

Effets du stress cognitif sur le signal de parole

Mémoire - *version 2.01*

Comité d'accompagnement

V. Delvaux

K. Huet

M. Piccaluga

B. Blankert

B. Harmegnies

Table des matières

I	Cadre théorique	9
1	Le stress	13
1.1	Les facteurs de stress	14
1.2	Approche physiologique du stress	16
1.3	Approche interactionniste du stress	18
1.4	Approche transactionnelle du stress	19
1.5	Le stress et les émotions	22
1.6	Le stress : synthèse	24
2	La charge de travail, la charge mentale et la charge cognitive	27
2.1	La charge de travail	28
2.2	La charge mentale	31
2.3	La charge cognitive	33
2.3.1	La charge cognitive induite par la tâche	36
2.3.2	La charge cognitive gérée par l'individu	37
2.3.3	La charge cognitive induite par l'environnement	42
2.3.4	L'évaluation de la charge cognitive	43
2.4	Les charges de travail, mentale et cognitive : synthèse	49
3	Les relations entre la charge de travail et le stress	51
4	Le signal de parole	57
4.1	La parole et la voix, même concept ?	57
4.1.1	La production des sons de parole	58
4.1.2	Les phonèmes du français	59
4.1.3	La production de la parole	61
4.2	Les indices acoustiques	64
4.2.1	Le plan segmental	64
4.2.2	Le plan supra-segmental	66
5	Les effets du stress dans le signal de parole	67
5.1	Les effets des stresseurs physiques sur la parole	68
5.2	Les effets des stresseurs physiologiques sur la parole	69
5.3	Les effets des stresseurs perceptuels sur la parole	70
5.4	Les effets des stresseurs psychologiques sur la parole	71
5.5	Les effets des stresseurs : synthèse	75
5.5.1	Nos questions de recherche	76

II Cadre méthodologique **77**

6 La démarche expérimentale	81
6.1 Le choix des tâches	81
6.1.1 La tâche de conduite	81
6.1.2 L'énonciation d'une litanie	84
6.1.3 Les opérations arithmétiques	87
6.1.4 Le test attentionnel	90
6.2 Le déroulement expérimental	91
6.3 Variables dépendantes et mesures associées	94
6.3.1 Les mesures de performance	94
6.3.2 Les mesures physiologiques	96
6.3.3 Les mesures acoustiques	96
6.3.4 Les mesures subjectives	101
6.4 Composition de l'échantillon	102

III Résultats **105**

7 Choix des procédures statistiques	109
7.1 Analyses inter-sujets	109
7.1.1 Analyse des scores de conduite	109
7.1.2 Analyse des scores de charge de travail	109
7.1.3 Analyse des scores attentionnels	109
7.1.4 Analyse des scores aux opérations span	110
7.1.5 Analyse de la fréquence fondamentale	110
7.2 Analyses individuelles	111
7.2.1 Analyse des scores aux tests attentionnels	111
7.2.2 Analyse des scores aux opérations span	112
7.2.3 Analyse du taux de nictation	112
7.2.4 Analyse de la fréquence fondamentale	112
7.2.5 Analyse des écarts inter-syllabiques	113
7.2.6 Corrélations	113
8 Analyses globales et inter-sujets	115
8.1 Evolution des performances de conduite	115
8.2 Evolution de la charge de travail ressentie	116
8.3 Evolution des performances attentionnelles	117
8.4 Evolution des performances aux tâches arithmétiques	118
8.5 Evolution de la fréquence fondamentale	120
8.6 Discussion des résultats	122
9 Analyse des profils de conduite	125
9.1 Nouveau regard sur les performances de conduite	125
9.2 Profilage des conducteurs	126
9.3 Evaluation des profils	128

10 Analyses individuelles	131
10.1 Analyse des résultats du sujet 1	131
10.1.1 Anamnèse du sujet	131
10.1.2 Evolution des performances et du ressenti	132
10.1.3 Evolution des paramètres physiologiques	134
10.1.4 Analyse des litanies	134
10.2 Analyse des résultats du sujet 3	141
10.2.1 Anamnèse du sujet	141
10.2.2 Evolution des performances	142
10.2.3 Analyse des litanies	144
10.3 Analyses des résultats du sujet 5	151
10.3.1 Anamnèse du sujet	151
10.3.2 Evolution des performances et du ressenti	151
10.3.3 Evolution des paramètres physiologiques	153
10.3.4 Analyse des litanies	154
10.4 Analyse des résultats du sujet 6	160
10.4.1 Anamnèse du sujet	160
10.4.2 Evolution des performances	161
10.4.3 Analyse des litanies	163
10.5 Analyse des résultats du sujet 11	170
10.5.1 Anamnèse du sujet	170
10.5.2 Evolution des performances	170
10.5.3 Analyse des litanies	172
10.6 Synthèse et discussion des résultats	178
11 Discussion générale	181
Références	183

Introduction

bla bla

Première partie

Cadre théorique

L'objet de ce travail est d'étudier les effets du stress induit par la charge de travail sur le signal de parole. Il nous paraît crucial de nous questionner sur les concepts fondamentaux que sont le stress, la charge de travail et le signal de parole. Nous avons donc décidé de scinder cette partie en cinq chapitres, lesquels se structurent en diverses sections. Afin de guider le lecteur, nous avons balisé notre revue au travers de questions, nous terminons chaque section par un paragraphe conclusif et nous résumons les informations les plus importantes dans des points de synthèse.

Le premier chapitre est consacré à une revue des définitions du stress et à la classification des facteurs de stress. Plusieurs modèles du stress, s'ancrant dans des approches physiologique, interactionniste et transactionnelle sont discutés. Nous établissons ensuite un parallèle entre ces modèles du stress et ceux des émotions.

Le deuxième chapitre porte sur les distinctions entre charge de travail, charge mentale et charge cognitive. Nous analysons les modèles les plus rencontrés dans la littérature et les confrontons. Nous nous focalisons ensuite sur la charge cognitive et sur ses déterminants.

A l'issue de ces deux premiers chapitres, nous en proposons un troisième qui est dédié à la présentation de notre modèle dynamique du stress induit par la charge de travail. Celui-ci intègre les caractéristiques des individus, de la tâche et de l'environnement. Nous pensons que ce dernier offre l'opportunité de mieux appréhender l'interaction entre ces trois composantes.

Dans le quatrième chapitre, nous traitons du signal de parole. Nous débutons celui-ci par une interrogation conceptuelle sur la voix et la parole. Afin d'être en mesure d'y répondre adéquatement, nous passons en revue les notions fondamentales impliquées dans la production de la parole. Nous présentons ensuite les principaux indices acoustiques observables dans le signal de parole.

Le dernier chapitre porte sur les effets du stress sur la production de parole. Après avoir présenté un modèle décrivant ces effets, nous avons fait le choix de structurer notre revue de la littérature en adoptant une classification des facteurs de stress. Enfin, à l'issue de cette synthèse, nous formulons nos questions de recherche.

Chapitre 1

Le stress

Le stress est un terme usité dans de nombreux domaines : les banques sont soumises à des *stress tests* pour évaluer leur capacité à résister à une nouvelle crise financière ; les ingénieurs *stressent* les nouveaux matériaux pour évaluer leur résistance ; le nombre de jours d'absence maladie en raison du *stress* s'accroît ; les victimes d'attentats souffrent parfois de *stress* post-traumatique, etc. Clairement, la notion de stress est très présente dans la vie quotidienne et, malgré une certaine polysémie, elle est globalement comprise par tout un chacun.

Pourtant, le concept de stress est loin d'être accepté de façon univoque dans la communauté scientifique. Ainsi, en psychologie, nous rencontrons diverses définitions comme en témoignent Murray, Baber, et South (1996) : lors d'un colloque consacré à l'étude de la parole sous les effets du stress, organisé par l'OTAN en 1995 à Lisbonne, ces auteurs rapportent au moins 5 définitions différentes glanées au fil des discussions : parmi celles-ci, citons la proposition de Gaillard et Wientjes (1994) que nous traduisons comme « *un état psycho-physiologique caractérisé par une pression subjective, par un dysfonctionnement de l'activité physiologique et par une détérioration des performances.* » (Murray et al., 1996, p. 5).

Plus récemment, d'autres chercheurs tels que Holmqvist, Santtila, Lindström, Sala, et Simberg (2013) conçoivent le stress comme le fruit de l'interaction complexe entre la psyché, la personnalité, les émotions, le coping, les capacités d'adaptation et les différences individuelles. Dans leur revue de la littérature, Giddens, Barron, Byrd-Craven, Clark, et Winter (2013) adoptent une approche théorique différente définissant le stress comme une rupture de l'homéostasie : selon eux, un facteur de stress perturbe un état stable et l'être humain s'adapte en adoptant des stratégies destinées à restaurer cet équilibre. Ces auteurs rapportent des variations conséquentes entre les individus car la sensibilité de chacun à la nature des facteurs de stress est différente, tout comme les stratégies mises en œuvre. Nous retrouvons cette notion d'équilibre mais dans une perspective différente dans les travaux de Lundberg (2002) qui s'appuie, quant à lui, sur la définition proposée par Frankenhaeuser et Arbetsmiljöfonden (1989) postulant que le stress consiste en un déséquilibre entre les demandes perçues depuis l'environnement et les ressources individuelles perçues pour y faire face.

De plus, à côté de ces définitions générales, Murray et al. (1996) en proposent une spécifique aux sciences de la parole que nous avons traduite comme suit : « *le stress se traduit dans la production de parole par diverses manifestations relevant de plusieurs domaines, il est causé par une exposition à des facteurs de stress.* » (Murray et al., 1996, p. 5). De même, Hagmueller, Rank, et Kubin (2006) adoptent une définition similaire en décrivant le stress comme une pression appliquée sur un individu, se traduisant par une

perturbation des processus de production de la parole observable dans le signal acoustique. Enfin, outre ces définitions, la littérature (pour une revue, voir (Guillet, 2012)) regorge de modèles tels que ceux de Selye (1956), de Cox et Mackay (1978) ou de Lazarus et Folkman (1984), tous ceux-ci tentent de décrire, au travers d'une approche spécifique, les mécanismes sous-jacents du stress.

Les quelques définitions présentées ci-dessus montrent à quel point le concept de stress est vaste. D'ailleurs, bien qu'ils ne soient pas en mesure d'y répondre totalement, Murray et al. (1996) ont le mérite de poser des questions très pertinentes à propos du stress : s'agit-il d'un phénomène relevant du conscient ou de l'inconscient, est-il spécifique ? Quels sont les facteurs susceptibles de l'engendrer ? Le stress est-il une cause, un processus ou une conséquence ? A ces premières interrogations, nous pouvons en ajouter d'autres : pourquoi tous les individus ne réagissent-ils pas de la même façon face à une situation stressante identique ? Pourquoi arrive-t-il qu'une personne, placée dans des situations stressantes similaires, se comporte différemment ?

Ces nombreuses questions méritent d'être traitées de façon approfondie, c'est pourquoi nous avons scindé la suite de cette partie en cinq sous-parties correspondant à des regards particuliers sur le stress.

1.1 Les facteurs de stress

Dans la littérature, les phénomènes susceptibles d'engendrer du stress sont désignés sous le terme de *stressor*, soit, dans une traduction littérale, "stresseur" (Bruchon-Schweitzer & Boujut, 2016) ou, plus littéraire, facteur de stress. Partant du constat que tous les individus ne réagissent pas de la même façon face à une situation stressante pourtant identique et que chaque facteur de stress n'induit pas le même effet, Baber et Noyes (1996) ont, dès lors, entrepris de les classer en deux catégories en fonction de leur nature. Ils ont ainsi identifié d'un côté des facteurs physiques parmi lesquels ils placent l'accélération, les vibrations et le bruit et de l'autre côté, les facteurs psychologiques qui comprennent les émotions, la charge mentale de travail ou encore la charge physique de travail.

S'inscrivant dans la même démarche, Murray et al. (1996) ont proposé une taxonomie des facteurs de stress affectant la production de parole, celle-ci est reproduite à la figure 1.1. Ils discriminent 4 types de facteurs de stress. La première catégorie englobe les facteurs physiques tels que le bruit, les vibrations, l'accélération, la luminosité et la température. La deuxième regroupe les facteurs chimiques tels que les toxines environnementales, les médicaments, les drogues, l'alcool, la fatigue ou encore la privation de sommeil. La troisième comprend les facteurs physiologiques comme les maladies de courtes et de longues durées, les affections neurologiques permanentes et la privation de sommeil. Enfin, la dernière catégorie rassemble les facteurs également dénommés physiologiques au sein desquels les auteurs ont placé les émotions, l'anxiété, la dépression, la charge de travail, l'entraînement, l'expérience ou encore la mémoire.

Taxonomy of stress factors affecting speech	
PHYSICAL	Noise
	Exercise/repetition
	Environment-related
	G-force
	Vibration
	Noise
	Temperature *
CHEMICAL	Fatigue
	Sleep deprivation *
	Environmental toxins
	Medicines (prescribed drugs)
	Narcotics (non-prescribed drugs)
	Alcohol
Other chemicals	
PHYSIOLOGICAL	Short duration (illness)
	Long duration (disease)
	Permanent (neurological)
	Sleep deprivation *
PHYSIOLOGICAL	Emotion-related
	Anger
	Happiness
	etc.
	Anxiety
	Depression *
	Workload *
	Training *
Experience *	
Memory *	

FIGURE 1.1 – Taxonomie des stressseurs (Murray et al., 1996, p. 9).

Cette taxonomie avancée par Murray et al. (1996), bien qu'intéressante, est interpellante à plus d'un titre : tout d'abord, certains facteurs de stress tels que la privation de sommeil sont présents dans deux classes. Ensuite, d'autres facteurs de stress comme la dépression ou la température sont accolés d'une astérisque dont la signification n'est pas détaillée. Enfin, les troisième et quatrième catégories portent le même nom. En nous basant sur la distinction opérée par Baber et Noyes (1996), nous postulons qu'il s'agit d'une malencontreuse erreur d'encodage et que la dernière catégorie concerne en fait les facteurs psychologiques. Si notre supposition s'avère exacte, elle montre toute l'importance d'une lecture critique. Néanmoins, si attribuer le même nom aux troisième et quatrième catégories était bien l'intention des auteurs, nous pensons que cela renforce la confusion autour de ce concept.

