moins bons seuils d'audibilité concernant l'oreille droite, gauche ou les deux oreilles moyennées.

Lien avec l'inclusion des participants sur la base de leur réussite à la tâche contrôle Les 178 participants ayant eu un score minimum de 75 % de détection du stimulus critique attendu (tâche contrôle) ont été inclus dans l'expérimentation. Leur performance à la procédure de recherche de seuils d'audibilité oreille droite et oreille gauche est significativement meilleure (MANOVA de Wilks, $F(2,214) = 4,50$, $p < 0,05$) que celle des participants ($N = 39$) n'ayant pas réalisé ce niveau de détection de 75 % à la tâche contrôle et ayant été pour cela exclus (figure 5.12).

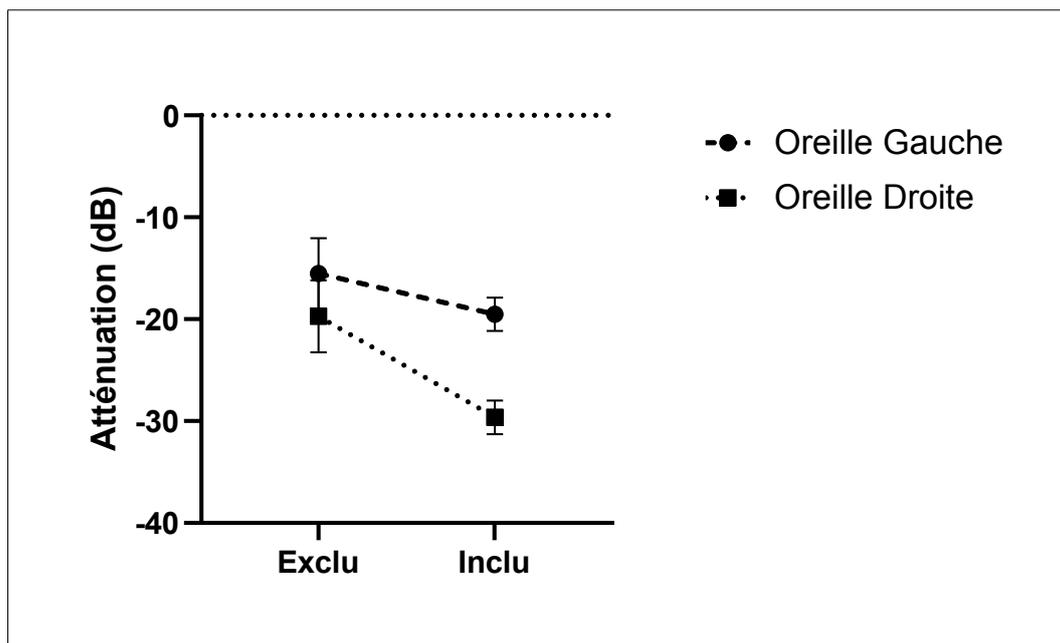


FIGURE 5.12 – Effet significatif de la performance à la procédure de recherche de seuils d'audibilité concernant l'inclusion ou l'exclusion des participants sur le critère d'un minimum de 75 % de réussite à la tâche contrôle de détection du stimulus critique attendu

5.4 Discussion

5.4.1 Tâche N-back

L'âge des participants étant compris entre 18 et 40 ans, aucune perte cognitive n'était attendue. Par conséquent, aucun lien entre l'âge et la performance à la tâche N-back n'était attendu. De plus, ceci est appuyé par l'étude de Gonçalves et Mansur (2009) qui rapporte n'observer aucun effet de l'âge en comparant deux groupes de participants de moyenne d'âge respective de 37 et 67 ans. L'analyse statistique a bien permis de vérifier que l'âge n'avait aucun effet significatif sur la performance à la tâche N-back ici.

Aucun effet significatif n'était attendu du genre du participant ou de sa latéralité (droitier ou gaucher) sur la réalisation de la tâche N-back, celle-ci impliquant la mémorisation de stimuli auditifs plutôt que leur détection ou reconnaissance. L'analyse statistique a confirmé qu'il n'y avait aucun effet significatif de ces deux variables sur la tâche N-back.

Concernant l'effet de la pratique musicale, aucun effet significatif sur la tâche N-back n'a été rapporté. Ceci s'oppose aux résultats de Pallesen *et coll.* (2010) qui mettent en évidence un avantage à la tâche N-back pour des musiciens par rapport à des non-musiciens. Cependant, la tâche N-back utilisée dans leur étude nécessitait la mémorisation d'accords musicaux. Dans leur cas, un haut niveau de pratique musicale pouvait donc être à l'origine d'un avantage. Ici, les stimuli à retenir étaient vocaux, il ne semble donc pas que le niveau de pratique musicale puisse influencer la performance à la tâche de mémorisation.

Comme attendu, aucun effet du type d'écouteurs n'a été mis en évidence. Les stimuli utilisés se trouvaient tous dans la bande de fréquence de la voix, ils correspondaient donc aux types de sons pour lesquels les écouteurs sont généralement prévus dans le cadre d'une utilisation plus classique.

L'effet significatif observé de la distance N qui sépare l'élément cible de la question était attendu. En effet, Amon et Bertenthal (2018) démontrent que des participants réalisant une tâche N-back durant laquelle ils doivent mémoriser des lettres prononcées voient leur performance décliner lorsque N augmente. Il est donc, logiquement, plus difficile de se souvenir d'un élément plus ancien que d'un élément récent. Effectivement ici, la performance à la tâche N-back était d'environ 85 % de réponses correctes en $N=0$ puis elle chutait à 51 % en $N=1$ et 44% en $N=2$. Retrouver cet effet significatif ici entre les deux conditions $N=0$ et $N=1$ et entre les deux conditions $N=1$ et $N=2$ permet d'une part de valider l'efficacité et, d'autre part, la bonne réalisation de la tâche N-back.

5.4.2 Détection du stimulus critique

Aucun effet de l'âge, du genre, de la latéralité ou du type d'écouteurs n'était attendu. Ceci a bien été confirmé par l'analyse statistique.

Un avantage à la détection pour les participants ayant une pratique musicale a été observé ici. L'étude de Koreimann *et coll.* (2014) a mis en évidence que pour des participants musiciens, le niveau de surdité attentionnelle était plus faible que pour des non-musiciens. Cependant, le stimulus critique dans l'étude de Koreimann *et coll.* était un son d'instrument alors qu'ici le stimulus critique était un son complexe très différent, la raison de cet avantage n'est donc pas clairement définie.

Le résultat le plus important de cette étude est la forte proportion de surdité attentionnelle qu'elle met en évidence. En effet, 78,1 % des participants ayant détecté le stimulus critique dans 75 % des essais contrôle ont manqué le stimulus critique lors du dernier essai de la tâche expérimentale. Ceci vient donc directement confirmer l'hypothèse qu'un protocole permettant de générer une forte charge perceptive tout en s'assurant que le stimulus critique reste réellement inattendu, comme c'était le cas dans cette expérience, soit en mesure de mettre en évidence un lien entre tâche auditive et surdité attentionnelle. Cette observation s'oppose aux résultats expérimentaux des études de Gomes *et coll.* (2008) et Murphy *et coll.* (2013) qui ne mettent en évidence aucun effet de la charge perceptive sur le niveau de surdité attentionnelle engendré. Concernant la première de ces deux études, comme l'indique Fairnie *et coll.* (2016), ces résultats peuvent s'expliquer. Dans leur étude, Gomes *et coll.* (2008) font varier la charge auditive avec le temps inter-stimulus. Pourtant, Bregman (1990) indique qu'une diminution du temps inter-stimulus peut conduire à une amélioration des processus de ségrégation auditive, à l'origine de la séparation des sources sonores. De fait, la diminution du temps inter-stimulus peut engendrer une facilité venant contrebalancer l'effet de la hausse de charge perceptive et rendre impossible la mise en évidence d'un lien entre cette hausse et le niveau de surdité attentionnelle observé. En ce qui concerne l'étude de Murphy *et coll.*, dans toutes les conditions, le stimulus critique était présenté seul dans un canal à ignorer. En conséquence, celui-ci n'a pas pu être groupé avec le reste des stimuli à ignorer comme c'était le cas dans l'étude de Dalton et Fraenkel (2012) par exemple. De fait, présenté seul, le stimulus critique a pu être avantagé par sa

séparation spatiale du reste des stimuli. En effet, sous certaines conditions, la séparation spatiale de sources sonores pourrait abaisser le niveau de charge cognitive (Xia *et coll.*, 2015; Andéol *et coll.*, 2017). Prises ensemble, ces observations mènent à penser que dans l'étude de Murphy *et coll.* la charge cognitive ait été réduite par la séparation des stimuli. D'après la théorie de Lavie (2005) appuyée par les résultats de Francis (2010) cette baisse de charge cognitive devrait être à l'origine d'un fort niveau de surdité attentionnelle. Cependant, dans l'étude de Murphy *et coll.* ceci a pu être contrebalancé par la présentation isolée du stimulus critique menant à un effet *pop-out* (Rensink, 2009) rendant le stimulus bien trop saillant pour être manqué. De plus, les études menées par les équipes de l'Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE-SUPAERO Dehais *et coll.*, 2012, 2014, 2016, 2019; Durantin *et coll.*, 2017; Giraudet *et coll.*, 2015; Callan *et coll.*, 2018) ont toutes mises en évidence de la surdité attentionnelle lors de scénarios de vol complexes mettant en jeu à la fois un fort niveau de charge perceptive, mais aussi cognitive. La hausse de charge cognitive ne semble donc pas toujours profiter au traitement d'un stimulus critique.