Quelques années plus tard, cette catégorisation a d'ailleurs été affinée par Hansen et al. (2000) qui ont conservé l'idée des 4 niveaux introduits par Murray et al. (1996). Ces auteurs ont choisi des noms plus explicites pour chaque niveau taxonomique, ils ont revu la hiérarchie entre les classes et ont veillé à les rendre plus hermétiques, évitant ainsi qu'un même facteur de stress n'appartienne à plusieurs niveaux. Ces améliorations apportent, selon nous, non seulement une vraie plus value en terme de conceptualisation et de compréhension, mais constituent également une réelle avancée de par les liens que ces auteurs ont établis avec un modèle de production de parole. Ce dernier est discuté dans la partie de ce travail consacrée aux effets du stress sur le signal de parole.

Concrètement, les quatre niveaux, synthétisés à la table 1.1 sont ordonnés de 0 à 3.

Niveaux	Descriptions	Exemples
0	Physique	Vibrations, accélération, équipement porté, pression atmosphérique, composition de l'air...
1	Physiologique	Médicaments, drogue, alcool, nicotine, fatigue, privation de sommeil, déshydratation, maladie, anesthésie...
2	Perceptuel	Bruit, canal de communication pauvre, incompréhension de la langue...
3	Psychologique	Emotions, charge de travail, anxiété liée à la tâche, anxiété liée à l'environnement...

TABLE 1.1 – Classification des facteurs de stress d'après Hansen et al. (2000)

Depuis, cette taxonomie a été adoptée par de nombreux chercheurs étudiant les effets du stress sur la production de parole : par exemple, Hagmueller et al. (2006) l'ont reprise intégralement dans leurs travaux sans y apporter de modifications, Fernandez et Picard (2003) s'y réfèrent explicitement et d'autres comme Holmqvist et al. (2013) la confortent en classant les émotions comme un facteur de stress psychologique ou encore Yu, Hansen, et Oard (2014) qui qualifient l'apesanteur, la pression atmosphérique et l'accélération de facteurs de stress physiques.

Nous avons décidé de commencer notre étude du stress par la catégorisation des facteurs de stress car, bien que celle-ci ne contribue pas directement à la définition du concept, elle met en évidence une de ses caractéristiques principales : le stress est un phénomène complexe potentiellement provoqué par de nombreuses sources, lesquelles n'ont pas nécessairement les mêmes effets chez tous les individus. Toutefois, en fonction des niveaux impliqués dans l'émergence du stress, des effets plus ou moins robustes peuvent être observés chez les locuteurs. De plus, cette classification a le mérite d'aider le chercheur en lui fournissant un fil rouge pour confronter les résultats issus d'études très diversifiées. Enfin, comme nous le verrons plus loin, des liens forts sont établis avec la production de parole.

1.2 Approche physiologique du stress

Dans son ouvrage de synthèse sur le stress, Guillet (2012) montre que l'idée postulant que le stress est une réaction biologique face à un événement bouleversant l'équilibre du corps humain, aussi appelé homéostasie, est loin d'être récente. On la retrouve déjà dans le modèle du Syndrome Général d'Adaptation (S.G.A.) de Selye (1956), lui même basé sur les travaux de Cannon (1932). Ce modèle, illustré à la figure 1.2, comporte trois étapes : la première est la réaction d'alarme durant laquelle le corps répond à une perturbation en mobilisant des ressources ; la deuxième correspond à la phase de résistance qui permet aux ressources de se régénérer grâce à une mobilisation plus forte qu'en situation normale. Ce stade est une en quelque sorte une compensation qui requiert beaucoup d'investissements de la part de l'individu ; enfin, la troisième étape, appelée phase d'épuisement, survient lorsque les ressources deviennent déficitaires et ne permettent plus de faire face à l'élément perturbateur.

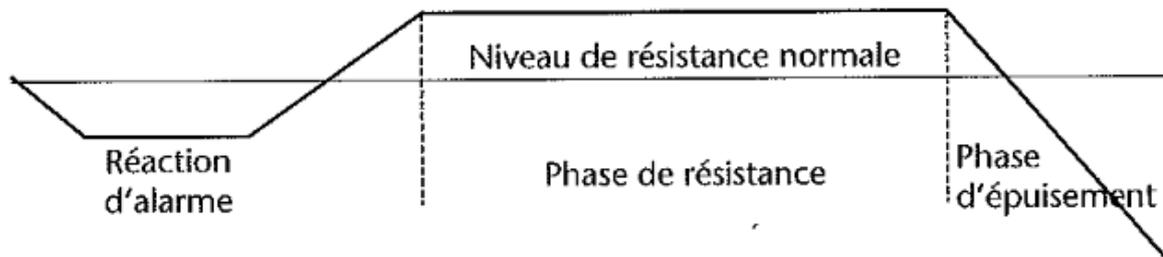


FIGURE 1.2 – Modèle SGA de Selye (Guillet, 2012, p. 13).

Lorsque l'être humain est soumis à des facteurs de stress de façon chronique, il ne met plus en place ses mécanismes d'adaptation visant un retour à l'équilibre homéostatique (Giddens et al., 2013). Ce manque d'adaptation se manifeste par un affaiblissement du système immunitaire, des dérèglements, des inflammations, des dysfonctionnements du métabolisme conduisant à un accroissement des risques cardio-vasculaires et ralentit les processus de guérison (Lundberg, 2002).

La réponse à un facteur de stress est gérée par au moins deux zones du cerveau : l'axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien (*HPA - Hypothalamic-Pituitary-Adrenal*) et le système nerveux autonome (*ANS - Autonomic Nervous System*). Le premier est activé par les facteurs de stress psychologiques, en particulier ceux qui sont imprévisibles et aléatoires, il entraîne la libération de cortisol dans l'organisme. Le système nerveux autonome est impliqué dans la sécrétion de deux catécholamines : l'épinéphrine et la norépinéphrine (Lundberg, 2002). Le système nerveux autonome se caractérise, comme son nom l'indique, par une aptitude à s'adapter de manière automatisée en commandant très rapidement avec les organes qu'il contrôle.

Les catécholamines influencent de nombreuses fonctions corporelles et divers organes et déclenchent, entre autres, l'accélération des rythmes cardiaque et respiratoire ainsi que la hausse de la pression artérielle (Giddens et al., 2013). Ces modifications physiologiques ne sont pas, comme nous le verrons plus loin, sans conséquence sur la production de la parole.

Le niveau de cortisol dans le corps est considéré comme un indicateur objectif du stress, il mesurable dans l'urine (Giddens et al., 2013) ou dans la salive en étudiant, par exemple, la concentration de 3-Methoxy-4-hydroxyphenylglycol (MHPG). Le MHPG provient de la dégradation de la noradrénaline par la Monoamine Oxydase (MAO) et la Catéchol O méthyl Transférase (COMT). Cette métabolisation a directement lieu au niveau de la synapse, principalement dans le cerveau. Les produits de métabolisation sont libérés dans la circulation sanguine et sont présents dans la salive. La concentration en MHPG libre dans la salive est directement corrélée avec les concentrations plasmatiques et dans le liquide céphalo-rachidien (Romoaldo, 2015).

Selon Lundberg (2002), le niveau de cortisol augmente principalement sous l'effet des émotions comme la peur, du stress ou de l'anxiété.

Ce premier regard physiologique sur le stress est très instructif : il permet d'objectiver ce concept comme une processus non spécifique de l'organisme visant à restaurer l'équilibre du corps. Vu sous cet angle, le stress est donc une processus biologique, inconscient, non contrôlé, mesurable et engendré

par des facteurs de stress. Cette réaction du corps implique des modifications biologiques à courts et à longs termes, certaines d'entre elles affectant potentiellement la production de parole.

1.3 Approche interactionniste du stress

Le stress a également une dimension individuelle : en effet, le réduire à une simple réaction biologique inconsciente et non spécifique ne permet pas d'expliquer pourquoi tous les individus ne se comportent pas de la même manière face à un facteur de stress identique. A titre d'exemples, Ruiz, Absil, Harmegnies, Legros, et Poch (1996) ont montré que, au travers de l'analyse des conversations récupérées dans l'enregistreur phonique de vol (CVR) d'un avion s'étant écrasé, le pilote et le copilote n'ont pas réagi au stress de la même façon alors qu'ils étaient dans le même environnement et accédaient aux mêmes informations.

Ainsi, pour expliquer ce constat, d'autres définitions tentent d'intégrer une dimension subjective au stress, par exemple Frankenhaeuser et Arbetsmiljöfonden (1989) conçoivent le stress en terme de déséquilibre entre les demandes émanant de l'environnement et les ressources individuelles disponibles pour y faire face. Cet écart entre les demandes et les ressources varie en fonction des caractéristiques de l'environnement et de l'individu.

Un modèle illustre bien cette approche : le système écologique et humain avancé par Kagan et Levi (1975), reproduit à la figure 1.3. Ce système prend en compte à la fois les caractéristiques de l'individu et celles de l'environnement.

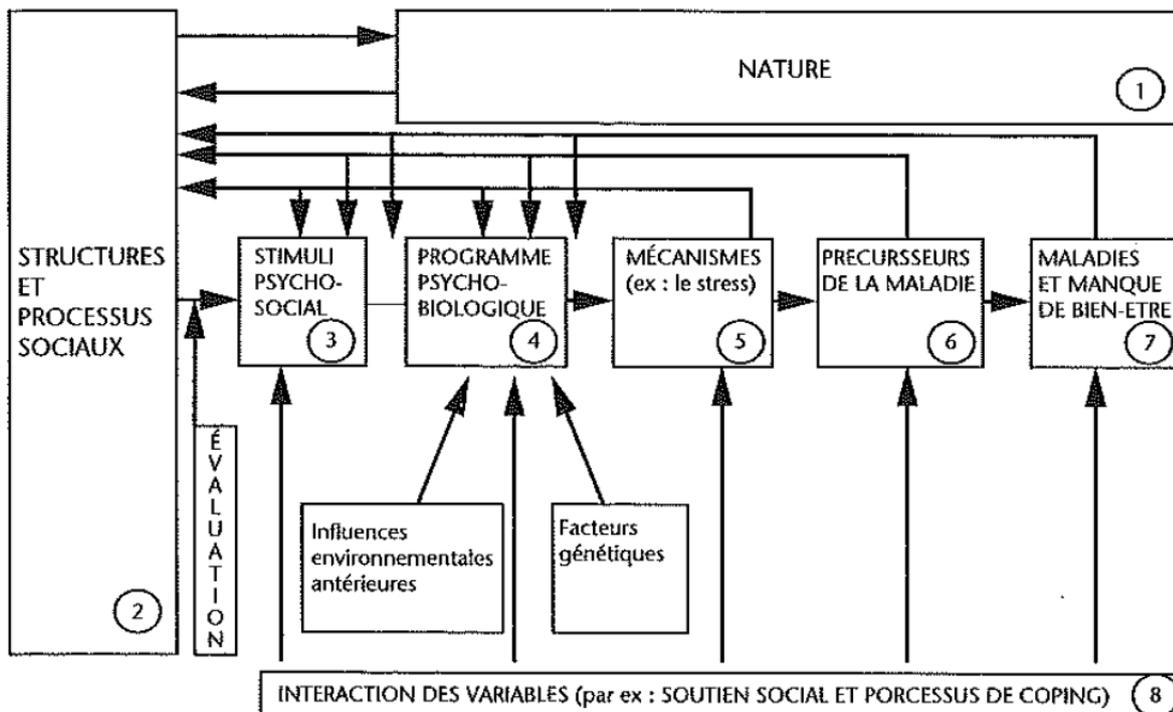


FIGURE 1.3 – Système écologique humain de Kagan et Levi (1975) (Guillet, 2012, p. 13).

Ce modèle postule que les stimuli psycho-sociaux provoquent des changements physiologiques entraînant des maladies ou diminuant le bien-être. Le stress est ici considéré

comme un mécanisme entraînant une réponse physiologique stéréotypée d'un individu particulier qui se manifeste en présence ou en l'absence de certaines variables telles que les émotions, le soutien moral et de prédispositions personnelles comme les capacités à faire face et à résoudre des problèmes (Guillet, 2012). La prise en compte de la relation entre le sujet et le contexte permet d'expliquer pourquoi, face à un même stimulus stressant, certaines personnes développent une réaction de stress alors que d'autres y sont totalement insensibles.

Ce deuxième regard met en évidence que le stress n'est pas seulement un processus automatique, c'est également un mécanisme conditionné par l'interaction entre les variables individuelles et environnementales : la présence ou l'absence de stimuli environnementaux et de caractéristiques spécifiques à l'individu peut inhiber ou favoriser l'émergence du stress et donc ses conséquences sur l'organisme. Cette vision permet d'expliquer pourquoi des différences sont observées entre des individus soumis à un même facteur de stress.

1.4 Approche transactionnelle du stress

Si les modèles mis en avant jusqu'à présent offrent une meilleure compréhension du stress, certaines questions restent néanmoins sans réponse : la présence ou l'absence de variables individuelles et environnementales n'explique en rien pourquoi un individu placé à plusieurs reprises dans un environnement identique n'éprouve pas systématiquement le même stress et, par conséquent, ne développe pas les mêmes réponses comportementales. Par exemple, Wittels, Johannes, Enne, Kirsch, et Gunga (2002) ont montré que des soldats, soumis à un stresser psychologique, la peur ressentie avant de sauter en rappel dans le vide, présentent moins de stress lors de leur troisième saut.

L'approche transactionnelle apporte un nouvel élément : ce n'est pas uniquement l'interaction entre les variables qui conditionne l'émergence du stress mais bien l'évaluation cognitive qu'en fait le sujet. Ainsi, la prise en compte de la perception des variables environnementales et individuelles par l'être humain est au centre des modèles transactionnels.

Nous retrouvons, tant pour les demandes que pour les ressources, cette distinction entre réalité et perception dans le modèle élaboré par Cox et Mackay (1978), lequel est reproduit à la figure 1.4.

La partie supérieure de ce modèle représente d'une part les capacités et les demandes réelles et d'autre part les capacités et les demandes perçues. L'individu procède à une appréciation cognitive en analysant l'écart qui existe entre les demandes et les capacités qu'il perçoit. Lorsque les capacités sont perçues comme insuffisantes pour faire face à la situation, le stress devient manifeste. Il alimente ainsi l'expérience émotionnelle du sujet et déclenche une réponse de stress qui prend deux formes : la première est psychologique avec, d'une part, une défense cognitive qui modifie la perception des capacités et, d'autre part, une réponse comportementale qui a pour but de répondre à la demande réelle et ainsi de réduire la demande perçue. La seconde forme de la réponse de stress est d'ordre physiologique.