L'effet du côté de présentation à l'avantage de la détection lors d'une présentation dans l'oreille cible mis en évidence par l'analyse statistique était attendu. D'une part, les expériences de (Posner, 1980) sur l'attention spatiale indiquaient effectivement un niveau de traitement plus élevé pour un distracteur proche de sa cible. Aussi, cela semble en accord avec les résultats expérimentaux de l'expérience de Simons et Chabris (1999) en vision ou Dalton et Fraenkel (2012) en audition qui mettent en évidence qu'un stimulus critique partageant plus de caractéristiques avec les stimuli à ignorer a plus de risque d'être manqué. A l'opposé, un stimulus présentant plus de caractéristique avec les cibles a plus de chance d'être perqu . Or, ici, la localisation était la caractéristique qui définissait la cible par rapport aux autres stimuli à ignorer. Selon l'oreille de présentation, le stimulus critique partageait donc cette caractéristique déterminante de localisation avec celles des stimuli cible ou à ignorer.

L'effet attendu de la rugosité sur la détection n'a pas été mis en évidence lors de cette expérience lorsque les détections réalisées dans les deux oreilles étaient moyennées. En revanche, une tendance apparaît lorsque l'interaction entre effet de rugosité et oreille de présentation est étudiée pour déterminer si la présence de rugosité a pu être à l'origine d'un

avantage à la détection dans l'une des deux oreilles (cible ou à ignorer). Cette tendance n'est pas significative, mais pointe vers une meilleure détection des sons rugueux que des sons non rugueux lorsqu'ils sont présentés dans l'oreille à ignorer. Il serait donc nécessaire d'augmenter le nombre de participants pour déterminer si cet avantage se confirme statistiquement ou non. Si l'effet se confirmait, celui-ci est peut-être faible et n'apporte qu'un léger avantage. Ce qui expliquerait qu'il ne s'observe pas lors d'une présentation dans l'oreille cible qui est déjà elle-même très avantageuse. Dans le cas où l'effet se confirmerait, une autre explication possible de l'absence d'effet dans l'oreille cible est qu'un palier de détection soit déjà atteint, la rugosité ne pouvant donc pas améliorer encore ce niveau de détection.

Le groupe de phrases dans lequel apparaissait le stimulus critique (le premier, le second ou le troisième) n'a pas eu d'effet sur sa détection. Ce qui s'explique notamment par l'absence d'effet d'interaction de la tâche N-back et de la tâche de détection. De plus, la littérature rapporte qu'aucun effet de la charge cognitive due à une tâche de mémorisation n'ait été mise en évidence (Bredemeier et Simons, 2012 ; Beanland et Chan, 2016 ; Kreitz *et coll.*, 2016b). Ici, cependant, le protocole ne permet pas de vérifier ou non l'effet d'une variation de charge cognitive. Effectivement, le niveau charge cognitive est bien variable en étant plus ou moins forte au moment de la question, lorsque le participant doit rapporter une information (couleur) plus ou moins éloignée. En revanche, au moment où le stimulus critique est émis, le participant ne sait pas encore sur laquelle phrases des 3 phrases émises dans l'oreille cible il sera questionné. De ce point de vue, que la question porte sur l'élément en $N=0, 1$ ou 2 , le participant doit malgré tout retenir les 3 informations à chaque essai et son niveau de charge cognitive au moment de la présentation du stimulus critique est donc identique quel que soit N . Malgré tout, cette modification a eu un intérêt majeur ici en obligeant le participant à focaliser constamment son attention sur la tâche N-back, laissant peu d'opportunité à des fuites d'attention qui auraient pu profiter à la détection du stimulus critique (Yantis et Johnston, 1990).

5.4.3 Seuils d'audibilité

Aucun lien significatif n'a pu être établi entre les seuils d'audibilité et les performances relevées à la tâche N-back lorsque les seuils d'audibilité obtenus pour les deux oreilles

étaient moyennées. En revanche, en analysant les seuils d'audibilité de chaque oreille pris seuls, de moins bons seuils d'audibilité à l'oreille gauche ont été reliés à une moins bonne performance à la tâche N-back. Cependant, cet effet peut être considéré comme un artéfact dû au hasard puisqu'il n'est pas confirmé du côté droit.

Aucun lien significatif n'a pu être établi non plus entre les seuils d'audibilité et le niveau de surdité attentionnelle. Que les participants possèdent de « bons » seuils d'audibilité ou de « mauvais » seuils d'audibilité n'a pas influencé la détection. Ceci peut s'expliquer par le fait que le stimulus critique était situé dans une zone de fréquence où les pertes auditives sont rares dans cette population.

En revanche, l'intérêt de la procédure de recherche de seuils d'audibilité se révèle en comparant les participants des classes « bons » ou « mauvais » seuils d'audibilité avec les participants des classes « inclus » ou « exclus ». En effet, les participants ayant de « mauvais » seuils d'audibilité étaient généralement ceux qui se voyaient être exclus de l'analyse statistique du niveau de surdité attentionnelle en raison d'un trop faible score à la tâche contrôle. Pour rappel, un participant était exclu de l'analyse statistique du niveau de surdité attentionnelle lorsqu'il ne réussissait pas à obtenir un minimum de 75 % de détection dans la tâche contrôle. Les résultats à la procédure de recherche de seuils d'audibilité viennent donc appuyer les résultats d'inclusion/exclusion des sujets sur la base de leur tâche contrôle. Ceci étant nécessaire pour pouvoir statuer par la suite si un stimulus critique manqué lors du dernier essai expérimental pouvait être imputé à de la surdité attentionnelle.

5.5 Conclusion

Cette expérience a permis de mettre en évidence qu'il est possible qu'une tâche auditive soit source de surdité attentionnelle sous certaines conditions.

La première condition nécessaire semble être un fort niveau de charge cognitive et/ou perceptive, comme c'est le cas ici où beaucoup de stimuli sont présents dans un même essai et où la tâche N-back vient encore augmenter le niveau de charge. Cette observation corrobore les résultats des expériences menées, entre autres, par les équipes de l'Institut

Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE-SUPAERO Dehais *et coll.*, 2012, 2014, 2016, 2019 ; Durantin *et coll.*, 2017 ; Giraudet *et coll.*, 2015 ; Callan *et coll.*, 2018).

La seconde condition nécessaire à l'apparition de surdité attentionnelle en laboratoire lors de la réalisation d'une tâche auditive découle de la condition précédente. Puisque le niveau de charge imposé n'atteint pas celui de situations réelles, un stimulus rendu inattendu par une émission unique est plus à même d'être manqué.

De plus, il est important de noter que l'effet de surdité attentionnelle mis en évidence ici est important (78,1 % de manqués) puisqu'il est mis en évidence à l'aide d'une expérience réalisée en ligne. Or, dans ce contexte, les conditions expérimentales et le matériel ne peuvent être soumis au même niveau de contrôle que lors d'une expérience réalisée en laboratoire. Ceci mène donc à une plus grande variabilité dans les données qui n'aurait pas permis la mise en évidence de surdité attentionnelle si l'effet était faible. Le protocole mis en place ici semble donc très robuste en vue d'obtenir de la surdité attentionnelle.

Enfin, cette expérience a aussi permis de mettre en évidence l'intérêt de réaliser une procédure de recherche de seuils d'audibilité telle que le serait un « audiogramme en ligne », bien que celle-ci ne puisse renseigner sur l'audition du participant comme le permettrait un audiogramme réalisé en laboratoire à l'aide d'un audiomètre. Effectivement, l'audiogramme nécessite d'avoir une chaîne d'émission caractérisée et de connaître le niveau de référence d'émission pour renseigner sur l'audition du participant. Cependant, même sans ces informations, la détermination des seuils d'audibilité semble apporter des informations intéressantes sur ce que le participant peut percevoir ou non dans ces conditions expérimentales.

Discussion générale

L'objectif de cette thèse était d'identifier une contre-mesure à la surdité attentionnelle via la modification des caractéristiques sonores de stimuli potentiellement manqués. En effet, les conditions d'apparition de la surdité attentionnelle sont encore mal définies. Il semble que celle-ci puisse apparaître lors de l'exécution d'une tâche visuelle ou auditive. Dans ce dernier cas, il semble que la surdité attentionnelle n'apparaisse que lorsque la charge perceptive est élevée. Pourtant, toutes les études ne vont pas dans ce sens. D'un point de vue scientifique, il était donc important de continuer à approfondir les recherches sur la surdité attentionnelle en vue de préciser les conditions dans lesquelles elle apparaît. En effet, ces conditions apportent des renseignements sur le fonctionnement de l'attention. Plus particulièrement, cela renseigne sur la manière dont les informations sont sélectionnées et traitées. S'il semble que la pertinence des stimuli en regard de la tâche réalisée soit un atout majeur pour qu'ils bénéficient de traitements assez approfondis pour atteindre la conscience, ce n'est pas la seule variable en jeu. Il semble que les caractéristiques physiques des stimuli ainsi que leur signification puisse jouer sur leur niveau de saillance et, de fait, sur leur capacité à attirer l'attention. Une autre caractéristique déterminante semble être le niveau de charge perceptive imposé par l'environnement, à savoir, si celui-ci comprend beaucoup ou peu de stimuli. Un stimulus n'est donc pas traité ou ignoré uniquement sur la base des objectifs que se fixe un individu, ses caractéristiques propres entre aussi en compte de même que les caractéristiques de l'environnement. L'étude de la surdité attentionnelle permet ainsi d'apporter des précisions sur les caractéristiques pouvant permettre à un stimulus d'être traité sans que l'individu décide sciemment de s'y intéresser.

Par ailleurs, dans des domaines comme l'aviation ou le monde médical, les alarmes sonores sont très utilisées. De manière générale, une alarme nécessite deux caractéristiques indispensables : être détectable au sein de l'environnement et reconnaissable pour engendrer une réaction appropriée. Concernant le premier point, les alarmes sonores ont un avantage certain sur les alarmes visuelles dans le sens qu'elles ne nécessitent pas que le regard soit porté dans leur direction pour être repérées. L'autre avantage des alarmes sonores est qu'elles ne surchargent pas le canal visuel souvent surchargé des opérateurs. En s'appuyant sur le fonctionnement du système auditif et en fonction de l'utilité de l'alarme ainsi que du niveau d'urgence qu'elle doit véhiculer, un certain nombre de recommandations peuvent être faites sur la conception d'une alarme sonore. Cependant, cela ne suffit pas à s'assurer de la détectabilité d'une alarme. En effet, un certain nombre d'incidents et

d'accidents a été mis en lien avec des alarmes manquées. Dans ces situations, les alarmes étaient émises à fort niveau, mais l'implication de l'opérateur dans sa tâche ne lui permettait pas de repérer l'alarme. Cette incapacité d'un individu à repérer un stimulus auditif lors de la réalisation d'une tâche qui accapare toute son attention correspond bien à la définition de la surdité attentionnelle. Il n'est pas étonnant de retrouver le phénomène de surdité attentionnelle en situations professionnelles puisqu'elles engendrent souvent une forte charge perceptive. Cependant, puisqu'elle représente un problème de sécurité, l'étude de la surdité attentionnelle est aussi nécessaire pour identifier les situations qui mènent à son apparition et les manières de la diminuer.

1 Reproduire expérimentalement des conditions de surdité attentionnelle

Dans le but de répondre à cette problématique : « est-il possible de diminuer le niveau de surdité attentionnelle en modifiant les caractéristiques sonores d'un son ? », deux expériences ont été réalisées dans le cadre de cette thèse.

La première expérience consistait à faire réaliser une double tâche à des participants avec pour tâche secondaire la détection d'un son d'alarme présent dans 50 % des essais. Cette tâche de détection était une analogie de la réponse apportée à une alarme. La tâche principale choisie était une tâche multilocuteurs consistant à rapporter des informations présentes dans des phrases en anglais. Le choix de cette tâche s'expliquait par sa dimension écologique, celle-ci étant très représentative d'une situation retrouvée en milieu professionnel dans le domaine du contrôle aérien. Plus largement, il n'est pas rare pour un professionnel, quel qu'il soit, d'être surchargé en informations sonores. Ceci explique le choix d'une tâche auditive et non visuelle. Enfin, un troisième argument en faveur de ce choix était la littérature plus faible autour de la surdité attentionnelle engendrée par une tâche auditive.

L'objectif principal de cette première expérience était de valider un protocole permettant d'obtenir de la surdité attentionnelle à partir de ces deux tâches. L'objectif secondaire était de vérifier si le niveau surdité attentionnelle observé dépendait bien du niveau de

charge perceptive de la tâche. Dans ce but, le SNR, différence de niveau sonore entre la voix cible et les voix à ignorer, variait. Dans une condition, le SNR était nul, la voix cible générait autant de niveau que les voix masques. Dans une seconde condition, le SNR était favorable à la voix cible qui était émise à plus fort niveau que les voix masques.

Lors de cette expérience, aucune surdité attentionnelle n'a pu être mise en évidence quelle que soit la condition de charge. En effet, il y avait trop peu de stimuli manqués pour pouvoir les attribuer au phénomène de surdité attentionnelle. De manière plus globale, le taux d'erreur à la tâche de détection (stimulus manqué ou fausse alarme) était très faible même en condition de charge perceptive élevée. Néanmoins, un effet tendanciel a été remarqué sur les temps de réponse à cette tâche dans la condition de charge perceptive élevée. Cela sous-entendait que le niveau de charge perceptive en jeu dans cette expérience était potentiellement trop faible pour mener les participants à échouer et à observer une surdité attentionnelle. Pourtant, la réussite à la tâche principale chutait fortement en passant de la condition de charge perceptive basse à la condition de charge perceptive élevée. En effet, celle-ci passait de 85 % de réponses correctes en condition de charge perceptive faible à 34,28 % de réponses correctes en condition de charge perceptive élevée.

Ces résultats pouvaient s'expliquer de plusieurs manières. Tout d'abord, la double tâche impliquait une réponse sur le stimulus critique (celui qui servait à mesurer la surdité attentionnelle), la consigne impliquait donc que les participants allouent une part d'attention à ce stimulus. D'autant plus que le stimulus critique était émis régulièrement, ce qui le rendait très peu inattendu. Ensuite, la tâche principale nécessitait que les participants focalisent leur attention sur la voix cible uniquement lors de la partie concernant son information cible. Or les phrases utilisées étaient normalisées et avaient toutes la même prosodie. Les participants pouvaient donc déterminer après quelques essais quelle portion de phrase allait contenir leur information cible pour focaliser leur attention uniquement à ce moment-là. L'attention des participants pouvait donc être attirée assez facilement ailleurs (sur le stimulus critique) lorsqu'il tombait à un autre moment de l'essai que celui où l'information cible apparaissait. Ici, le très faible nombre de stimuli manqués n'a pas permis de mener une analyse statistique spécifique aux essais où le stimulus critique était émis au même instant que l'information cible des participants. De plus, le niveau de charge perceptive n'était peut-être pas suffisant pour engendrer une surdité attentionnelle. Enfin,

il semble, en comparaison des études de la littérature, que la surdité attentionnelle survienne lorsque le stimulus critique comporte des caractéristiques physiques propres aux stimuli à ignorer.

A l'issue de cette première expérience, le protocole a été revu pour répondre à ces trois critiques. Tout d'abord, le stimulus critique devait devenir plus inattendu et ne pas faire l'objet d'une tâche. Ensuite, le niveau de charge perceptive et cognitive de la tâche visant à attirer l'attention devait être plus grand pour la rendre plus complexe afin d'éviter les fuites d'attention. Enfin, un canal à ignorer devait être ajouté pour déterminer si un stimulus critique ayant des caractéristiques communes avec les stimuli à ignorer présente plus de risques d'être manqué ou non.

Dans la seconde expérience, le protocole tenait compte de ces hypothèses. Le même corpus de sons comprenant des phrases en anglais utilisé précédemment était réutilisé. La présentation des phrases se faisait au casque. Chaque essai se composait de 3 groupes successifs de 3 phrases simultanées. Dans chacun de ces 3 groupes, l'une des phrases était émise dans une oreille définie comme la cible tandis que les deux autres étaient émises dans l'oreille à ignorer. Par conséquent, lors d'un essai, le participant devait effectuer 3 fois consécutivement la tâche multilocuteurs en mémorisant à chaque fois les 3 informations cibles des 3 phrases présentées dans son oreille cible tandis qu'il ignorait le contenu de l'autre oreille. A la fin de l'essai, le participant devait rapporter le résultat d'une des trois réalisations sans connaître d'avance celle à rapporter. Ainsi, il était tenu de focaliser son attention sur l'ensemble des 3 réalisations, ce qui limitait les fuites d'attention possibles. De plus, dans ces conditions, les niveaux de charges perceptives et cognitives étaient bien plus grands que lors de l'expérience 1. Après 11 essais de ce type, un douzième essai comportait un sinus à la fréquence fondamentale moyenne des voix utilisées. Ce stimulus (critique) n'était présent que dans un seul des 12 essais, le rendant ainsi bien plus inattendu que lors de la première expérience. De plus, aucune tâche ne lui était attribuée, ce qui contribuait aussi à le rendre totalement inattendu. A l'issue de ce douzième essai, le participant était questionné sur sa perception du stimulus critique avant de réaliser une phase contrôle dans laquelle il devait, cette fois, détecter le stimulus critique et ignorer tout le reste.

2 Mettre à jour des indices sonores pouvant contrer la surdité attentionnelle

En plus de l'objectif d'obtenir une situation de surdité attentionnelle, l'objectif de cette seconde expérience était aussi de tester une contre-mesure possible : l'ajout de rugosité sonore. Celle-ci correspond au percept associé à la présence de modulations d'amplitude ou de fréquence dans un son. Un lien ayant été mis en évidence entre présence de rugosité et augmentation des réactions comportementales, cette caractéristique semblait intéressante en vue de limiter la surdité attentionnelle.

En vue de tester ces deux objectifs, les participants à cette expérience étaient répartis en 4 groupes, un groupe pour chacune des conditions suivantes : « stimulus critique non rugueux émis dans l'oreille cible », « stimulus critique non rugueux émis dans l'oreille à ignorer », « stimulus critique rugueux émis dans l'oreille cible », « stimulus critique rugueux émis dans l'oreille à ignorer ».

Lors de cette seconde expérience, un fort niveau de surdité attentionnelle a été observé. En effet, 78,1 % des participants capables de détecter 75 % des stimuli critiques en tâche contrôle ne l'avaient pas repéré la première fois lors du douzième essai de la phase de test. Ceci est d'autant plus impressionnant que l'expérience était réalisée en ligne dans des conditions bien moins contrôlées qu'en laboratoire. Cette observation a confirmé que la hausse du niveau de charge perceptive et le fait de rendre le stimulus critique inattendu ont bien été nécessaires à l'obtention de surdité attentionnelle. En revanche, cette expérience ne permet de déterminer lequel de ces deux paramètres a été déterminant dans l'apparition de la surdité attentionnelle. Par conséquent, cette expérience n'apporte pas de données claires en faveur ou en défaveur du modèle de Lavie (2005) concernant le lien entre charge perceptive et surdité attentionnelle.