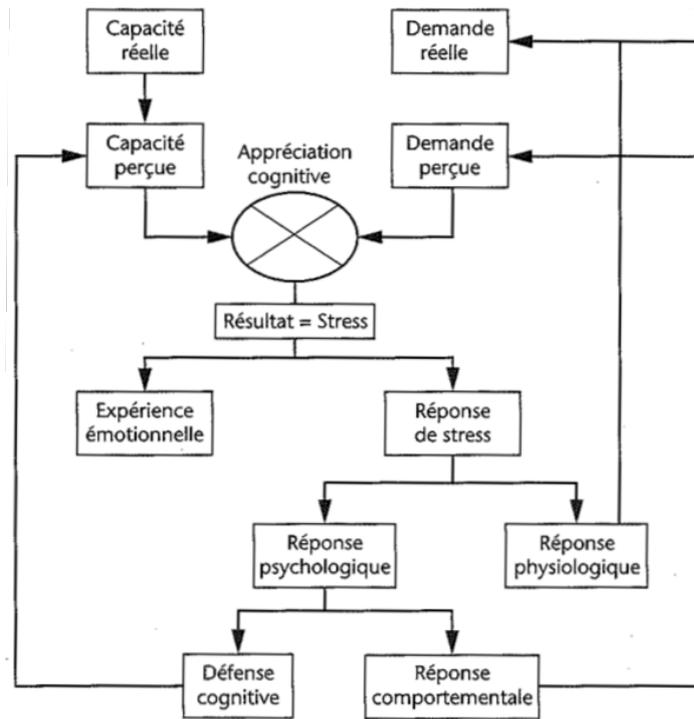


FIGURE 1.4 – Le modèle transactionnel de Cox et Mackay (1978) (Guillet, 2012, p .29)

Ce modèle est, selon nous, remarquable pour diverses raisons. Tout d’abord, il prend en compte les constats mis en évidence par les approches physiologique et interactionniste en intégrant, d’une part, des réponses visant à rétablir l’équilibre homéostatique et, d’autre part, des variables individuelles et environnementales. Ensuite, il met en évidence une appréciation cognitive qui va déterminer l’émergence du stress. La dimension cognitive de cette appréciation n’est pas anodine et retient particulièrement notre attention, nous y reviendrons d’ailleurs dans la partie de ce travail dédiée à la charge cognitive. Nous pouvons déjà souligner que cette appréciation cognitive est accessible au contrôle conscient de l’individu. Enfin, ce modèle met en avant des mécanismes de rétroaction. Ainsi, selon Cox et Mackay (1978), si la réponse psychologique déclenchée par le stress se traduit par une réponse comportementale inappropriée, cette dernière ne diminue pas vraisemblablement pas la demande réelle, laquelle se répercute, en partie tout du moins, sur la demande perçue. La réponse psychologique conduit également l’individu à réévaluer la quantité de ressources qu’il peut mobiliser, ce mécanisme est appelé défense cognitive. Par exemple, la motivation d’un sujet peut l’inciter à revoir à la hausse la perception de ses capacités. En fonction de l’évolution de la situation, le sujet peut décider d’adopter une autre réponse comportementale ou d’inhiber simplement toute réponse en ignorant la demande réelle grâce à la minimisation la demande perçue (Guillet, 2012).

S’inscrivant dans la même logique, Lazarus et Folkman (1984) ont construit un modèle du stress, dont la dernière itération est reproduite à la figure 1.5. Ce dernier se distingue des modèles précédents par la place importante qu’il attribue au coping et aux émotions.

Dans la première version de leur modèle, Lazarus et Folkman (1984) identifient deux grands types de stratégies de coping. Le premier type, appelé coping vigilant, est centré sur le problème et vise à réduire les demandes perçues et/ou à augmenter les capacités que l'individu pense pouvoir mobiliser pour mieux faire face à la situation. Au contraire, le second type, dénommé coping évitant, est centré sur les émotions et a pour objectif de rendre plus supportable les perturbations liées à l'événement stressant grâce à une régulation émotionnelle, celle-ci pouvant être physiologique, comportementale ou cognitive.

Par la suite, en fonction de l'efficacité des stratégies de coping, deux cas de figure sont possibles : soit l'issue est favorable, le sujet est alors parvenu à dominer ou à supporter la situation, ce qui lui prodigue des émotions positives, soit elle est défavorable et cela engendre de la détresse qui, à son tour, induit des émotions négatives. Dans la version révisée du modèle, Folkman (2008) a ajouté un troisième type de stratégies de coping : il s'agit des stratégies centrées sur la signification. Contrairement aux deux premiers types, ces stratégies sont "positives" car elles induisent des émotions positives, elles consistent à tirer profit de la situation, à revoir ses ambitions et ses priorités. En outre, les stratégies de coping centrées sur la signification offrent l'opportunité à l'individu de rechercher du soutien social et de restaurer ses ressources.

Enfin, nous pensons que ce modèle est actuellement la meilleure représentation du processus de stress car il permet aussi de faire le lien avec les émotions que nous allons brièvement aborder dans la sous-partie suivante.

En conclusion, nous pouvons affirmer que le regard transactionnel est vraiment riche pour expliciter le stress : il place l'individu au cœur de ce concept : l'émergence du stress est conditionnée à plusieurs évaluations cognitives, largement influencées par la situation, des exigences perçues, des ressources estimées mais aussi de l'efficacité des stratégies de coping mises en œuvre pour faire face à la situation et des émotions provoquées. Le modèle révisé du stress et du coping de Folkman (2008) introduit, au travers des stratégies de coping, des processus dynamiques, volontaires et contrôlés sans pour autant remettre en cause les conséquences inconscientes et automatiques sur l'organisme. Les caractéristiques des stratégies de coping apportent ainsi une justification satisfaisante aux variations intra-individuelles observées face à des facteurs de stress.

1.5 Le stress et les émotions

Avant de conclure sur le stress, nous proposons d'accorder un peu d'attention au concept des émotions et, surtout, de présenter le modèle des composantes de Sander et Scherer (2014), reproduit à la figure 1.6 car il présente non seulement des similitudes importantes avec le processus du stress mais encore des liens forts avec d'autres notions qui seront abordées dans la partie traitant de la charge cognitive. Par ailleurs, rappelons que les émotions ont une place importante à côté du stress : Hansen et al. (2000) les intègrent dans leur taxonomie des stressseurs et Folkman (2008) affirme que le stress peut les engendrer.

Les émotions ou plutôt les épisodes émotionnels sont définis par Sander et Scherer (2014) comme des sentiments subjectifs de courte durée associés à des changements psychophysiologiques, à des expressions motrices et des tendances à l'action liées à une évaluation cognitive qui actionnent de manière synchrone plusieurs systèmes du corps humain.

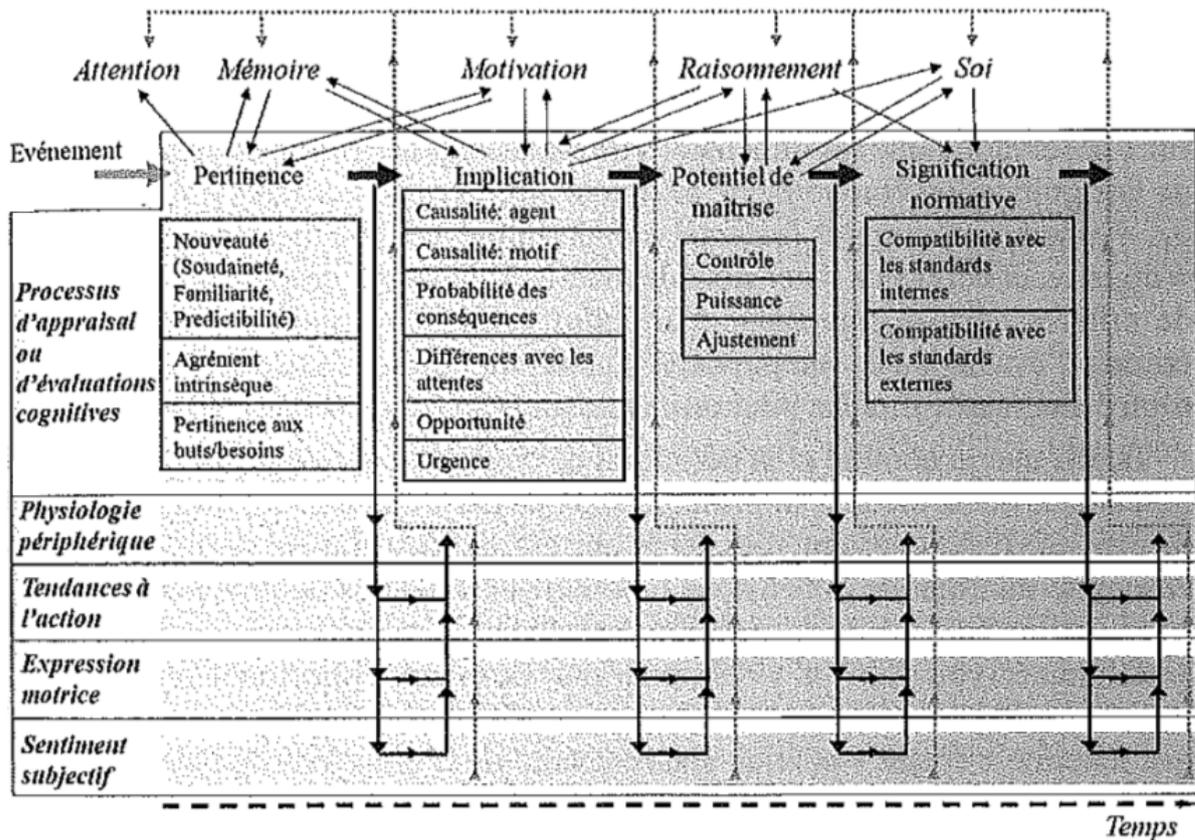


FIGURE 1.6 – Le modèle des composantes de Sander et Scherer (2014, p. 45)

Le modèle des composantes de Scherer est le fruit de nombreuses évolutions basées sur de multiples recherches (Cowie & Cornelius, 2003 ; Scherer, 2003 ; Philippot, 2007 ; Patel, Scherer, Björkner, & Sundberg, 2011). Lorsqu'un événement interne ou externe survient, il est apprécié par plusieurs processus d'évaluation cognitive répartis dans 4 composantes : la pertinence, l'implication, le potentiel de maîtrise et la signification normative. Ces composantes font appel à l'attention, la mémoire, la motivation, le raisonnement et l'estime de soi. Entre chaque composante, des réponses physiologiques et comportementales agissent sous la forme de rétroactions.

Les processus d'évaluation cognitive relevant de la pertinence traitent de la nouveauté de l'événement : en fonction de celle-ci, des ressources attentionnelles sont attribuées. L'appréciation de l'agrément intrinsèque consiste en l'analyse de la valence de l'événement, c'est-à-dire s'il est positif, agréable ou négatif, désagréable. Enfin, la pertinence par rapport aux buts et aux besoins vise à évaluer de quelle manière l'événement va affecter la hiérarchie des besoins et des buts de l'individu. Comme pour l'agrément intrinsèque, ce processus fait appel à la mémoire.

Les processus d'évaluation cognitive de l'implication visent à déterminer si l'événement est un facilitateur pour satisfaire les besoins et atteindre les objectifs ou si, au contraire, il est un frein à l'atteinte de ceux-ci. La causalité est appréciée par l'identification de l'agent responsable de l'événement et par les mobiles de celui-ci. Les conséquences probables engendrées par l'événement sont prises en compte et la compatibilité de ce dernier avec les attentes est analysée afin de statuer sur l'opportunité qu'il représente. Enfin, la priorité de l'événement est considérée dans le critère d'urgence.

Les processus d'évaluation cognitive portant sur le potentiel de maîtrise sont au nombre

de trois. Le premier est le contrôle, il exprime la faculté d'influer ou non sur l'événement. La puissance, elle, représente la quantité de moyens que le sujet possède pour contrôler l'événement et ses conséquences : si celle-ci est faible, la fuite (*flight*) est privilégiée alors que dans le cas inverse, c'est une réaction d'attaque (*fight*) qui est retenue (Cowie & Cornelius, 2003). Le troisième critère est l'ajustement : il s'agit, pour l'individu, d'étudier comment il peut s'ajuster à l'événement et à ses conséquences.

La quatrième composante regroupe les processus d'évaluations cognitives relatifs à l'estime de soi en observant la compatibilité des émotions avec les valeurs du sujet et de la société à laquelle il appartient. Par exemple, lors d'un décès, l'expression de la tristesse dépendra des valeurs et de l'image que la personne a d'elle-même, des modalités des funérailles et des personnes présentes dans l'assistance.

Outre le fait que ce modèle soit capable de différencier des émotions proches (Patel et al., 2011), il possède de nombreuses similitudes avec les modélisations transactionnelles du stress de Cox et Mackay (1978) et de Lazarus et Folkman (1984) : tous s'articulent autour d'une approche subjective reposant sur des évaluations cognitives. Les deux premières composantes du modèle de Sander et Scherer (2014) s'apparentent à la perception des demandes de l'environnement, les deux dernières à la perception des capacités, lesquelles sont influencées par la motivation et par l'estime de soi. De plus, les aspects physiologiques sont présents dans l'ensemble des modélisations. Enfin, nous établissons un parallèle entre le critère d'ajustement du modèle des composantes de Sander et Scherer (2014) et les stratégies de coping de Lazarus et Folkman (1984).

En conclusion, il nous paraît évident que le stress et les émotions partagent plusieurs propriétés : ils sont le fruit d'évaluations cognitives conséquentes à l'apparition d'un événement et se manifestent par des réactions physiologiques et comportementales.

1.6 Le stress : synthèse

Grâce à l'ensemble des éléments collectés dans les quatre sous-parties précédentes, nous pouvons désormais proposer notre propre définition du stress. Tout d'abord, le stress est processus subjectif, complexe et itératif qui se caractérise par des flux d'entrée et de sortie. Nous en proposons une schématisation simplifiée à la figure 1.7.

En amont du processus de stress se trouve un événement potentiellement stressant qui présente un ou plusieurs types de stressseurs. L'exposition chronique à des facteurs de stress peut entraîner des désagréments tels qu'un affaiblissement du système immunitaire.

Le processus du stress consiste en une transaction entre un individu singulier et ces facteurs de stress. Cette transaction implique plusieurs évaluations cognitives qui déterminent les demandes et les ressources perçues. Lorsque les demandes perçues sont plus importantes que les ressources estimées ou que le bien-être est menacé, le stress apparaît.