Par contre, cette expérience appuie la littérature indiquant qu'un stimulus critique partageant des caractéristiques physiques avec la cible a plus de chance d'être détecté (Simons et Chabris, 1999 ; Dalton et Fraenkel, 2012). En effet, ici, lorsque le stimulus critique était présenté dans l'oreille à ignorer, celui-ci était bien plus souvent manqué que lors d'une présentation dans l'oreille cible (respectivement 6,02 % contre 35,79 %)

En revanche, la présence de rugosité dans les stimuli critiques n'a pas entraîné un taux de détection significativement meilleur. Toutefois, cette contre-mesure reste prometteuse puisqu'une tendance en faveur d'une meilleure détection des sons rugueux est observée lors d'une présentation dans l'oreille cible. Il serait donc nécessaire par la suite de réaliser de nouvelles passations pour augmenter le nombre de participants et vérifier si l'effet se confirme ou non.

3 Conclusion

En conclusion, pour répondre à l'objectif de cette thèse d'identifier une contre-mesure à la surdité attentionnelle, il était tout d'abord nécessaire de mettre en place un protocole permettant d'obtenir de la surdité attentionnelle via une tâche auditive dans des conditions écologiques. Cette thèse a permis la mise au point de ce nouveau protocole de manière à ce qu'il soit assez robuste pour être utilisable dans le cadre d'expériences en ligne.

Lors de cette thèse, une contre-mesure (l'ajout de rugosité) a été testée et a montré des résultats intéressants bien que non significatifs. Il reste donc nécessaire de poursuivre les expériences à propos de l'effet de la rugosité sur la surdité attentionnelle. L'enjeu scientifique est de mieux comprendre le fonctionnement de l'attention dans l'audition. D'un point de vue plus appliqué, l'enjeu est de définir si cette caractéristique pourrait permettre une meilleure détection des alarmes sonores afin de diminuer les situations d'alarmes manquées pouvant engendrer des problèmes de sécurité importants chez des professionnels. De plus, l'intérêt de la rugosité n'a été évalué ici que chez des individus se déclarant normo-entendants. Cependant, environ 1000 cas de traumatismes sonores aigus (TSA) sont déclarés annuellement au sein des armées. Les alarmes sonores doivent donc être efficaces quel que soit l'état auditif de l'opérateur. Il serait intéressant de poursuivre les recherches sur l'intérêt de la rugosité chez des individus présentant des séquelles de TSA.

Enfin, les résultats de la seconde expérience réalisée en ligne ont mis en évidence un intérêt pour la réalisation de procédures de type « audiogramme » en ligne. En effet, bien que les conditions d'un audiogramme en ligne ne soient pas aussi contrôlées qu'en

laboratoire et empêchent de conclure de manière certaine quant à la présence d'une surdité, les seuils d'audibilité obtenus sont significativement liés aux résultats obtenus à une tâche de détection. Ceci met en évidence le potentiel de l'audiométrie en ligne.

Annexe A : Récapitulatif des études autour de la surdité attentionnelle

Tableau A.3 – Récapitulatif des études autour de la surdité attentionnelle. La colonne « tâche associée au CS » indique si celui-ci devait être détecté, dans le cas contraire, il était totalement ignoré et étudié via des mesures physiologiques ou via l’interférence qu’il engendrait sur la réponse associée à la cible. La colonne « Tâche principale » indique si la tâche principale était auditive (« A »), visuelle (« V ») ou si elle ne pouvait pas se ranger dans cette catégorie (« Autre »). Ce dernier cas concerne les études réalisées en simulateur par exemple qui sont plus complexes que ces deux catégories. Les colonnes mesures comportementales et physiologiques concerne la méthode par laquelle la surdité attentionnelle a été étudiée. La colonne surdité attentionnelle indique si de la surdité attentionnelle a pu être observée ou non, que les auteurs s’y intéressent ou non. Enfin, la colonne « Favorable à la PLT » indique les études allant ou non dans le sens de la *Perceptual Load Theory* de Nilli Lavie (1995). Les cases sont vides pour les études qui ne font pas varier le niveau de charge ou comportent un « ? » pour celles comprenant plusieurs niveaux de difficulté, mais dont il est difficile de dire si la charge est perceptive ou cognitive, compliquant ainsi les conclusions.

Article	Tâche associée au CS	Tâche principale	Mesures comportementales	Mesures physiologiques	Surdité attentionnelle	Favorable à la PLT
Moray (1959)	✗	A	✓	✗	✓	
Wickens <i>et coll.</i> (1977)	✓	V	✗	✓	✓	✗
Isreal <i>et coll.</i> (1980)	✓	V	✓	✓	✓	✓
Alain et Izenberg (2003)	✗	A	✗	✓	✓	
Tellinghuisen et Nowak (2003)	✗	V	✓	✗	✗	✗
Gomes <i>et coll.</i> (2008)	✗	A	✓	✓	✓	✗
Parks <i>et coll.</i> (2009)	✗	V	✗	✓	✓	✓
Francis (2010)	✗	A	✓	✗	✓	✓
Parks <i>et coll.</i> (2011)	✗	V	✓	✓	✗	✗
Macdonald et Lavie (2011)	✗	V	✓	✗	✓	✓
Dalton et Fraenkel (2012)	✗	A	✓	✗	✓	
Murphy <i>et coll.</i> (2013)	✗	A	✓	✓	✓	
Sabri <i>et coll.</i> (2013)	✓	A	✓	✓	✓	✓
Dehais <i>et coll.</i> (2014)	✓	Autre	✓	✗	✓	?
Koreimann <i>et coll.</i> (2014)	✗	A	✓	✗	✓	
Giraudet <i>et coll.</i> (2015)	✓	V	✓	✓	✓	?
Molloy <i>et coll.</i> (2015)	✓	V	✓	✓	✓	✓
Raveh et Lavie (2015)	✓	V	✓	✗	✓	✓
Sinnett <i>et coll.</i> (2006)	✗	A	✓	✗	✓	
Z�ske <i>et coll.</i> (2016)	✗	V	✓	✗	✗	✗
Tellinghuisen <i>et coll.</i> (2016)	✓	V	✓	✗	✓	✓
Fairnie <i>et coll.</i> (2016)	✓	A	✓	✗	✓	✓
Masutomi <i>et coll.</i> (2016)	✓	A	✓	✗	✓	✓

Tableau A.3 continuité de la page précédente

Article	Tâche associée au CS	Tâche principale	Mesures comportementales	Mesures physiologiques	Surdit�e attentionnelle	Favorable à la PLT
Dehais <i>et coll.</i> (2016)	✓	Autre	✓	✓	✓	?
Causse <i>et coll.</i> (2016)	✓	Autre	✓	✓	✓	?
Durantin <i>et coll.</i> (2017)	✓	Autre	✓	✓	✓	?
Callan <i>et coll.</i> (2018)	✓	Autre	✓	✓	✓	
Molloy <i>et coll.</i> (2018)	✓	V	✓	✓	✓	✓
Dehais <i>et coll.</i> (2019)	✓	Autre	✓	✓	✓	?

Bibliographie

- C. ALAIN et A. IZENBERG : Effects of Attentional Load on Auditory Scene Analysis. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(7) :1063–1073, 10 2003. ISSN 0898-929X. URL <https://direct.mit.edu/jocn/article/15/7/1063/3821/Effects-of-Attentional-Load-on-Auditory-Scene>.
- J. ALTARRIBA et E. G. SOLTANO : Repetition blindness and bilingual memory : Token individuation for translation equivalents. *Memory & Cognition*, 24(6) :700–711, 11 1996. ISSN 0090-502X. URL <http://link.springer.com/10.3758/BF03201095>.
- M. J. AMON et B. I. BERTENTHAL : Auditory versus visual stimulus effects on cognitive performance during the N-back task. *Cognitive Science*, p. 1304–1309, 2018.
- G. ANDÉOL, C. SUIED, S. SCANNELLA et F. DEHAIS : The Spatial Release of Cognitive Load in Cocktail Party Is Determined by the Relative Levels of the Talkers. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 18(3) :457–464, 6 2017. ISSN 1525-3961. URL <http://link.springer.com/10.1007/s10162-016-0611-7>.
- L. H. ARNAL, A. FLINKER, A. KLEINSCHMIDT, A.-L. GIRAUD et D. POEPEL : Human Screams Occupy a Privileged Niche in the Communication Soundscape. *Current Biology*, 25(15) :2051–2056, 8 2015. ISSN 09609822. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096098221500737X>.
- F. ARTIÈRES, . BIZAGUET, D. BOUCCARA, R. DAUMAN, B. MEYER, C. MEYER-BISCH, M. OHRESSER, X. RENARD et J.-L. COLLETTE : Guide des Bonnes Pratiques en Audiométrie de l’Adulte. Rap. tech., Société Française d’Audiologie, 2006. URL <https://www.sfaudiologie.fr/guide-de-bonnes-pratiques>.
- N. BARASCUD, T. D. GRIFFITHS, D. MCALPINE et M. CHAIT : “Change Deafness” Arising from Inter-feature Masking within a Single Auditory Object. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(3) :514–528, 3 2014. ISSN 0898-929X. URL http://www.mitpressjournals.org/doi/10.1162/jocn_a_00481https://direct.mit.edu/jocn/article/26/3/514/28073/Change-Deafness-Arising-from-Inter-feature-Masking.

- S. BARTOLAMI, S. M. BREEDLOVE, M. R. ROSENZWEIG et N. V. WATSON : *Psychobiologie*. De Boeck Supérieur, 1 éd., 2012. ISBN 978-2-8041-6924-4.
- D. BAVELIER : Repetition blindness between visually different items : the case of pictures and words. *Cognition*, 51(3) :199–236, 3 1994. ISSN 00100277. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/001002779490054X>.
- D. BAVELIER, S. PRASADA et J. SEGUI : Repetition blindness between words : Nature of the orthographic and phonological representations involved. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 20(6) :1437–1455, 11 1994. ISSN 1939-1285. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0278-7393.20.6.1437>.
- V. BEANLAND et E. H. C. CHAN : The relationship between sustained inattentive blindness and working memory capacity. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 78 (3) :808–817, 4 2016. ISSN 1943-3921. URL <http://link.springer.com/10.3758/s13414-015-1027-x>.
- R. BECKLEN et D. CERVONE : Selective looking and the noticing of unexpected events. *Memory & Cognition*, 11(6) :601–608, 11 1983. ISSN 0090-502X. URL <http://link.springer.com/10.3758/BF03198284>.
- P. BELIN et R. J. ZATORRE : Neurobiology : Sounding the Alarm. *Current Biology*, 25(18) :R805–R806, 9 2015. ISSN 09609822. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982215008301><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960982215008301>.
- C. C. BERGAN et I. R. TITZE : Perception of Pitch and Roughness in Vocal Signals with Subharmonics. *Journal of Voice*, 15(2) :165–175, 6 2001. ISSN 08921997. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0892199701000182>.
- J. P. BLISS : Investigation of Alarm-Related Accidents and Incidents in Aviation. *The International Journal of Aviation Psychology*, 13(3) :249–268, 7 2003. ISSN 1050-8414. URL http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1207/S15327108IJAP1303_04.
- R. S. BOLIA, W. T. NELSON, M. A. ERICSON et B. D. SIMPSON : A speech corpus for multitalker communications research. *The Journal of the Acoustical Society of America*,

- 107(2) :1065–1066, 2 2000. ISSN 0001-4966. URL <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.428288>.
- K. BREDEMEIER et D. J. SIMONS : Working memory and inattentive blindness. *Psychonomic Bulletin & Review*, 19(2) :239–244, 4 2012. ISSN 1069-9384. URL <http://link.springer.com/10.3758/s13423-011-0204-8>.
- A. S. BREGMAN : *Auditory Scene Analysis*. MIT Press, 1990. URL <https://direct.mit.edu/books/book/3887/chapter/163154/the-auditory-scene>.
- S. BREZNITZ : Cry wolf. *The psychology of false alarms*. Hillsdale, NJ : LEA, 1984.
- D. E. BROADBENT : *Perception and communication*. Pergamon Press, Elmsford, 1958. URL <http://content.apa.org/books/10037-000>.
- D. E. BROADBENT et M. H. P. BROADBENT : From detection to identification : Response to multiple targets in rapid serial visual presentation. *Perception & Psychophysics*, 42(2) :105–113, 3 1987. ISSN 0031-5117. URL <http://link.springer.com/10.3758/BF03210498>.
- D. S. BRUNGART, B. D. SIMPSON, M. A. ERICSON et K. R. SCOTT : Informational and energetic masking effects in the perception of multiple simultaneous talkers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 110(5) :2527–2538, 11 2001. ISSN 0001-4966. URL <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.1408946>.
- S. BUFFAT, J. PLANTIER, C. ROUMES et J. LORENCEAU : Repetition Blindness for Natural Images of Objects with Viewpoint Changes. *Frontiers in Psychology*, 3 :622, 1 2013. ISSN 1664-1078. URL <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2012.00622/abstract>.
- D. E. CALLAN, T. GATEAU, G. DURANTIN, N. GONTHIER et F. DEHAIS : Disruption in neural phase synchrony is related to identification of inattentive deafness in real-world setting. *Human Brain Mapping*, 39(6) :2596–2608, 6 2018. ISSN 1065-9471. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/hbm.24026><https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hbm.24026>.

- U. CARTWRIGHT-FINCH et N. LAVIE : The role of perceptual load in inattentional blindness. *Cognition*, 102(3) :321–340, 3 2007. ISSN 00100277. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010027706000205>.
- M. CAUSSE, J.-P. IMBERT, L. GIRAUDET, C. JOUFFRAIS et S. TREMBLAY : The Role of Cognitive and Perceptual Loads in Inattentional Deafness. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, 7 2016. ISSN 1662-5161. URL <http://journal.frontiersin.org/Article/10.3389/fnhum.2016.00344/abstract>.
- M. CHAIT, C. C. RUFF, T. D. GRIFFITHS et D. MCALPINE : Cortical responses to changes in acoustic regularity are differentially modulated by attentional load. *NeuroImage*, 59 (2) :1932–1941, 1 2012. ISSN 10538119. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1053811911010457>.
- Z. CHEN et K. R. CAVE : Zooming in on the cause of the perceptual load effect in the go/no-go paradigm. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 42(8) :1072–1087, 2016. ISSN 1939-1277. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/xhp0000168>.
- E. C. CHERRY : Some Experiments on the Recognition of Speech, with One and with Two Ears. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 25(5) :975–979, 9 1953. ISSN 0001-4966. URL <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.1907229>.
- M. M. CHUN : Types and Tokens in Visual Processing : A Double Dissociation between the Attentional Blink and Repetition Blindness. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 23(3) :738–755, 1997. ISSN 00961523.
- V. COLTHEART : *Tutorials in visual cognition*. Psychology Press, 2011.
- V. COLTHEART, S. MONDY et M. COLTHEART : Repetition blindness for novel objects. *Visual Cognition*, 12(3) :519–540, 4 2005. ISSN 1350-6285. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13506280444000427>.
- R. S. CORTEEN et D. DUNN : Shock-associated words in a nonattended message : A test for momentary awareness. *Journal of Experimental Psychology*, 102(6) :1143–1144, 1974. ISSN 0022-1015. URL <http://content.apa.org/journals/xge/102/6/1143>.

- R. S. CORTEEN et B. WOOD : Autonomic responses to shock-associated words in an unattended channel. *Journal of Experimental Psychology*, 94(3) :308–313, 1972. ISSN 0022-1015. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/h0032759>.
- P. DALTON et N. FRAENKEL : Gorillas we have missed : Sustained inattentive deafness for dynamic events. *Cognition*, 124(3) :367–372, 9 2012. ISSN 00100277. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010027712001047><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010027712001047>.
- P. DALTON et R. W. HUGHES : Auditory attentional capture : implicit and explicit approaches. *Psychological Research*, 78(3) :313–320, 5 2014. ISSN 0340-0727. URL <http://link.springer.com/10.1007/s00426-014-0557-5>.
- J. R. de LEEUW : jsPsych : A JavaScript library for creating behavioral experiments in a Web browser. *Behavior Research Methods*, 47(1) :1–12, 3 2015. ISSN 1554-3528. URL <http://link.springer.com/10.3758/s13428-014-0458-y>.
- F. DEHAIS, M. CAUSSE, N. RÉGIS, E. MENANT, P. LABEDAN, F. VACHON et S. TREMBLAY : Missing Critical Auditory Alarms in Aeronautics : Evidence for Inattentive Deafness? *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 56(1) :1639–1643, 9 2012. ISSN 2169-5067. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1071181312561328>.
- F. DEHAIS, M. CAUSSE, F. VACHON, N. RÉGIS, E. MENANT et S. TREMBLAY : Failure to Detect Critical Auditory Alerts in the Cockpit. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 56(4) :631–644, 6 2014. ISSN 0018-7208. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0018720813510735>.
- F. DEHAIS, R. N. ROY, T. GATEAU et S. SCANNELLA : Auditory Alarm Misperception in the Cockpit : An EEG Study of Inattentive Deafness. *In International Conference on Augmented Cognition*, p. 177–187. Springer Verlag, 2016. ISBN 9783319399546. URL http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-39955-3_17.
- F. DEHAIS, R. ROY et S. SCANNELLA : Inattentive deafness to auditory alarms : Inter-individual differences, electrophysiological signature and single trial classification. *Behavioural Brain Research*, 360 :51–59, 3 2019. ISSN 01664328. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0166432818313986>.

- J. A. DEUTSCH et D. DEUTSCH : Attention : Some theoretical considerations. *Psychological Review*, 70(1) :80–90, 1 1963. ISSN 1939-1471. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/h0039515>.
- J. DUNCAN, S. MARTENS et R. WARD : Restricted attentional capacity within but not between sensory modalities. *Nature*, 387(6635) :808, 1997.
- G. DURANTIN, F. DEHAIS, N. GONTHIER, C. TERZIBAS et D. E. CALLAN : Neural signature of inattentive deafness. *Human Brain Mapping*, 38(11) :5440–5455, 11 2017. ISSN 10659471. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hbm.23735>.
- P. E. DUX et R. MAROIS : The attentional blink : A review of data and theory. *Attention, Perception & Psychophysics*, 71(8) :1683–1700, 11 2009. ISSN 1943-3921. URL <http://www.springerlink.com/index/10.3758/APP.71.8.1683>.
- J. EDWORTHY : Alarms are still a problem! *Anaesthesia*, 68(8) :791–794, 8 2013. ISSN 00032409. URL <http://www.aami.org/meet-https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/anae.12128>.
- J. R. EDWORTHY et J. D. EDWORTHY : Audible medical alarms. *Anaesthesia*, 70(10) :1215–1215, 10 2015. ISSN 00032409. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/anae.13205>.
- J. EDWORTHY : Designing Effective Alarm Sounds. *Biomedical Instrumentation & Technology*, 45(4) :290–294, 7 2011. ISSN 0899-8205. URL <https://meridian.allenpress.com/bit/article/45/4/290/142027/Designing-Effective-Alarm-Sounds>.
- J. EDWORTHY, E. HELLIER, K. TITCHENER, A. NAWEED et R. ROELS : Heterogeneity in auditory alarm sets makes them easier to learn. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 41(2) :136–146, 3 2011. ISSN 01698141. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169814110001095>.
- J. EDWORTHY, S. LOXLEY et I. DENNIS : Improving Auditory Warning Design : Relationship between Warning Sound Parameters and Perceived Urgency. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 33(2) :205–231, 4 1991. ISSN 0018-7208. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/001872089103300206>.