Le stress engendre plusieurs flux de sortie : premièrement, des réponses automatisées, non spécifiques, peu accessibles à la conscience, elles sont essentiellement de nature physiologique. Deuxièmement, des stratégies de coping sont consciemment mises en œuvre pour tenter de faire face ou de mieux supporter les facteurs de stress. Troisièmement, découlant de l'effet des stratégies de coping, des émotions, tantôt positives, tantôt négatives sont ressenties. Ces flux de sorties, ou réponses de stress, jouent un rôle de rétroaction à la fois sur l'événement et sur le processus d'évaluations cognitives.

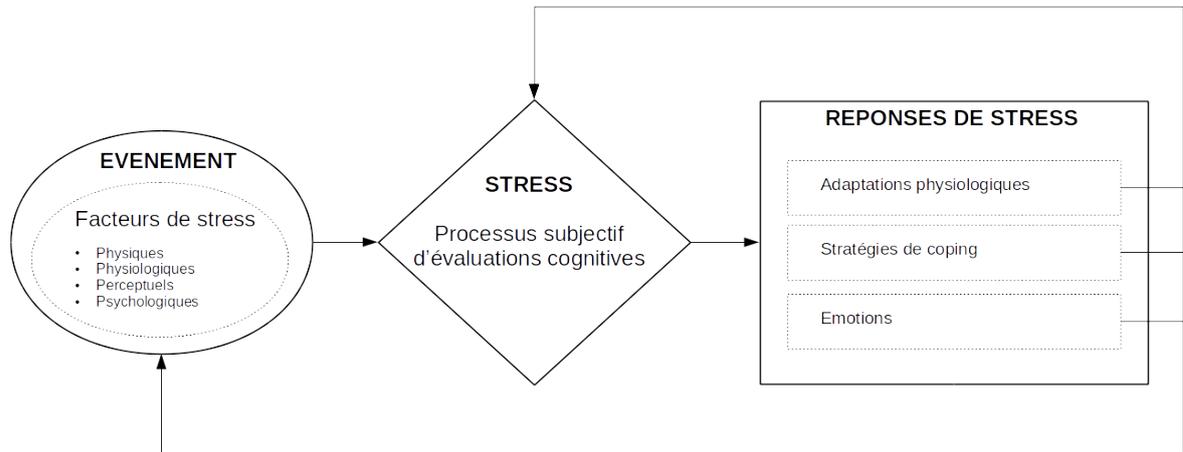


FIGURE 1.7 – Modèle simplifié du processus de stress

Nous proposerons une schématisation plus approfondie dans la suite de ce travail, cette seconde modélisation sera centrée sur un facteur de stress spécifique, le stress psychologique cognitif.

Chapitre 2

La charge de travail, la charge mentale et la charge cognitive

Depuis plus de 50 ans, l'homme est de plus en plus régulièrement aux commandes de systèmes dont la complexité et l'automatisation sont croissantes. En règle générale, la sécurité est primordiale dans la conduite de tels systèmes, c'est notamment le cas des centrales nucléaires, de la gestion des réseaux électriques, des trafics aérien, ferroviaire, maritime et routier. Pourtant, des incidents, parfois anodins, se sont transformés en accidents à cause d'une succession d'erreurs et de mauvaises décisions prises par les opérateurs. Celles-ci ont mis en lumière l'importance des facteurs humains (Megaw, 2005), c'est pourquoi ils font l'objet de nombreuses études, de définitions multiples et de modélisations variées.

Ainsi, l'interaction entre les demandes induites par une tâche complexe, la performance et les capacités humaines est investiguée depuis plus de 30 ans (da Silva, 2014). Le concept de charge de travail est né de ces recherches, principalement dans le secteur aéronautique et spatial, qui fait figure de pionnier en la matière. Selon les domaines concernés, les centres d'intérêt des commanditaires et les points de vue adoptés par les chercheurs, le concept de charge de travail s'est diversifié en plusieurs notions, dont la charge cognitive.

En effet, la littérature foisonne aujourd'hui de concepts plus ou moins proches de celui de la charge cognitive : nous retrouvons ainsi les termes de *workload* (Hart & Staveland, 2005 ; Hagmueller et al., 2006 ; Lin et al., 2012), *mental load* (Johannes et al., 2007 ; da Silva, 2014), *mental workload* (Brookhuis & de Waard, 2010), *charge mentale de travail* (Martin, Hourlier, & Cegarra, 2013), *cognitive load* (Khawaja, Chen, Owen, & Hickey, 2009 ; Huttunen, Keränen, Väyrynen, Pääkkönen, & Leino, 2011 ; Le, Ambikairajah, Epps, Sethu, & Choi, 2011), ainsi que d'autres concepts comme *emotional load* (Wittels et al., 2002) ou *physical load* (Johannes et al., 2007).

Même si toutes ces notions entretiennent des liens étroits, nous allons tenter de les classer et de les mettre en perspective pour guider notre propos. Comme Roskam et al. (2002) et Hart et Staveland (2005), nous avons scindé la charge de travail en plusieurs entités.

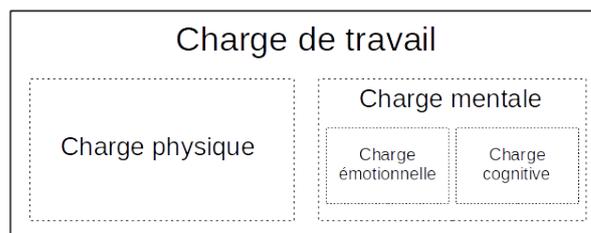


FIGURE 2.1 – Composantes de la charge de travail

La classification des types de charge, présentée à la figure 2.1, poursuit un objectif purement didactique : nous avons considéré ici que la charge de travail est le concept le plus vaste incluant la charge physique de travail et la charge mentale de travail. Nous avons également scindé en deux la charge mentale de travail en distinguant la charge émotionnelle et la charge cognitive. Signalons que certains auteurs, tels que Sperandio (1988), considèrent que procéder à une distinction entre les types de charge est peu pertinent car toute tâche implique de mobiliser des ressources physiques et mentales. Par ailleurs, nous avons fait le choix d’aborder certaines définitions ou certains modèles tantôt dans la charge de travail, tantôt dans la charge mentale de travail, tantôt dans la charge cognitive en nous basant sur leur degré de spécialisation : un modèle général, comme par exemple celui de (de Waard, 1996), est présenté dans la partie traitant de la charge de travail alors que, dans le texte original, l’auteur le discute comme un modèle de charge mentale mais le décrit au travers du concept de la charge de travail.

2.1 La charge de travail

Hagmueller et al. (2006) définissent la charge de travail comme le niveau, dépendant du sujet, de capacités utilisées pour réaliser une tâche. Ce niveau varie en fonction de la complexité de la tâche ou de la quantité de travail. La charge de travail correspond à la quantité de ressources à mobiliser pour mener à bien un ensemble de tâches concurrentes.

Dans le domaine aéronautique, la charge de travail est connue pour être facteur critique affectant directement la sécurité aérienne : 63,7% des accidents ont lieu au décollage, 31,6% à l’atterrissage et à peine 4,8% en vol. (Lin et al., 2012). Les phases de décollage et d’atterrissage se caractérisent par une charge de travail conséquente. Pour maintenir des performances optimales, il convient donc de veiller à ce que la charge de travail reste contenue à un niveau acceptable.

Dans le cadre de sa thèse, de Waard (1996) a construit une modélisation affinée de la relation entre les performances et la charge de travail en fonction de la charge de la tâche. La charge de la tâche correspond aux exigences objectives de la tâche tandis que la charge de travail est un construit subjectif des exigences perçues et des efforts requis pour y faire face (Hagmueller et al., 2006). Son modèle, reproduit à la figure 2.2, est régulièrement cité et utilisé (Hagmueller et al., 2006 ; da Silva, 2014).

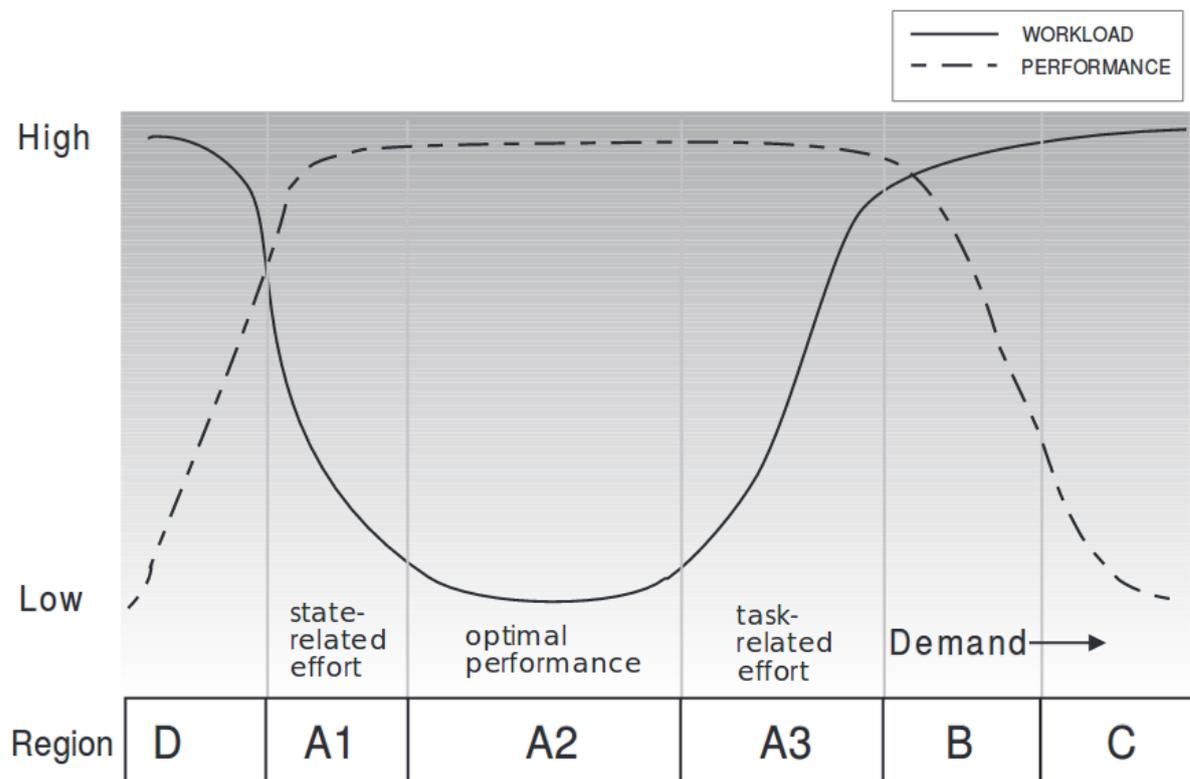


FIGURE 2.2 – Relations entre charge de travail et performances (de Waard, 1996, p. 24)

De prime abord, ce modèle peut sembler complexe à comprendre. L'axe des abscisses représente la charge de la tâche : plus on se déplace sur la gauche, moins la tâche est exigeante, celui des ordonnées reflète une intensité : plus on se déplace vers le bas, moins la charge de travail (ligne continue) et les performances (ligne brisée) sont élevées. Ce modèle est décomposé en 6 régions qu'il est plus simple de présenter partant de la zone A2 où les performances sont optimales.

Dans les régions A, les demandes de la tâche ne sont ni trop faibles, ni trop fortes, la charge de travail est faible et les performances sont élevées. La relation entre charge de travail et performance est optimale dans la région A2. En effet, dans celle-ci, le sujet peut conserver un niveau de performance stable sans consentir d'efforts supplémentaires même si la difficulté de la tâche s'accroît.

Dans la région A3, les exigences de la tâche augmentent, ainsi pour maintenir une performance constante, l'opérateur doit impérativement accentuer son effort. Si cet effort est occasionnel et pas trop important, il s'agit d'une compensation qui illustre la flexibilité et l'adaptabilité du sujet (da Silva, 2014).

Dans la région B, les exigences de la tâche continuent de s'accroître, la charge de travail atteint un niveau très élevé, si bien que, malgré les efforts consentis par l'individu, les performances diminuent.

Dans la région C, les exigences de la tâche sont si élevées que, bien que la charge de travail soit maximale, les performances tombent à un niveau très faible. Cette situation, dans laquelle l'individu, à court de ressources disponibles, ne peut plus faire accomplir la tâche avec un niveau de performance suffisant est appelée surcharge (Brookhuis & de Waard, 2010).

A l'inverse, dans la région A1, les exigences de la tâche sont faibles, si bien que la tâche devient monotone. La charge de travail augmente car le sujet doit fournir un effort pour rester impliqué dans la réalisation de la tâche et garder un niveau de performance élevé.

Enfin, dans la région D, la charge de la tâche est tellement faible que, malgré les efforts de l'individu qui conduisent la charge de travail à son niveau maximal, les performances chutent à un niveau très bas. Cette situation, appelée sous-charge, est caractérisée par un manque d'attention sur la tâche et par une chute des performances, elle peut induire de l'ennui et du stress à cause de la frustration (Hagmueller et al., 2006).

Nous avons abordé ce modèle au sein de cette partie car il peut, selon nous, s'appliquer aussi bien à la charge mentale de travail qu'à la charge physique. D'un point de vue physique, étudions, par exemple le fonctionnement d'un muscle : s'il est soumis à une charge physique moyenne, il délivre des performances optimales et se renforce même, c'est ce qui se produit lorsqu'un individu pratique régulièrement un sport. Si le muscle est soumis à une charge élevée, il risque de s'endommager au point de ne plus délivrer aucune performance, c'est ce qui se produit lorsqu'un individu lève un poids trop lourd pour lui et que les fibres musculaires finissent par se déchirer. A l'inverse, une trop faible sollicitation d'un muscle entraîne une fonte musculaire qui diminue ainsi sa force maximale, soit ses performances, cette situation est fréquente en apesanteur.

D'un point de vue mental, illustrons ce modèle par un exemple pris dans le transport routier : un conducteur circulant sur une route variée avec un trafic moyen contrôle son véhicule en toute sécurité à une vitesse optimale. Si ce même conducteur roule sur une route sinueuse, avec un trafic très dense et sous des conditions météorologiques difficiles, il doit réduire fortement sa vitesse sous peine de risquer un accident. Au contraire, s'il circule de nuit sur une route rectiligne sans croiser aucun véhicule, le conducteur risque également un accident à cause de la déconcentration. En fonction de la hausse ou de la chute des exigences de la tâche, la nature des efforts à consentir diffère : Mulder (1986) en distingue deux types : l'effort de calcul et l'effort de compensation. L'effort de calcul est consacré au traitement des informations en mode contrôlé, il est fourni lorsque la charge de la tâche augmente pour maintenir un niveau de performance satisfaisant. L'effort de compensation vise à maintenir un niveau minimum d'alerte pour lutter contre la somnolence ou l'ennui engendrés par le faible niveau de la charge de la tâche (Mulder, 1986 ; Brookhuis & de Waard, 2010 ; da Silva, 2014).

En conclusion, nous relevons dans cette partie plusieurs éléments instructifs. Tout d'abord, une distinction est opérée entre la charge de la tâche, objective, et la charge de travail, subjective. Ensuite, la relation entre la charge de travail et les performances n'est pas linéaire : il est important de maintenir la charge de la tâche à un niveau acceptable. Si le niveau de la charge de la tâche est trop bas, une situation de sous-charge apparaît, celle-ci est caractérisée par une chute des performances en raison d'un manque d'investissement et par une augmentation de la charge de travail car l'individu doit consentir à un effort compensatoire. Si le niveau de la charge de travail est trop élevé, une situation de surcharge émerge : elle se caractérise par une chute des performances en raison d'un manque de ressources et par une augmentation de la charge de travail car l'individu doit consentir à un effort de calcul. Enfin, ce modèle est applicable aussi bien à la charge mentale qu'à la charge physique et, de facto, à notre vision de la charge de travail.

2.2 La charge mentale

La charge mentale de travail représente la fraction de la charge de travail qui englobe les processus neurophysiologiques, perceptifs et cognitifs (da Silva, 2014). Celle-ci est traditionnellement associée aux limites de la mémoire de travail. Dans le domaine aéronautique, Martin et al. (2013) identifient 3 notions liées à la charge mentale de travail : les capacités de l'opérateur, les ressources mobilisables et la performance atteinte. La capacité de l'opérateur renvoie aux limites mentales de l'opérateur. Il s'agit de la borne maximale de traitement de l'information, la quantité maximale de ressources que l'individu peut mobiliser. Les ressources mobilisables par l'opérateur sont liées à l'attention, elles désignent l'intensité de l'activité, l'énergie déployée au cours de l'exécution de la tâche. L'utilisation de ces ressources nécessite une modulation de l'énergie déployée par l'opérateur traduisant la présence d'un effort mental. Enfin, la performance atteinte qualifie le résultat obtenu suite à l'exécution de la tâche. Elle peut être évaluée par le biais d'indicateurs correspondant aux critères de réussite de la tâche. Ces indicateurs varient en fonction de chaque tâche. L'ajustement entre le coût cognitif et les performances visées est appelé le compromis cognitif.

Sur base de ces éléments, Martin et al. (2013, p. 298) définissent la charge mentale de travail comme « *la résultante de l'ajustement entre ressources cognitives et exigences de la tâche pour un objectif fixé. Cet ajustement est déterminé par une double évaluation subjective portant sur l'ampleur des objectifs de la tâche, ainsi que sur le niveau de ressources cognitives à investir, sachant que le seuil capacitaire des ressources mobilisables reste une limite infranchissable* ». Nous retrouvons ici l'idée des évaluations primaire et secondaire de Lazarus et Folkman (1984). Ce sont ces évaluations qui déterminent le niveau de la charge mentale de travail ressentie par un individu particulier.

Paas, Tuovinen, Tabbers, et Van Gerven (2003) ont une autre vision de la charge mentale : pour eux, il s'agit plutôt de l'aspect de la charge cognitive qui trouve son origine dans l'interaction entre les caractéristiques de la tâche et du sujet. Ils considèrent que la charge mentale est une estimation a priori des ressources cognitives requises pour mener la tâche à bien. Le niveau de la charge mentale est mesurable sur base des caractéristiques de l'individu et de la tâche.

Dans le domaine du transport routier, Roskam et al. (2002) indiquent, quant à eux, que la charge mentale de travail correspond à la quantité d'informations qu'un conducteur doit traiter. Faure, Lobjois, et Benguigui (2016) définissent aussi la charge mentale de travail comme le résultat de l'interaction entre les demandes de la tâche et les capacités en terme de ressources attentionnelles du conducteur. Ils vont plus loin en précisant que les capacités du conducteur dépendent de facteurs intrinsèques tels que l'âge, l'expérience et les états passagers provoqués par la fatigue, la somnolence, la consommation de drogues, etc., et que les demandes de la tâche de conduite sont multifactorielles : elles peuvent être classées en facteurs internes : soit ce qui se passe dans le véhicule, et externes : soit l'environnement, les conditions de trafic, etc.). Parmi les facteurs externes déterminant l'exigence de la tâche figurent le nombre d'informations à traiter, la densité du trafic, le type de manœuvre à effectuer, la complexité de l'environnement, etc.

Nous constatons donc que tous les auteurs ne s'accordent pas sur une définition de la charge mentale de travail. Martin et al. (2013) et Faure et al. (2016) soutiennent une vision plutôt transactionnelle de la charge mentale de travail tandis que Roskam et al. (2002) et Paas et al. (2003) adoptent un point de vue interactionniste.

Avec leur modèle de la gestion de la charge mentale en aéronautique (G.C.M.A.), Martin et al. (2013) proposent plusieurs représentations graphiques pour illustrer visuel-

lement la charge mentale de travail. Selon eux, les situations aéronautiques sont dynamiques, complexes et multi-focales. Ils déterminent tout d’abord ce qu’ils appellent le losange d’optimisation (voir figure 2.3). Les sommets de ce dernier matérialisent 4 facteurs.

1. **L’objectif (ΔO)** - la distance à la satisfaction des contraintes de la tâche consiste en l’ensemble des contraintes liées à l’objectif qui doivent être satisfaites pour l’atteindre. Cette distance diminue au fur et à mesure de l’avancement de la réalisation de la tâche. Elle représente les contraintes qu’il reste à accomplir.
2. **Le temps (ΔT)** - l’échéance temporelle est déterminée par la durée que l’opérateur estime avoir pour atteindre l’objectif. Lorsque la distance à l’échéance temporelle est inférieure à la distance de satisfaction des contraintes de la tâche, l’opérateur se trouve en situation de pression temporelle, dans ce cas, il peut viser des objectifs plus modestes pour mener la tâche à son terme.
3. **les ressources (ΔC)** - la réserve de ressources cognitives disponibles est obtenue en soustrayant le niveau alloué à la capacité totale.
4. **la performance (ΔP)** - la distance à la performance pour un objectif donné à la tâche représente l’ensemble des niveaux de performances acceptables, des actions pour atteindre la performance visée.

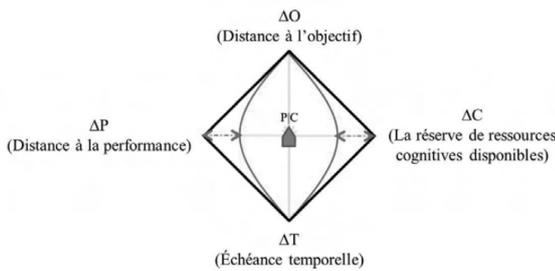


FIGURE 2.3 – Losange d’optimisation

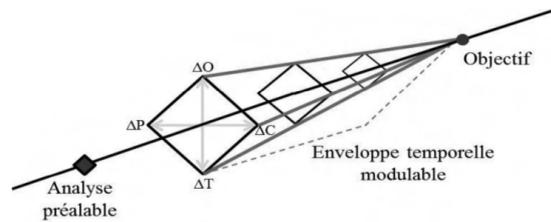


FIGURE 2.4 – Décours temporel

Modèle de Gestion de la Charge Mentale en Aéronautique de Martin et al. (2013, p. 292 - 294)

Sur l’axe horizontal (ΔP - ΔC), Martin et al. (2013) placent un indicateur (P|C) qui représente le compromis effectué à un moment donné par l’opérateur entre les performances (P) visées et les ressources (C) allouées. Lorsqu’il se trouve au centre, l’opérateur est dans une zone de confort. Si le compromis se situe près d’une extrémité, c’est que l’opérateur se trouve dans un niveau de charge mentale inconfortable : le niveau de performance est trop élevé ou les ressources disponibles sont trop faibles.

Afin de tenir compte de l’aspect dynamique des situations aéronautiques, le losange évolue dans le temps. Cette évolution se matérialise sous la forme d’un cône (figure 2.4) qui comprend plusieurs étapes.

1. **L’analyse préalable** - elle permet à l’opérateur de définir la nature de la situation rencontrée, les actions à mettre en place et le laps de temps donné.
2. **Le losange d’optimisation initial** - il s’agit du compromis défini par l’opérateur illustrant le niveau de ressources mobilisées, la performance visée pour l’objectif donné.
3. **Les états intermédiaires du losange** - ils correspondent à l’évolution de l’exécution de la tâche et au rapprochement vers l’objectif visé.

Dans une situation idéale, l'aire du losange diminue au cours du temps jusqu'à la fin de la tâche. En situation dégradée, le volume du cône peut augmenter de façon abrupte.

Enfin, ce modèle va encore plus loin en prenant en compte l'exécution parallèle des différentes tâches, appelée enveloppe : celle-ci englobe l'ensemble des cônes générés par la réalisation des tâches concurrentes. Sur l'axe temporel, l'enveloppe est précédée par un point correspondant à l'analyse préalable de la tâche principale, évaluation durant laquelle l'opérateur va répartir son action entre les différentes sous-tâches.

En synthèse de cette partie, nous pouvons retenir que la charge mentale est un construit plutôt issu du milieu professionnel. La charge mentale consiste en l'interaction des caractéristiques de l'individu telles que son âge, son expertise, ses capacités attentionnelles, ses états passagers, etc., et celles de la tâche comme le nombre de tâches à effectuer simultanément, la quantité d'informations à traiter, les manœuvres à exécuter, etc. Certains auteurs, comme Martin et al. (2013), considèrent que la charge mentale va au-delà de la simple interaction entre ces facteurs et la conçoivent comme subjective et dynamique : l'opérateur procède à de nombreuses évaluations cognitives pour se construire une représentation personnelle des exigences de la tâche et de ses propres ressources. Enfin, la charge mentale évolue rapidement au cours du temps. Effectivement, le temps disponible est un des facteurs déterminant le niveau de la charge mentale : s'il est inférieur au temps nécessaire à l'exécution normale de la tâche, l'individu se trouve en situation de pression temporelle.

2.3 La charge cognitive

La charge cognitive d'une personne correspond à la quantité de ressources mentales mobilisées pour l'exécution d'une tâche. (Le et al., 2011). Elle concerne plus spécifiquement le traitement des informations en mémoire de travail, c'est pourquoi elle est également associée aux limites de celle-ci (Khawaja et al., 2009). Dans le domaine aéronautique, Huttunen et al. (2011) précisent que la charge cognitive est présente chez chaque pilote, elle consiste en une pression sur le système chargé du traitement des informations comprenant la perception, la mémoire, le raisonnement logique et l'apprentissage. Lorsqu'elle trop basse ou trop haute, la charge cognitive augmente le risque d'accident.

La charge cognitive a fait l'objet de plusieurs théories, principalement dans le domaine de l'apprentissage. Parmi celles-ci, nous nous intéressons aux théories de Paas et al. (2003) et de Chanquoy, Tricot, et Sweller (2007) car elles sont complémentaires : la première est centrée sur les représentations physiologiques et psychologiques de la charge cognitive tandis que la seconde traite des déterminants de la charge cognitive.

Paas et al. (2003) définissent la charge cognitive comme un construit multidimensionnel qui représente la charge que subit le système cognitif d'un apprenant confronté à la réalisation d'une tâche spécifique. Elle a donc une dimension causale qui illustre l'interaction entre les caractéristiques de la tâche et de l'apprenant ainsi qu'une dimension évaluative qui comprend les concepts mesurables tels que la charge mentale, l'effort mental et la performance.

Parmi les caractéristiques de la tâche, Paas et al. (2003) identifient le format de tâche, la complexité de la tâche, l'utilisation de multimédia, la pression temporelle et le rythme des instructions. Ils distinguent trois aspects de la charge cognitive. Premièrement, la

charge mentale, dont la définition, déjà rapportée dans la sous-partie précédente, est l'aspect qui trouve son origine dans l'interaction entre les caractéristiques de la tâche et du sujet. Deuxièmement, l'effort mental qui est l'aspect qui réfère aux capacités cognitives qui sont réellement allouées pour répondre aux demandes imposées par la tâche, il reflète donc le niveau réel de la charge cognitive. Troisièmement, la performance est le dernier aspect de la charge cognitive, elle s'évalue en terme d'accomplissement de l'apprenant. Il s'agit de mesurer le nombre de bonnes réponses, le nombre d'erreurs et le temps passé sur la tâche. Cette performance ne peut être observée qu'a posteriori, lorsque la tâche est terminée.

Avec leur modèle de la charge cognitive, Paas et al. (2003) ont pour ambition de structurer toutes les définitions en lien avec la charge cognitive. Pour ce faire, ils discriminent trois composantes additives : les charges intrinsèque, extrinsèque et efficace. A ces composantes, ils ont ajouté, en se basant sur les travaux de Xie et Salvendy (2000), des indices de mesure de la charge cognitive : les charges instantanées, de pointe, accumulée, moyenne et globale. Tous ces éléments sont synthétisés à la figure 2.5.