- R. ERAMUDUGOLLA, D. R. IRVINE, K. I. MCANALLY, R. L. MARTIN et J. B. MATTINGLEY : Directed Attention Eliminates ‘Change Deafness’ in Complex Auditory Scenes. *Current Biology*, 15(12) :1108–1113, 6 2005. ISSN 09609822. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096098220500566X>
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096098220500566X>.
- B. A. ERIKSEN et C. W. ERIKSEN : Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception & Psychophysics*, 16(1) :143–149, 1 1974. ISSN 0031-5117. URL <http://link.springer.com/10.3758/BF03203267>.
- J. FAIRNIE, B. C. MOORE et A. REMINGTON : Missing a trick : Auditory load modulates conscious awareness in audition. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 42(7) :930, 2016. ISSN 19391277.
- H. FASTL et E. ZWICKER : *Psychoacoustics : facts and models*, vol. 22. Springer Science & Business Media, 2006.
- A. L. FRANCIS : Improved segregation of simultaneous talkers differentially affects perceptual and cognitive capacity demands for recognizing speech in competing speech. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 72(2) :501–516, 2 2010. ISSN 1943-3921. URL <http://www.springerlink.com/index/10.3758/APP.72.2.501>
<http://link.springer.com/10.3758/APP.72.2.501>.
- M. S. GAZZANIGA, R. B. IVRY et G. R. MANGUN : *Cognitive Neuroscience : The Biology of the Mind. Third Edition*. W.W. Norton, 2008. ISBN 9780393927955.
- C. GIGUÈRE, C. LAROCHE, R. AL OSMAN et Y. ZHENG : Optimal installation of audible warning systems in the noisy workplace. In *Proceedings of the 9th International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN)*, p. 8, 2008.
- J. GILLARD et M. SCHUTZ : Composing alarms : considering the musical aspects of auditory alarm design. *Neurocase*, 22(6) :566–576, 11 2016. ISSN 1355-4794. URL <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13554794.2016.1253751>.
- L. GIRAUDET, M.-E. ST-LOUIS, S. SCANNELLA et M. CAUSSE : P300 Event-Related Potential as an Indicator of Inattentional Deafness? *PLOS ONE*, 10(2) :e0118556, 2 2015. ISSN 1932-6203. URL <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0118556>.

- L. GOLDFARB et A. TREISMAN : Repetition blindness : The survival of the grouped. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18(6) :1042–1049, 12 2011. ISSN 1069-9384. URL <http://www.springerlink.com/index/10.3758/s13423-011-0135-4>.
- H. GOMES, S. BARRETT, M. DUFF, J. BARNHARDT et W. RITTER : The effects of interstimulus interval on event-related indices of attention : An auditory selective attention test of perceptual load theory. *Clinical Neurophysiology*, 119(3) :542–555, 3 2008. ISSN 13882457. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1388245707006980><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1388245707006980>.
- V. T. GONÇALVES et L. L. MANSUR : N-Back auditory test performance in normal individuals. *Dementia & Neuropsychologia*, 3(2) :114–117, 6 2009. ISSN 1980-5764. URL http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1980-57642009000200114&lng=en&tlng=en.
- W. M. HARTMANN : *Signals, sound, and sensation*. American Institute of Physics Melville, NY, 1998. ISBN 978-1-56396-283-7.
- E. J. HELLIER, J. EDWORTHY et I. DENNIS : Improving Auditory Warning Design : Quantifying and Predicting the Effects of Different Warning Parameters on Perceived Urgency. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 35(4) :693–706, 12 1993. ISSN 0018-7208. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/001872089303500408>.
- S. A. HILLYARD, R. F. HINK, V. L. SCHWENT et T. W. PICTON : Electrical Signs of Selective Attention in the Human Brain. *Science*, 182(4108) :177–180, 10 1973. ISSN 0036-8075. URL <https://www.science.org/doi/10.1126/science.182.4108.177>.
- M. I. ISAAK, K. L. SHAPIRO et J. MARTIN : The attentional blink reflects retrieval competition among multiple rapid serial visual presentation items : Tests of an interference model. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 25 (6) :1774, 1999.
- V. ISNARD : *L'efficacité du système auditif humain pour la reconnaissance de sons naturels*. Thèse de doctorat, Université Paris 6 (UPMC), 2016.

- J. B. ISREAL, C. D. WICKENS, G. L. CHESNEY et E. DONCHIN : The Event-Related Brain Potential as an Index of Display-Monitoring Workload. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 22(2) :211–224, 4 1980. ISSN 0018-7208. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/001872088002200210>.
- W. JAMES : *The principles of psychology / by William James*. Holt,, New York :, 1910. URL <http://www.biodiversitylibrary.org/bibliography/47583>.
- D. KAHNEMAN et A. TREISMAN : Changing views of attention and automaticity, 1984. URL https://archive.org/details/isbn_0125449704/page/28/mode/2up.
- D. KAHNEMAN : *Attention and effort*, vol. 1063. Citeseer, 1973. ISBN 0-13-050518-8.
- N. KANWISHER : Repetition blindness and illusory conjunctions : Errors in binding visual types with visual tokens. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 17(2) :404–421, 1991. ISSN 1939-1277. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0096-1523.17.2.404>.
- N. KANWISHER, J. DRIVER et L. MACHADO : Spatial Repetition Blindness Is Modulated by Selective Attention to Color or Shape. *Cognitive Psychology*, 29(3) :303–337, 12 1995. ISSN 00100285. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010028585710171>.
- N. KANWISHER et M. C. POTTER : Repetition blindness : The effects of stimulus modality and spatial displacement. *Memory & Cognition*, 17(2) :117–124, 1989. ISSN 0090502X.
- N. G. KANWISHER : Repetition blindness : Type recognition without token individuation. *Cognition*, 27(2) :117–143, 11 1987. ISSN 00100277. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0010027787900163>.
- N. G. KANWISHER et M. C. POTTER : Repetition blindness : Levels of processing. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 16(1) :30–47, 1990. ISSN 1939-1277. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0096-1523.16.1.30>.
- J. KEVIN O'REGAN, H. DEUBEL, J. J. CLARK et R. A. RENSINK : Picture Changes During Blinks : Looking Without Seeing and Seeing Without Looking. *Visual Cognition*,

- 7(1-3) :191–211, 1 2000. ISSN 1350-6285. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/135062800394766>.
- R. M. KLEIN : Inhibition of return. *Trends in cognitive sciences*, 4(4) :138–147, 2000.
- M. KOIVISTO et A. REVONSUO : The role of unattended distractors in sustained inattentive blindness. *Psychological Research*, 72(1) :39–48, 11 2007. ISSN 0340-0727. URL <http://link.springer.com/10.1007/s00426-006-0072-4>.
- S. KOREIMANN, B. GULA et O. VITOUCH : Inattentive deafness in music. *Psychological Research*, 78(3) :304–312, 5 2014. ISSN 0340-0727. URL <http://link.springer.com/10.1007/s00426-014-0552-x>.
- C. KREITZ, P. FURLEY et D. MEMMERT : Inattentive blindness is influenced by exposure time not motion speed. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 69(3) :495–505, 3 2016a. ISSN 1747-0218. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1080/17470218.2015.1055771>.
- C. KREITZ, P. FURLEY, D. J. SIMONS et D. MEMMERT : Does working memory capacity predict cross-modally induced failures of awareness? *Consciousness and Cognition*, 39 : 18–27, 1 2016b. ISSN 10538100. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1053810015300581>.
- J. LACHTER, K. I. FORSTER et E. RUTHRUFF : Forty-five years after Broadbent (1958) : Still no identification without attention. *Psychological Review*, 111(4) :880–913, 10 2004. ISSN 1939-1471. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0033-295X.111.4.880>.
- J. LACKNER et M. GARRETT : Resolving ambiguity : Effects of biasing context in the unattended ear. *Cognition*, 1(4) :359–372, 1 1972. ISSN 00100277. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0010027772900029>.
- N. LAVIE : Perceptual Load as a Necessary Condition for Selective Attention. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 21(3) :451, 1995. ISSN 00961523.

- N. LAVIE : Distracted and confused?: Selective attention under load. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(2) :75–82, 2 2005. ISSN 1364-6613. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136466130400316X>.
- N. LAVIE, A. HIRST, J. W. de FOCKERT et E. VIDING : Load Theory of Selective Attention and Cognitive Control. *Journal of Experimental Psychology : General*, 133 (3) :339–354, 2004. ISSN 1939-2222. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0096-3445.133.3.339>.
- N. LAVIE et Y. TSAL : Perceptual load as a major determinant of the locus of selection in visual attention. *Perception & Psychophysics*, 56(2) :183–197, 3 1994. ISSN 0031-5117. URL <http://link.springer.com/10.3758/BF03213897>.
- J. LECLERC et S. JOSLYN : The Cry Wolf Effect and Weather-Related Decision Making. *Risk Analysis*, 35(3) :385–395, 3 2015. ISSN 02724332. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/risa.12336>.
- P. LEMAIRE et A. DIDIERJEAN : *Introduction à la psychologie cognitive*. De Boeck Supérieur, 2018.
- D. T. LEVIN et D. J. SIMONS : Failure to detect changes to attended objects in motion pictures. *Psychonomic Bulletin & Review*, 4(4) :501–506, 12 1997. ISSN 1069-9384. URL <http://www.springerlink.com/index/10.3758/BF03214339><http://link.springer.com/10.3758/BF03214339>.
- C. R. LUO et A. CARAMAZZA : Temporal and spatial repetition blindness : Effects of presentation mode and repetition lag on the perception of repeated items. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 22(1) :95–113, 1996. ISSN 1939-1277. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0096-1523.22.1.95>.
- J. S. MACDONALD et N. LAVIE : Visual perceptual load induces inattentional deafness. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 73(6) :1780–1789, 8 2011. ISSN 19433921.
- A. MACK et I. ROCK : *Inattentional Blindness*. The MIT Press, 1998. ISBN 9780262278799. URL <https://direct.mit.edu/books/book/2640/inattentional-blindness>.