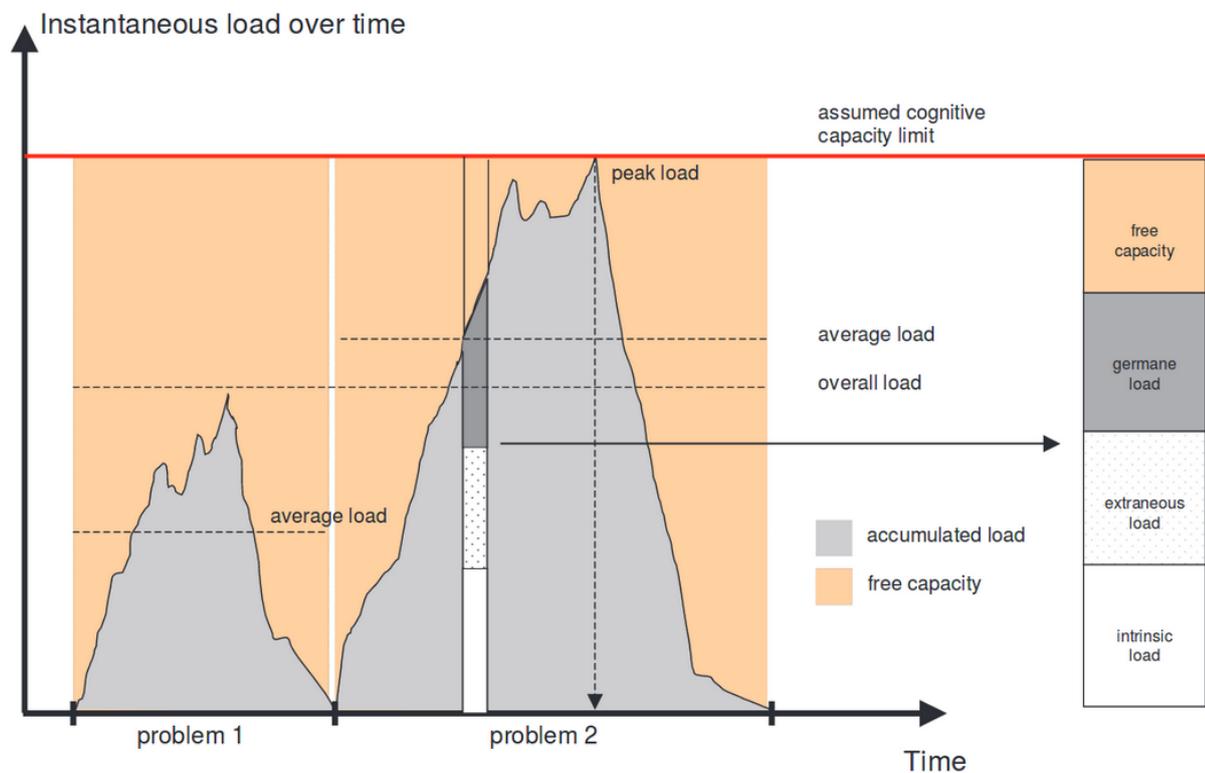


FIGURE 2.5 – Modélisation des composantes de la charge cognitive (Paas et al., 2003, p. 24)

La figure 2.5 modélise l'évolution de la charge cognitive instantanée, sur l'axe des ordonnées, en fonction du temps, sur l'axe des abscisses. La charge instantanée, prenant la forme de la courbe noire sur le diagramme, représente la dynamique de la charge cognitive, c'est-à-dire ses fluctuations à chaque instant durant la réalisation de la tâche.

La charge accumulée correspond à l'aire sous la courbe, en gris clair, elle est divisée en trois composantes. Tout d'abord, la charge cognitive intrinsèque, en blanc sur le diagramme, est déterminée par l'interaction entre la nature du matériau à apprendre et l'expertise de l'apprenant. Ensuite, la charge extrinsèque, en motif pointillé, consiste en la

charge cognitive ajoutée qui ne présente aucun intérêt pour l'apprentissage, elle est inutile mais consomme des ressources. Enfin, la charge efficace, en gris foncé, est une charge supplémentaire qui contribue à la construction de connaissances déclaratives et procédurales. La limite maximale des capacités cognitives est symbolisée par le trait plein rouge tout au-dessus du diagramme. Entre la charge instantanée et ce plafond maximal se trouvent, en orange, les capacités libres, c'est-à-dire les ressources disponibles.

La charge de pointe correspond à la valeur maximale atteinte par la charge instantanée lors de la réalisation de l'ensemble des tâches, c'est donc le sommet le plus élevé dans le diagramme. La charge moyenne, sous la forme des petits segments de droite en tirets dans le diagramme, symbolise l'intensité moyenne de la charge durant la réalisation de chaque tâche. Pour terminer, la charge globale, modélisée par le grand segment de droite en tirets, est la charge cognitive moyenne ressentie tout au long de l'exécution de l'ensemble des tâches.

La courbe de la charge instantanée peut être considérée comme une représentation visuelle des processus physiologiques tandis que la charge globale représente une mesure qui s'axe sur une base psychologique (Xie & Salvendy, 2000 ; Paas et al., 2003).

La modélisation proposée par Paas et al. (2003) est remarquable car elle structure près de dix concepts liés à la charge cognitive. Toutefois, nous estimons qu'elle n'est pas exempte de défauts. En premier lieu, même s'il est très clair, ce modèle est finalement peu opérationnel : les auteurs n'expliquent absolument pas comment ils mesurent la proportion de chacune des trois composantes. De même, la manière dont est obtenue la valeur de la charge accumulée à un instant précis n'est pas explicitée. Nous pouvons postuler qu'elle est déterminée à l'aide de mesures physiologiques, nous reviendrons sur ces dernières dans la suite de ce travail. En second lieu, nous sommes interpellés par la droite rouge illustrant le plafond des capacités mobilisables : sa disposition laisse penser que ce plafond est constant, or, nous pensons que celui-ci est variable en fonction des états de l'individu.

Bien que les mesures physiologiques soient séduisantes et offrent l'opportunité d'objectiver l'état cognitif d'une personne à un instant précis dans des conditions particulières, nous pensons que ces mesures ne suffisent pas à prédire la charge cognitive d'un individu lambda dans une situation écologique. Nous postulons que la prise en compte des déterminants de la charge cognitive renforce la robustesse des prévisions, c'est pourquoi nous allons désormais détailler la théorie de la charge cognitive de Chanquoy et al. (2007).

Chanquoy et al. (2007) définissent la charge cognitive comme correspondant : « à l'intensité du traitement cognitif mis en œuvre par un individu lorsqu'il réalise une tâche donnée dans un contexte particulier » (Chanquoy et al., 2007, p. 248). Ils identifient, entre autres, 6 facteurs qui interviennent dans l'intensité du traitement cognitif :

1. **le nombre d'informations** impliquées dans la tâche et les relations qu'elles entretiennent entre elles, plus elles sont nombreuses, plus la charge augmente ;
2. **les connaissances** antérieures dont dispose l'individu au moment de réaliser la tâche, plus il possède de connaissances, plus il est expert et moins lourde est sa charge cognitive ;
3. **les stratégies** mises en œuvre par l'individu pour accomplir la tâche, il peut ignorer certaines informations ou optimiser certains traitements (Martin et al., 2013) ;

4. **la présence d'interférences** dans le contexte d'exécution de la tâche, il peut s'agir d'autres tâches, d'événements impliquant une réaction émotionnelle, d'interactions sociales... ;
5. **la proximité des traitements** détermine également la charge : des traitements cognitifs ou sensoriels proches sont moins facilement parallélisables et entraînent une hausse de la charge ;
6. **l'effort** que l'individu consent à produire pour réaliser la tâche, celui-ci dépend de sa motivation et de sa fatigue. Un individu fatigué et/ou démotivé peut adopter une stratégie d'abandon face à la tâche.

A ces 6 paramètres, il convient d'ajouter **la pression temporelle** : plus le temps disponible pour mener la tâche à son terme est faible, plus la charge cognitive augmente (Harmegnies & Landercy, 1992 ; Barrouillet, Bernardin, & Camos, 2004 ; Johannes et al., 2007 ; Chanquoy et al., 2007 ; Martin et al., 2013).

De ces 6 paramètres et des éléments passés en revue précédemment, il est possible d'extraire trois entités majeures : la tâche, l'individu et l'environnement. Nous proposons de classer les paramètres influençant le niveau de la charge cognitive en fonction de cette catégorisation, tout en étant conscient que chaque composante influence les deux autres et que la charge cognitive est le fruit de la combinaison de toutes.

Grâce à cette théorie, nous pouvons synthétiser les déterminants de la charge cognitive. Premièrement, la tâche est caractérisée par un niveau de complexité qui peut être évalué par la quantité et la qualité des informations à traiter, la quantité et la proximité des traitements à opérer ainsi que par la quantité et la portée des décisions à prendre. Deuxièmement, l'individu possède des ressources : il dispose de connaissances, de capacités attentionnelles et mnésiques, de stratégies et il est mû par une motivation. Troisièmement, l'exécution d'une tâche par un individu se déroule toujours dans un environnement particulier : celui-ci peut influencer la charge cognitive en fonction des conditions de réalisation de la tâche telles que le temps disponible, les interférences comme le bruit, les tâches connexes, les interactions sociales, etc.

2.3.1 La charge cognitive induite par la tâche

La nature et la complexité de la tâche à accomplir impactent le niveau de la charge cognitive. Dans cette partie, nous abordons celle-ci sous l'angle de la contrainte, c'est-à-dire comme ne dépendant « *aucunement des caractéristiques de l'opérateur* » (Sperandio, 1988, p. 15). Autrement dit, il s'agit d'analyser ici les éléments spécifiques de la tâche sans tenir compte des facteurs individuels. Sperandio (1988) parle d'analyse de la tâche qui se base entre autres sur une description des informations manipulées.

La complexité de la tâche

Huttunen et al. (2011) emploient le terme d'*information load*, que nous traduisons par charge informationnelle, celle-ci dépend de la quantité et de la qualité des informations à sélectionner via l'attention et à traiter en mémoire de travail.

Lorsqu'une tâche requiert la prise compte de nombreuses informations, le niveau de la charge cognitive augmente car la tâche est plus exigeante en capacités mnésique, attentionnelle et cognitive. Cela est d'autant plus vrai si les informations à appréhender passent par la même modalité perceptuelle : la prise en compte de plusieurs éléments visuels augmente davantage la charge cognitive que la présentation simultanée de stimuli sonore et visuel. Dans leur étude portant sur l'utilisation d'un dispositif de communication chez des pilotes de ligne, Lin et al. (2012) ont montré que la nature du média employé, communication orale (voix) ou écrite (messages textuels affichés sur un écran), n'impacte pas significativement la charge de travail ressentie des pilotes en situation "normale" de vol mais ils recommandent d'employer la communication orale lorsque la complexité de la tâche augmente, par exemple lors des phases de décollage et d'atterrissage ou lors de la gestion d'événements particuliers (Müller, Giesa, & Anders, 2001).

Outre la quantité, le flux d'informations se caractérise également par la complexité de chacun de ses éléments : dans un système complexe, l'interprétation de certains messages d'erreurs implique d'identifier la partie du système concernée et les causes probables. De plus, toutes les informations n'ont pas la même importance : une fumée suspecte doit être traitée sans délai alors que, en situation normale, la lecture de la valeur affichée sur un cadran n'est pas, a priori, critique et peut être postposée de quelques secondes.

Ensuite, lorsque les informations ont été perçues et comprises, certaines tâches requièrent une prise de décision de la part de l'opérateur, celles-ci étant plus ou moins nombreuses et ayant une portée plus ou moins importante. Huttunen et al. (2011) parlent de *decision load*, soit la charge décisionnelle selon notre traduction.

Le nombre de décisions à prendre est déterminant pour la charge cognitive : par exemple, en aéronautique, la suppression d'une alarme, le désengagement du pilote automatique, la remise des gaz, l'exécution d'une manœuvre et l'envoi d'un message au contrôle aérien sont le fruit de jugements que le pilote est parfois amené à prendre dans un délai très court. La complexité des décisions à prendre influence le niveau de charge décisionnelle : le nombre d'options disponibles tout comme la quantité de facteurs à gérer accroissent la difficulté à sélectionner la meilleure solution. Enfin, l'impact des actes décidés constitue un autre facteur : annuler ou non un décollage est potentiellement plus lourd de conséquences que de post-poser une communication.

Dans le domaine de la conduite automobile, la demande cognitive fluctue en fonction des conditions du trafic, ce qui affecte la charge de travail tant au niveau des processus moteurs et que du contrôle attentionnel (Matthews & Desmond, 2002).

2.3.2 La charge cognitive gérée par l'individu

Pour accomplir une activité, l'individu mobilise ses diverses capacités, ce qui contribue aussi à déterminer le niveau de la charge cognitive. Parmi celles-ci, on distingue communément l'attention, la mémoire, les connaissances et les stratégies. Le niveau de mobilisation de celles-ci dépend également de la motivation et de la fatigue du sujet.

L'attention

A l'instar d'autres notions, l'attention possède de multiples définitions qui illustrent ses différentes facettes telles que la concentration, la vigilance, l'éveil, la sélection et le maintien de certaines informations ou encore l'accès conscient à des informations en mémoire grâce à la focalisation (Chanquoy et al., 2007). Selon Leclercq et Zimmermann

(2000), l'attention peut être abordée selon deux axes, illustrés à la figure 2.6, : celui de l'intensité et celui de la sélectivité.

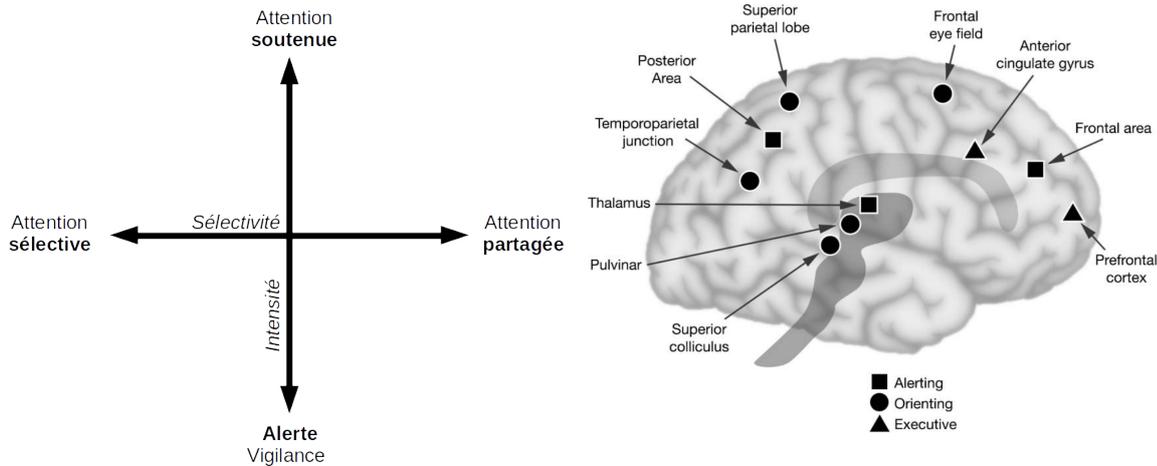


FIGURE 2.6 – Sélectivité et intensité de l'attention

FIGURE 2.7 – Localisation des 3 réseaux attentionnels selon Posner et Rothbart (2007, p.6)

Du point de vue de l'intensité, l'attention varie sur un continuum entre, d'une part, l'état d'alerte, que certains auteurs nomment la vigilance (Chanquoy et al., 2007) et, d'autre part, l'attention soutenue. L'état d'alerte permet au système nerveux d'être attentif à ce qui se déroule dans l'environnement et au sein de l'individu tout en consommant un minimum d'énergie. Leclercq et Zimmermann (2000) distinguent l'alerte phasique qui reflète l'état de préparation de l'individu en fonction d'un signal avertisseur de l'alerte tonique qui correspond à son niveau d'éveil physiologique, celui-ci étant bien sûr influencé par les rythmes circadiens et de veille.

A l'autre extrémité de cet axe se trouve l'attention soutenue, elle renvoie à une situation dans laquelle le flux d'informations est rapide et nécessite un traitement actif ininterrompu, lequel consiste essentiellement à inhiber des stimuli. Il s'agit pour le sujet de maintenir un niveau d'efficacité adéquat et stable au cours d'une activité d'une certaine durée sollicitant un contrôle attentionnel continu.

A propos de la sélectivité, l'attention est généralement scindée en deux grandes parties dans la littérature : l'attention sélective et l'attention partagée (Leclercq & Zimmermann, 2000). La première est la capacité dont dispose un individu à se focaliser sur un stimulus particulier au milieu d'autres et est impliquée dans la charge cognitive intrinsèque, c'est-à-dire centrée sur la tâche, tandis que la seconde correspond à sa faculté de traiter plusieurs stimuli en même temps et est liée à la charge cognitive extrinsèque, soit à la gestion des interférences (Paas et al., 2003).

Face à des situations complexes et à la multitude d'informations auxquelles chacun est confronté continuellement, certains stimuli doivent impérativement être pris en compte au détriment d'autres qui doivent être ignorés. L'attention sélective consiste en une focalisation sur les informations pertinentes, ce qui implique de ne pas prendre en compte tous les éléments. Elle renvoie à la capacité du sujet à investir les ressources de traitement dont il dispose sur les éléments pertinents de la situation ou de la tâche, tout en inhibant les éléments distrayants. Deux mécanismes sont donc à l'œuvre : l'activation d'un processus de centration sur l'objet de l'attention et l'inhibition active des éléments potentiellement perturbateurs (Leclercq & Zimmermann, 2000). Posner et Raichle (1994)

ont étudié comment l'individu oriente son attention visuelle : le sujet, en phase d'alerte, capte des stimuli en provenance de l'environnement. Si parmi ceux-ci, un indice est identifié, l'attention s'interrompt pour localiser l'origine de l'indice. Une fois cette localisation terminée, un processus de désengagement de l'attention s'opère de l'emplacement initialement observé pour se déplacer vers le nouvel endroit et l'attention s'y engage. Le premier emplacement est alors inhibé (Chanquoy et al., 2007).

A l'inverse, dans une situation de l'attention partagée, l'individu doit allouer ses ressources cognitives entre plusieurs stimuli, ce qui rend possible l'exécution simultanée de plusieurs tâches. Ce type d'attention a été largement étudié au travers d'expériences recourant au paradigme de la double tâche. Dans celui-ci, le sujet est amené à réaliser deux activités en même temps. Les études ont montré que la bonne exécution des deux tâches dépend de la similarité des stimuli, de la proximité des traitements, de leur complexité respective et de l'expertise du sujet. On retrouve ici des caractéristiques de la tâche décrites dans le point précédent. L'expertise est, quant à elle, à mettre en lien avec les connaissances de la personne. Nous y revenons plus loin dans cette sous-partie.

Les premières modélisations de l'attention, axées sur un filtrage précoce ou tardif de l'information se sont enrichies grâce à l'évolution des outils d'imagerie médicale. Ces derniers apportent un éclairage biologique à la simple description des processus attentionnels en terme d'opérations cognitives. Ces démarches ont progressivement conduit Posner et Petersen (1989) à identifier 3 réseaux attentionnels activés selon les fonctionnalités spécifiques que sont l'alerte, l'orientation et le contrôle exécutif. Ces trois réseaux attentionnels sont localisés sur la figure 2.7 (Posner & Rothbart, 2007).

Plusieurs constats émergent de ces découvertes : le système attentionnel est séparé anatomiquement du traitement de l'information, il se comporte comme un système organique autonome qui a sa propre identité, il n'est pas centralisé en un endroit unique du cerveau mais est distribué entre plusieurs zones qui s'activent sous la forme d'un réseau. Plusieurs réseaux peuvent être distingués selon les fonctionnalités activées. C'est ainsi que sont nés les réseaux attentionnels d'alerte, d'orientation et de contrôle exécutif (Posner & Petersen, 1989).

L'alerte est définie comme l'atteinte et le maintien d'un état de réception des stimuli entrants, elle est associée aux régions frontales et pariétales du cortex cérébral. L'efficacité de l'alerte est accrue grâce à la présence de signaux avertisseurs, lesquels provoquent un accroissement de l'activité cérébral grâce au neurotransmetteur norepinephrine (Posner & Rothbart, 2007).

L'orientation consiste en l'alignement de l'attention avec la source de l'indice, c'est-à-dire d'un stimuli considéré comme pertinent, il s'agit de synchroniser l'attention avec les informations provenant des systèmes sensoriels. L'effet cocktail (Chanquoy et al., 2007) est un bon exemple de cette orientation : il s'agit de la tendance à focaliser son attention sur la conversation d'un autre groupe que le sien si l'on a perçu un indice (par exemple notre nom) nous laissant penser que l'on parle de nous. L'orientation n'implique pas nécessairement des mouvements oculaires. L'orientation active les régions postérieures du cerveau telles que le lobe pariétal supérieur et la jonction entre les parties pariétales et temporales à l'aide du neurotransmetteur acetylcholine. Les performances de l'orientation s'améliorent si un indice spatial est présent dans l'environnement (Posner & Rothbart, 2007).

Enfin, le contrôle exécutif de l'attention est impliqué lorsque des conflits surviennent, comme c'est par exemple le cas dans la tâche de Stroop lorsque les sujets doivent inhiber la lecture du nom d'une couleur pour énoncer la couleur de l'encre employée pour l'écrire.

Cette résolution de conflit active les zones frontales médianes et préfrontales latérales du cortex grâce à la dopamine (Posner & Rothbart, 2007).

Concrètement, Weaver, Bédard, McAuliffe, et Parkkari (2009) ont montré que les temps moyens de réaction de l'ANT sont relativement bien corrélés à ceux de la conduite d'une véhicule automobile sur simulateur ($r^2=.564$).

La mémoire

Outre ses capacités attentionnelles, l'individu peut également compter sur sa mémoire. Les auteurs issus du courant cognitiviste se sont beaucoup intéressés au fonctionnement de la mémoire. Selon eux, le système cognitif humain est divisé en sous-systèmes de mémoire. L'être humain possède plusieurs mémoires : trois différents types de mémoire sont généralement distingués : la mémoire sensorielle, la mémoire de travail et la mémoire à long terme.

D'abord, la mémoire sensorielle a pour rôle de canaliser les informations provenant de nos cinq sens et de les transférer vers la mémoire de travail. Cette mémoire est très limitée en capacité et en durée.

Ensuite, la mémoire de travail peut stocker plus ou moins sept informations durant quelques secondes. (Miller, 1956) a été l'un des premiers à mettre en évidence les limites de la mémoire de travail avec son célèbre nombre magique 7 ± 2 informations. Celui a depuis été remis en cause, notamment car le nombre maximum d'éléments pouvant être maintenus en mémoire de travail dépend de leur nature. Allant de ce sens (Baddeley, 1986) a proposé un modèle qui met en avant que la mémoire de travail est constituée de trois éléments principaux : un centre « exécutif » et deux systèmes « esclaves » de stockage temporaire des informations. Selon lui, le centre « exécutif » de la mémoire de travail joue le rôle de récupérateur des informations antérieures provenant de la mémoire à long terme, de filtrage des informations non pertinentes et de transfert des informations vers la mémoire à long terme. Les centres de stockage contiennent tous les deux des données d'un type différent : l'un est dédié aux informations phonologiques, l'autre aux informations spatiales et visuelles. Cette différence est à la base de l'hypothèse suivante : la présentation simultanée de deux représentations de type différent d'un même objet, par exemple un élément sonore et une image, demande un effort total de traitement moins important que l'utilisation d'une image et d'un texte. Cela s'explique par le fait que dans le premier cas, l'information sonore est stockée dans le centre phonologique tandis que le centre dédié aux informations visuelles et spatiales est totalement libre pour traiter l'image. Dans le second cas, toutes les informations sont traitées par le système visuo-spatial. Les ressources de la mémoire de travail sont donc mieux exploitées dans le premier exemple.

Enfin, la mémoire à long terme a pour rôle de stocker les informations pour une longue durée. Il est difficile d'évaluer la durée de rétention des informations et la quantité maximale qui peut être emmagasinée. Toutefois, selon les chercheurs cognitivistes, il existe plusieurs formes de connaissances qui sont représentées de façon différente dans la mémoire à long terme.

Les connaissances et les stratégies

Anderson (1996) distingue plusieurs types de connaissances dans son modèle ACT-R (*Adaptive Character of Thought*). Les connaissances déclaratives sont organisées en un réseau de concepts (*chunk*), il s'agit d'un ensemble de représentations sur des objets reliés

entre elles par des relations, un concept étant un symbole qui représente une classe d'objets abstraits ou concrets qui possèdent des propriétés communes (Nguyen-Xuan, 1995). Les connaissances procédurales constituent quant à elles un ensemble de règles à appliquer, elles s'acquièrent essentiellement par l'exercice (Anderson, 1996).

En aéronautique, les connaissances sont intimement liée au concept de *situation awareness* (Endsley, 1995), que nous traduisons par conscience de la situation. L'auteur définit la conscience de la situation comme la perception des stimuli présents dans l'environnement mais aussi comme la capacité à les interpréter, à les comprendre afin de pouvoir les projeter pour anticiper l'évolution probable de la situation. Comme l'illustre la figure 2.8, la conscience de la situation fait appel aux mémoires de travail et à long terme. En effet, l'individu stocke les éléments les plus pertinents dans sa mémoire de travail et les confronte ensuite à des schémas de situations analogues acquis antérieurement et stockés dans la mémoire à long terme, c'est-à-dire ses connaissances. L'expertise de l'opérateur joue donc un rôle important : plus celui-ci dispose d'un éventail de schémas variés dans sa mémoire à long terme, moins il doit mobiliser de ressources cognitives pour faire face à la situation car il lui suffit d'appliquer des paramètres identiques à ceux des situations enregistrées.

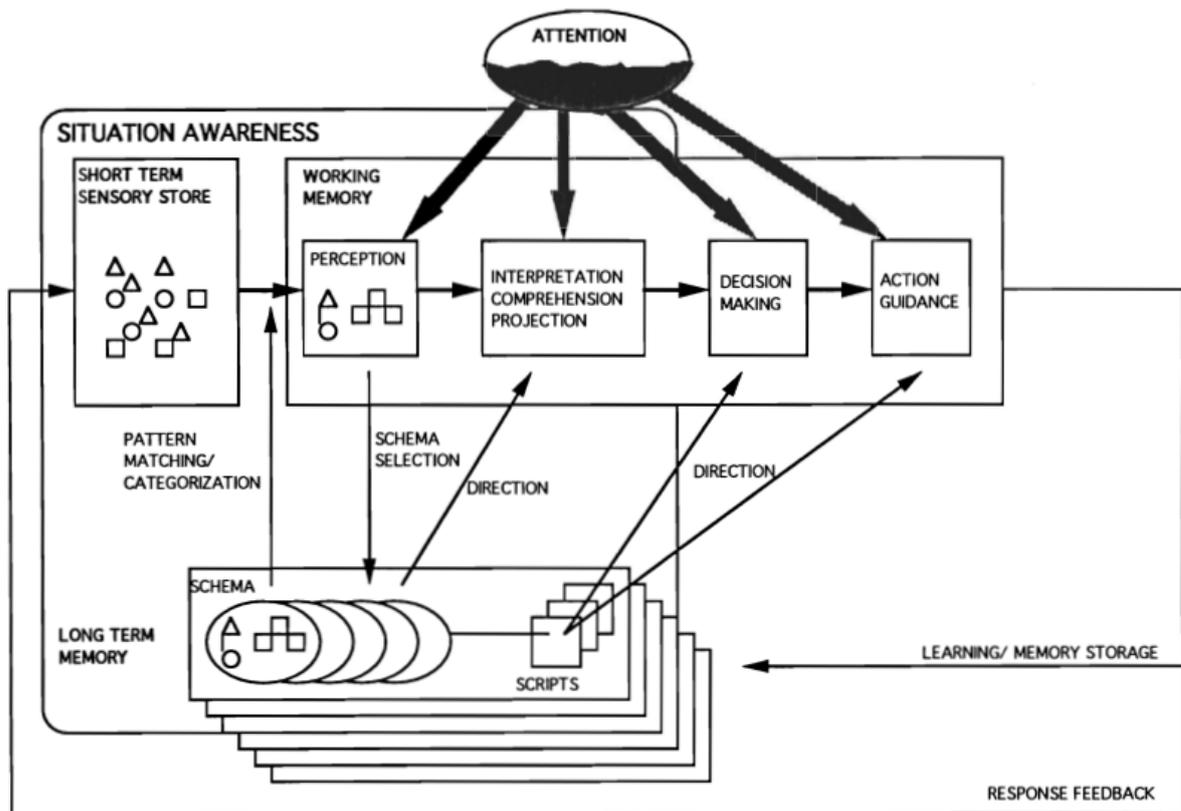


FIGURE 2.8 – Mécanismes de la conscience de la situation de Endsley (1995, p.41)

Dans sa revue des articles de Endsley, Wickens (2008) précise que le construit de la conscience de la situation s'applique uniquement à des environnements dynamiques dans lesquels plusieurs facteurs varient dans un intervalle de temps très court (en secondes ou en minutes). De plus, la conscience de la situation n'est ni une action ni une performance : elle ne comporte pas d'actes tels que des gestes ou de la communication. Ainsi, la prise de décision, bien qu'elle soit basée sur les informations perçues et traitées par la conscience de la situation ne fait pas partie de cette dernière.