- D. G. MACKAY : Aspects of the Theory of Comprehension, Memory and Attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 25(1) :22–40, 2 1973. ISSN 0033-555X. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1080/14640747308400320>.
- F. MAQUESTIAUX : *Psychologie de l'attention*, vol. 2^e/s. De Boeck Supérieur, Louvain-la-Neuve, 2017. ISBN 9782807307360. URL [maaa](http://maaa.com).
- S. MARTENS et B. WYBLE : The attentional blink : Past, present, and future of a blind spot in perceptual awareness, 5 2010. ISSN 01497634.
- K. MASUTOMI, N. BARASCUD, M. KASHINO, J. H. MCDERMOTT et M. CHAIT : Sound segregation via embedded repetition is robust to inattention. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 42(3) :386–400, 3 2016. ISSN 1939-1277. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/xhp0000147>.
- G. A. MILLER et G. A. HEISE : The Trill Threshold. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 22(5) :637–638, 9 1950. ISSN 0001-4966. URL <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.1906663>.
- M. D. MILLER et D. G. MACKAY : Repetition deafness : Repeated Words in Computer-Compressed Speech Are Difficult to Encode and Recall. *Psychological Science*, 5(1) :47–52, 1994. ISSN 14679280.
- M. D. MILLER et D. G. MACKAY : Relations between language and memory : The Case of Repetition Deafness. *Psychological Science*, 7(6) :347–351, 1996. ISSN 09567976.
- K. MOLLOY, T. D. GRIFFITHS, M. CHAIT et N. LAVIE : Inattentional Deafness : Visual Load Leads to Time-Specific Suppression of Auditory Evoked Responses. *Journal of Neuroscience*, 35(49) :16046–16054, 12 2015. ISSN 0270-6474. URL <https://www.jneurosci.org/lookup/doi/10.1523/JNEUROSCI.2931-15.2015>.
- K. MOLLOY, N. LAVIE et M. CHAIT : Auditory figure-ground segregation is impaired by high visual load. *The Journal of Neuroscience*, 39(9) :2518–18, 12 2018. ISSN 0270-6474. URL <https://www.jneurosci.org/lookup/doi/10.1523/JNEUROSCI.2518-18.2018>.
- B. C. J. MOORE, éd. *Hearing*. Handbook of perception and cognition (2nd ed.). Academic Press, San Diego, CA, US, 1995. ISBN 0-12-505626-5 (Hardcover).

- B. C. J. MOORE : *An introduction to the psychology of hearing*. Brill, 2012.
- T. J. MOORE : Voice communications jamming research. *In AGARD Conference Proceedings 331 : Aural Communication in Aviation*, p. 1–2, 1981. ISBN 9283513886.
- N. MORAY : Attention in Dichotic Listening : Affective Cues and the Influence of Instructions. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 11(1) :56–60, 2 1959. ISSN 0033-555X. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1080/17470215908416289>.
- S. B. MOST : Setting sights higher : category-level attentional set modulates sustained inattentive blindness. *Psychological Research*, 77(2) :139–146, 3 2013. ISSN 0340-0727. URL <http://link.springer.com/10.1007/s00426-011-0379-7>.
- S. B. MOST, D. J. SIMONS, B. J. SCHOLL et C. F. CHABRIS : Sustained inattentive blindness : The role of location in the detection of unexpected dynamic events. *Psyche*, 6, 2000. ISSN 1039723X.
- S. B. MOST, D. J. SIMONS, B. J. SCHOLL, R. JIMENEZ, E. CLIFFORD et C. F. CHABRIS : How not to be Seen : The Contribution of Similarity and Selective Ignoring to Sustained Inattentive Blindness. *Psychological Science*, 12(1) :9–17, 1 2001. ISSN 0956-7976. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1111/1467-9280.00303>.
- S. MURPHY, N. FRAENKEL et P. DALTON : Perceptual load does not modulate auditory distractor processing. *Cognition*, 129(2) :345–355, 11 2013. ISSN 00100277. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010027713001479><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010027713001479>.
- U. NEISSER et R. BECKLEN : Selective looking : Attending to visually specified events. *Cognitive Psychology*, 7(4) :480–494, 10 1975. ISSN 00100285. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0010028575900195>.
- E. A. NEWBY et I. ROCK : Inattentive Blindness as a Function of Proximity to the Focus of Attention. *Perception*, 27(9) :1025–1040, 9 1998. ISSN 0301-0066. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1068/p271025>.
- J. K. O'REGAN, R. A. RENSINK et J. J. CLARK : Change-blindness as a result of 'mudsplashes'. *Nature*, 398(6722) :34–34, 3 1999. ISSN 0028-0836. URL <http://www.nature.com/articles/17953>.

- A. M. OWEN, K. M. McMILLAN, A. R. LAIRD et E. BULLMORE : N-back working memory paradigm : A meta-analysis of normative functional neuroimaging studies. *Human Brain Mapping*, 25(1) :46–59, 5 2005. ISSN 1065-9471. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15846822><http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC6871745><https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hbm.20131>.
- K. J. PALLESEN, E. BRATTICO, C. J. BAILEY, A. KORVENOJA, J. KOIVISTO, A. GJEDDE et S. CARLSON : Cognitive control in auditory working memory is enhanced in musicians. *PloS one*, 5(6) :e11120, 6 2010. ISSN 1932-6203. URL <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0011120><http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20559545><http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC2886055>.
- R. PARASURAMAN et D. R. DAVIES : *Varieties of attention*. Academic Press, Orlando, 1984. ISBN 0125449704 9780125449700.
- N. A. PARKS, M. R. HILIMIRE et P. M. CORBALLIS : Visual perceptual load modulates an auditory microreflex. *Psychophysiology*, 46(3) :498–501, 5 2009. ISSN 00485772. URL <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1469-8986.2009.00801.x><https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1469-8986.2009.00801.x>.
- N. A. PARKS, M. R. HILIMIRE et P. M. CORBALLIS : Steady-state Signatures of Visual Perceptual Load, Multimodal Distractor Filtering, and Neural Competition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(5) :1113–1124, 5 2011. ISSN 0898-929X. URL <http://www.mitpressjournals.org/doi/10.1162/jocn.2010.21460><https://direct.mit.edu/jocn/article/23/5/1113/5083/Steady-state-Signatures-of-Visual-Perceptual-Load>.
- R. D. PATTERSON et T. F. MAYFIELD : Auditory warning sounds in the work environment. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 327(1241) :485–492, 4 1990. ISSN 0080-4622. URL <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.1990.0091>.
- T. PETSAS, J. HARRISON, M. KASHINO, S. FURUKAWA et M. CHAIT : The effect of distraction on change detection in crowded acoustic scenes. *Hearing Research*, 341 :179–

- 189, 11 2016. ISSN 03785955. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378595516301411>.
- M. I. POSNER : Orienting of Attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32(1) :3–25, 2 1980. ISSN 0033-555X. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1080/00335558008248231>.
- M. I. POSNER et Y. COHEN : Components of visual orienting. *Attention and performance X : Control of language processes*, 32 :531–556, 1984.
- M. I. POSNER, M. J. NISSEN et W. C. OGDEN : Attended and unattended processing modes : The role of set for spatial location. *Modes of perceiving and processing information*, 137(158) :2, 1978.
- M. I. POSNER, C. R. SNYDER et B. J. DAVIDSON : Attention and the detection of signals. *Journal of Experimental Psychology : General*, 109(2) :160–174, 6 1980. ISSN 1939-2222. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0096-3445.109.2.160>.
- M. C. POTTER : Rapid serial visual presentation (RSVP) : A method for studying language processing. *In New methods in reading comprehension research*, p. 91–118. Taylor & Francis Group, 1984.
- D. PRESSNITZER : *Perception de rugosité psychoacoustique : d'un attribut élémentaire de l'audition à l'écoute musicale*. Thèse de doctorat, Université Paris 6, 1998.
- S. PUSCHMANN, P. SANDMANN, J. AHRENS, J. THORNE, R. WEERDA, G. KLUMP, S. DEBENER et C. M. THIEL : Electrophysiological correlates of auditory change detection and change deafness in complex auditory scenes. *NeuroImage*, 75 :155–164, 7 2013. ISSN 1053-8119. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1053811913001717>.
- D. RAVEH et N. LAVIE : Load-induced inattentional deafness. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 77(2) :483–492, 2 2015. ISSN 1943-3921. URL <http://link.springer.com/10.3758/s13414-014-0776-2>.
- J. E. RAYMOND, K. L. SHAPIRO et K. M. ARNELL : Temporary Suppression of Visual Processing in an RSVP Task : An Attentional Blink ?, 1992. ISSN 00961523.

- R. A. RENSINK : Change Blindness and Inattentional Blindness. *In* W. BANKS, éd. : *Encyclopedia of Consciousness, vol 1*, p. 47–59. New York : Elsevier, 2009.
- R. A. RENSINK, J. K. O'REGAN et J. J. CLARK : To See or not to See : The Need for Attention to Perceive Changes in Scenes. *Psychological Science*, 8(5) :368–373, 9 1997. ISSN 0956-7976. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1111/j.1467-9280.1997.tb00427.x>.
- G. RIZZOLATTI, L. FADIGA, L. FOGASSI et V. GALLESE : The space around us. *Science (New York, N.Y.)*, 277(5323) :190–1, 7 1997. ISSN 0036-8075. URL <https://www.science.org/doi/10.1126/science.277.5323.190><http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9235632>.
- M. SABRI, C. HUMPHRIES, M. VERBER, J. MANGALATHU, A. DESAI, J. R. BINDER et E. LIEBENTHAL : Perceptual Demand Modulates Activation of Human Auditory Cortex in Response to Task-irrelevant Sounds. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 25(9) :1553–1562, 9 2013. ISSN 0898-929X. URL <https://direct.mit.edu/jocn/article/25/9/1553/27988/Perceptual-Demand-Modulates-Activation-of-Human>.
- P. M. SANDERSON, A. WEE et P. LACHEREZ : Learnability and discriminability of melodic medical equipment alarms*. *Anaesthesia*, 61(2) :142–147, 2 2006. ISSN 0003-2409. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2044.2005.04502.x>.
- D. SCHWARTZ : Méthodes statistiques à l'usage des médecins et des biologistes, 1963.
- K. SHAPIRO : *The limits of attention : Temporal constraints in human information processing*. Oxford University Press Oxford, UK, 2001.
- D. SHEN et T. A. MONDOR : Effect of distractor sounds on the auditory attentional blink. *Perception & Psychophysics*, 68(2) :228–243, 2 2006. ISSN 0031-5117. URL <http://www.springerlink.com/index/10.3758/BF03193672>.
- D. J. SIMONS : Attentional capture and inattentional blindness. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(4) :147–155, 2000. ISSN 13646613.
- D. J. SIMONS : Inattentional blindness. *Scholarpedia*, 2(5) :3244, 2007. ISSN 1941-6016. URL http://www.scholarpedia.org/article/Inattentional_blindness.

- D. J. SIMONS : Monkeying around with the Gorillas in Our Midst : Familiarity with an Inattentional-Blindness Task Does Not Improve the Detection of Unexpected Events. *i-Perception*, 1(1) :3–6, 4 2010. ISSN 2041-6695. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1068/i0386>.
- D. J. SIMONS et C. F. CHABRIS : Gorillas in Our Midst : Sustained Inattentional Blindness for Dynamic Events. *Perception*, 28(9) :1059–1074, 9 1999. ISSN 0301-0066. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1068/p281059>.
- S. SINNETT, A. COSTA et S. SOTO-FARACO : Manipulating inattentional blindness within and across sensory modalities. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59(8) : 1425–1442, 8 2006. ISSN 1747-0218. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1080/17470210500298948>.
- R. D. SORKIN : FORUM : Why are people turning off our alarms? *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84(3) :1107–1108, 9 1988. ISSN 0001-4966. URL <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.397232>.
- S. SOTO-FARACO et C. SPENCE : Spatial modulation of repetition blindness and repetition deafness. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A : Human Experimental Psychology*, 54(4) :1181–1202, 2001. ISSN 02724987.
- N. A. STANTON et J. EDWORTHY, éd. *Human factors in auditory warnings*. Ashgate, 1999. URL <https://eprints.soton.ac.uk/75078/>.
- J. R. STROOP : Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18(6) :643–662, 1935. ISSN 0022-1015. URL <http://content.apa.org/journals/xge/18/6/643>.
- C. SUIED, T. R. AGUS, S. J. THORPE et D. PRESSNITZER : Processing of short auditory stimuli : the rapid audio sequential presentation paradigm (RASP). *In Basic Aspects of Hearing*, p. 443–451. Springer, 2013.
- M. TAFFOU, C. SUIED et I. VIAUD-DELMON : Auditory roughness elicits defense reactions. *Scientific Reports*, 11(1) :956, 12 2021. ISSN 2045-2322. URL <http://www.nature.com/articles/s41598-020-79767-0>.

- D. J. TELLINGHUISEN, A. J. COHEN et N. J. COOPER : Now hear this : Inattentional deafness depends on task relatedness. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 78(8) : 2527–2546, 11 2016. ISSN 1943-3921. URL <http://link.springer.com/10.3758/s13414-016-1169-5>.
- D. J. TELLINGHUISEN et E. J. NOWAK : The inability to ignore auditory distractors as a function of visual task perceptual load. *Perception & Psychophysics*, 65(5) :817–828, 7 2003. ISSN 0031-5117. URL <http://www.springerlink.com/index/10.3758/BF03194817><http://link.springer.com/10.3758/BF03194817>.
- A. M. TREISMAN : The Effect of Irrelevant Material on the Efficiency of Selective Listening. *The American Journal of Psychology*, 77(4) :533, 12 1964a. ISSN 00029556. URL <https://www.jstor.org/stable/1420765?origin=crossref>.
- A. M. TREISMAN : Verbal Cues, Language, and Meaning in Selective Attention. *The American Journal of Psychology*, 77(2) :206, 6 1964b. ISSN 00029556. URL <https://www.jstor.org/stable/1420127?origin=crossref>.
- S. TREMBLAY, F. VACHON et D. M. JONES : Attentional and perceptual sources of the auditory attentional blink. *Perception & Psychophysics*, 67(2) :195–208, 2 2005. ISSN 0031-5117. URL <http://www.springerlink.com/index/10.3758/BF03206484>.
- P. N. VASSILAKIS et R. A. KENDALL : Psychoacoustic and cognitive aspects of auditory roughness : definitions, models, and applications. In B. E. ROGOWITZ et T. N. PAPPAS, édés : *Human Vision and Electronic Imaging XV*, vol. 7527, p. 75270O, 2 2010. URL <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.845457>.
- M. S. VITEVITCH : Change deafness : The inability to detect changes between two voices. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 29(2) :333–342, 2003. ISSN 1939-1277. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0096-1523.29.2.333>.
- R. WARD, J. DUNCAN et K. SHAPIRO : The slow time-course of visual attention. *Cognitive Psychology*, 30(1) :79–109, 1996. ISSN 00100285.

- R. C. WHITE, M. DAVIES et A. M. AIMOLA DAVIES : Inattention blindness on the full-attention trial : Are we throwing out the baby with the bathwater ? *Consciousness and Cognition*, 59 :64–77, 3 2018. ISSN 10538100. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1053810017302787>.
- C. D. WICKENS : The structure of attentional resources. *Attention and performance VIII*, 8 :239–257, 1980.
- C. D. WICKENS : Processing Resources in Attention, Dual Task Performance, and Workload Assessment. Rap. tech., University of Illinois, 1981.
- C. D. WICKENS : Multiple resources and mental workload. *Human Factors*, 50(3) :449–455, 2008. ISSN 00187208.
- C. D. WICKENS, J. ISREAL et E. DONCHIN : The Event Related Cortical Potential as an Index of Task Workload. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 21(4) :282–286, 10 1977. ISSN 0163-5182. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/107118137702100404>.
- C. D. WICKENS, S. RICE, D. KELLER, S. HUTCHINS, J. HUGHES et K. CLAYTON : False Alerts in Air Traffic Control Conflict Alerting System : Is There a “Cry Wolf” Effect ? *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 51(4) :446–462, 8 2009. ISSN 0018-7208. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0018720809344720>.
- M. G. WOLDORFF, C. C. GALLEN, S. A. HAMPSON, S. A. HILLYARD, C. PANTEV, D. SOBEL et F. E. BLOOM : Modulation of early sensory processing in human auditory cortex during auditory selective attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 90(18) :8722–8726, 9 1993. ISSN 0027-8424. URL <https://pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.90.18.8722>.
- M. G. WOLDORFF, S. A. HACKLEY et S. A. HILLYARD : The Effects of Channel-Selective Attention on the Mismatch Negativity Wave Elicited by Deviant Tones. *Psychophysiology*, 28(1) :30–42, 1 1991. ISSN 0048-5772. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1469-8986.1991.tb03384.x>.

- M. G. WOLDORFF et S. A. HILLYARD : Modulation of early auditory processing during selective listening to rapidly presented tones. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 79(3) :170–191, 9 1991. ISSN 00134694. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/001346949190136R>.
- K. J. P. WOODS, M. H. SIEGEL, J. TRAER et J. H. MCDERMOTT : Headphone screening to facilitate web-based auditory experiments. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 79(7) :2064–2072, 10 2017. ISSN 1943-3921. URL <http://link.springer.com/10.3758/s13414-017-1361-2>.
- J. XIA, N. NOORAEI, S. KALLURI et B. EDWARDS : Spatial release of cognitive load measured in a dual-task paradigm in normal-hearing and hearing-impaired listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(4) :1888–1898, 4 2015. ISSN 0001-4966. URL <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.4916599>.
- S. YANTIS et J. C. JOHNSTON : On the locus of visual selection : Evidence from focused attention tasks. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 16(1) :135–149, 1990. ISSN 1939-1277. URL <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0096-1523.16.1.135>.
- R. ZÄSKE, M.-C. PERLICH et S. R. SCHWEINBERGER : To hear or not to hear : Voice processing under visual load. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 78(5) :1488–1495, 7 2016. ISSN 1943-3921. URL <http://link.springer.com/10.3758/s13414-016-1119-2>.