Au niveau de la performance, une bonne conscience de la situation ne garantit pas de bonnes performances dans la tâche. Même si un sujet peut très bien percevoir les éléments pertinents d'une situation, les comprendre et anticiper leurs effets sur le déroulement à venir, s'il ne maîtrise pas les actions et les procédures à mettre en œuvre ou s'il fait les mauvais choix, la performance dans la tâche décline. À l'inverse, dans un système largement automatisé, il est possible d'obtenir d'excellentes performances alors que l'opérateur a pourtant peu de conscience de la situation. Dans ce sens, en aéronautique, on peut rapprocher la conscience de la situation au concept de *airmanship* (Martin et al., 2013, p. 287) traduisant la capacité du pilote à maintenir l'avion en vol en intégrant les informations nécessaires à sa conduite dans un espace aérien régulé. Enfin, le maintien de la conscience de la situation repose sur l'attention sélective.

Au niveau des stratégies, Martin et al. (2013) en mentionnent plusieurs pouvant être mises en œuvre par un individu pour réduire sa charge cognitive : il s'agit de l'optimisation, du report ou de la suppression de tâches. Par exemple, un conducteur dont le téléphone sonne peut soit se garer sur le côté de la route pour se consacrer pleinement à la conversation (suppression de la tâche de conduite), soit informer son interlocuteur qu'il conduit et lui proposer de postposer la conversation (report de la communication), soit optimiser les tâches en réduisant la durée de la conversation téléphonique, en conservant une allure stable pour ne pas devoir changer de rapport de vitesse ou encore en utilisant un périphérique "mains libres".

Dans le domaine du transport routier, (Ibeas et al., 2014) affirment que la conduite automobile requiert des connaissances déclaratives comme la connaissance du code de la route ou du fonctionnement du véhicule et de la dextérité, soit des connaissances procédurales comme l'exécution coordonnée de plusieurs actions, en parallèle ou en série, ainsi que des capacités à résoudre des problèmes et à gérer son attention, le tout en même temps. Les conducteurs doivent être capables de juger, de prédire et d'évaluer le comportement des autres automobilistes tout en contrôlant leur propre véhicule, en apportant des réponses adaptées et rapides aux différents événements, parfois imprévisibles, survenant sur leur parcours.

L'apprentissage de la conduite repose largement sur la pratique et la confrontation à des situations variées. L'accumulation de ces apprentissages forme l'expertise du conducteur. Enfin, les conducteurs développent plusieurs stratégies de coping pour mener à bien leur conduite : la plus commune est celle qui consiste à ralentir le véhicule pour réduire l'exigence de la conduite. À l'inverse, quand les conducteurs jugent la tâche trop peu demandeuse, ils peuvent augmenter la vitesse de la voiture (Ibeas et al., 2014).

2.3.3 La charge cognitive induite par l'environnement

De très nombreuses informations sont disponibles dans l'environnement : elles sont visuelles (trafic automobile, instruments de bord, messages d'erreurs, etc.), sonores (communications, bruits, alertes, etc.), tactiles (accélération, vibrations, etc.), olfactives (fumées, gaz, etc.). Le traitement simultané de tous ces stimuli est impossible, c'est pourquoi l'attention sélective joue un rôle crucial car la mémoire de travail étant limitée, le choix des informations retenues est capital et il est d'autant plus délicat à opérer que la quantité des stimuli est importante.

Outre ces informations potentiellement utiles, l'environnement regorge de stimuli qui ne présentent aucun intérêt pour la réalisation de la tâche : Paas et al. (2003) parlent d'une charge cognitive extrinsèque. Par exemple, la musique diffusée à la radio constitue

une source non pertinente d'informations pour la conduite. Toutefois, bien qu'inutiles, ces stimuli influencent les performances et la charge cognitive : en effet, Horrey, Lesch, Garabet, Simmons, et Maikala (2016) ont montré que le temps de réaction lors d'un freinage d'urgence est plus long lorsque les conducteurs écoutent des informations intéressantes par rapport à du contenu ennuyeux ou lorsque la radio est éteinte. Ils concluent, en se basant notamment sur des mesures physiologiques, à un investissement moins prononcé du sujet dans la tâche de conduite lorsque les discours entendus intéressent l'auditeur. Le conducteur est donc plus distrait et ses performances de conduite diminuent.

De même, Faure et al. (2016) ont étudié l'effet de la complexité visuelle dans une tâche de conduite, trois environnements, urbain, rural et autoroutier, étaient simulés. Ils ont constaté que la charge de travail des conducteurs augmente avec la complexité de l'environnement, principalement sur le trajet urbain, plus riche en distracteurs.

Enfin, Barrouillet et al. (2004) ont mis en évidence l'impact de la pression temporelle sur la charge de cognitive, principalement lorsqu'un individu doit passer constamment d'une tâche à l'autre. Au travers de plusieurs expériences durant lesquelles les sujets devaient effectuer deux tâches mnésiques en alternance, l'une comprenant des séquences de lettres et l'autre des séquences de chiffres, ils ont montré que le fait d'accorder plus de temps au sujet pour répondre donne lieu à de meilleurs rappels.

2.3.4 L'évaluation de la charge cognitive

L'évaluation de la charge, qu'elle soit de travail, mentale ou cognitive, est possible au travers de 3 mesures : physiologiques, de la performance et subjectives (Roskam et al., 2002 ; da Silva, 2014).

Les mesures physiologiques

Les paramètres biologiques constituent potentiellement des indices objectifs de l'état d'un sujet, par exemple par la concentration de certaines molécules dans la salive (Romoaldo, 2015). La salive permet d'étudier la présence de très nombreux métabolites, l'analyse de l'évolution de ces concentrations s'appelle la métabolomique : l'idée est d'induire le fonctionnement du corps humain, principalement le cerveau dans notre cas, en observant les diverses substances qu'il produit. Cette thématique de recherche fait d'ailleurs partie du cadre du projet d'action recherche concertée (ARC) à l'intérieur duquel est menée notre étude. Ces approches font l'objet de nombreuses études actuellement.

La fréquence cardiaque est un indicateur intéressant pour étudier la charge cognitive, sa collecte se réalise aisément à l'aide d'un petit capteur que le sujet porte sur la poitrine et sa résolution temporelle est bonne. De nombreuses études, dont celles de Johannes et al. (2007) ; Mehler, Reimer, Coughlin, et Dusek (2009) ; Alvear, Barón-López, Alguacil, et Dawid-Milner (2013) ont montré une corrélation entre la charge cognitive et le rythme cardiaque. Les variations de la fréquence cardiaque et la conductance cutanée sont aussi analysées (Brookhuis & de Waard, 2010 ; MacPherson, Abur, & Stepp, 2016).

Engelhardt, Ferreira, et Patsenko (2010) ont montré que le diamètre de la pupille s'accroît lorsque des sujets entendent un texte dont la prosodie a été modifiée pour ne pas suivre le sens du texte. Ils interprètent ce résultat comme étant le signe d'une augmentation de la charge cognitive provoquée par des processus de compréhension plus fortement sollicités. Ils ont d'ailleurs observé un niveau de compréhension inférieur lorsque la prosodie du texte était altérée. Zellin, Pannekamp, Toepel, et van der Meer (2011) ont mesuré

la taille maximale de la pupille et le temps qu'elle prend pour atteindre cette taille chez des sujets soumis à une tâche de compréhension orale dans laquelle les chercheurs faisaient varier la nature des informations et la prosodie. Ils ont mis en évidence une augmentation du temps pour atteindre le pic de dilatation lorsqu'une nouvelle information apparaît dans le dialogue ainsi qu'une réduction de la taille maximale de la pupille lorsque la prosodie est congruente avec l'information entendue.

Les micro-dilatations pupillaires constituent une également une mesure de la charge cognitive qui fait actuellement l'objet de nombreuses investigations (Demberg & Sayeed, 2016). L'ICA, pour *Index of Cognitive Activity*, est un indice qui est capable de discriminer les dilatations rapides de la pupille, induites par l'activité cognitive, des dilatations plus lentes qui sont le fruit d'un réflexe de l'oeil à la lumière. Il faut savoir que, même dans des conditions de luminosité constante, l'ouverture de la pupille est sujette à des variations aléatoires. Les micro-variations de la taille de la pupille sont liées à l'activité cérébrale, plus précisément à la zone appelée la tâche bleue ou *locus caeruleus*. Les neurones de cette zone émettent des neurotransmetteurs tels que la norépinéphrine qui est impliquée dans la synchronisation et la stimulation de nombreux neurones. Demberg et Sayeed (2016) ont montré que l'ICA est capable de refléter la charge cognitive induite par des exercices linguistiques tels que des tâches de décision lexicale ou de violation sémantique, celles-ci étant effectuées isolément ou en même temps qu'une tâche de conduite sur un simulateur.

Enfin, la nictation, ou le clignement des yeux, est un indice potentiellement intéressant pour l'évaluation de la charge cognitive : c'est une technique non intrusive et contrairement à la dilatation pupillaire, la nictation n'est pas influencée par la direction du regard ni par les modifications de la luminosité (Faure et al., 2016). Ces auteurs rapportent plusieurs constats : dans une tâche de conduite, une fréquence de nictation plus basse est mesurée lors de virages à droite et à gauche en comparaison d'une conduite en ligne droite. Des expériences basées sur des tâches visuo-spatiales ont montré les mêmes résultats. Outre la fréquence, la durée de fermeture des paupières est plus basse. Il semblerait que ces diminutions de fréquence et de durée s'expliquent par une inhibition de la nictation provoquée par une attention accrue sur la tâche. Patel, Henderson, Bradley, Galloway, et Hunter (1991) rapportent une forte réduction de la fréquence de nictation lors de l'usage d'un écran : elle passe de 18.4 clignements par minute en condition de repos à 3.6 clignements par minute lors l'utilisation d'un jeu de cartes sur un ordinateur. Rosenfield, Jahan, Nunez, et Chan (2015) ont mené une expérience au cours de laquelle les sujets ont été amenés à lire deux textes, un simple et un complexe, soit imprimés sur une feuille de papier, soit affichés une tablette. Ils infirment les résultats de Patel et al. (1991) mais ils relèvent un effet de la charge cognitive : la lorsque la charge cognitive est plus élevée, le taux de nictation chute. Ils observent également un effet d'interaction entre le support et la charge cognitive : l'effet de la charge est moins marqué sur le support électronique. A l'inverse, l'introduction d'une tâche secondaire de nature cognitive induit une augmentation du nombre de nictations , celle-ci est surtout notable sur les clignements de courte durée (70-100 ms). Une explication serait que l'ajout d'une seconde tâche supprimerait l'effet d'inhibition de la nictation. Dans leur expérience, Faure et al. (2016) obtiennent des résultats qui vont dans ce sens : la fréquence de nictation augmente lorsque les sujets exécutent une tâche secondaire de nature cognitive en plus d'une tâche de conduite. Ils ont aussi mis en avant un effet de l'environnement (urbain, campagne, autoroute) sur le nombre de clignements des yeux.

Enfin, bien qu'il ne s'agisse pas de mesures physiologiques directes, signalons que de très nombreuses études ont été menées pour analyser les effets de la charge cognitive sur la voix, le signal de parole et le langage. La dernière partie de ce chapitre est consacrée à

une revue de ces études.

Les mesures physiologiques sont de plus en plus usitées pour objectiver les états d'un individu. De fait, avec l'évolution des outils technologiques, de nombreux paramètres biologiques sont plus en plus accessibles. Brookhuis et de Waard (2010), même s'ils encouragent la collecte de paramètres physiologiques, attirent tout de même l'attention sur le fait qu'il faut beaucoup de compétences pour collecter et traiter ces données variées. Enfin, nous avons été interpellés par le fait que certains chercheurs ayant recours à ce type de mesures ont tendance à ne plus définir les concepts qu'ils investiguent : c'est notamment le cas de Engelhardt et al. (2010), Zellin et al. (2011) ou Demberg et Sayeed (2016).

Les performances

Les performances atteintes par un individu lors de l'exécution d'une tâche constituent une autre source d'observation de la charge cognitive : celles-ci décroissent lorsque le sujet est en sous-charge ou en surcharge (Paas et al., 2003). Néanmoins, toutes les tâches, en particulier les opérations mentales, ne sont pas observables car elles ne produisent pas nécessairement de réponses comportementales. Dans ces cas-là, une observation indirecte est à privilégier, au travers notamment du signal de parole.

Il existe de nombreuses tâches spécifiques susceptibles d'engendrer de la charge cognitive et des comportements observables. Une des plus célèbres a été mise au point par Stroop (1935). Ce test se déroule en trois phases : dans la première, le sujet doit dire à voix haute la couleur de remplissage, vert, bleu ou rouge, de 100 rectangles qui lui sont montrés ; durant la deuxième phase, le sujet doit lire 100 adjectifs de couleur qui sont écrits avec de l'encre noire ; enfin dans la dernière phase, appelée condition d'interférence, il doit dire à voix haute la couleur de l'encre utilisée pour écrire les adjectifs de couleur. La couleur de l'encre est toujours différente de la valeur sémantique de l'adjectif. Pour y parvenir, le sujet est obligé d'inhiber sa lecture pour se concentrer sur la couleur de l'encre. Ce test a connu de nombreuses variantes et est toujours très utilisé (Harmegnies & Landercy, 1992 ; Ruiz et al., 1996 ; Augustinova & Ferrand, 2007 ; Le et al., 2011 ; MacPherson et al., 2016).

La tâche de Sternberg, telle que modifiée par Oberauer (2001) pour mesurer les performances en inhibition chez des sujets âgés, est un autre exemple. Deux listes de mots contenant de 1 à 3 mots de 2 syllabes sont présentées simultanément au sujet. La première est affichée sur la ligne du haut en bleu, la seconde sur la ligne du bas en rouge. Après disparition des deux listes, un rectangle bleu ou rouge apparaît. Un mot est alors affiché à l'écran : le sujet doit dire si celui-ci était présent ou non dans liste ayant la même couleur que le rectangle.

La tâche du running span (Vieillard & Bougeant, 2005) est également très usitée. Il s'agit d'une épreuve qui implique la mémoire de travail et les fonctions exécutives telles que l'inhibition et la mise à jour. L'inhibition consiste en la suppression d'informations non pertinentes afin de libérer des ressources en mémoire de travail tandis la mise à jour a pour objectif de maintenir les informations dans la mémoire de travail (Van der Linden et al., 2000). Concrètement, dans l'expérience de Vieillard et Bougeant (2005), avant le début de l'épreuve de running span, le sujet est informé qu'il va entendre une suite de consonnes et qu'il devra répéter, dans l'ordre, les n dernières consonnes après un bip

sonore marquant la fin de la série. Les auteurs font varier l'empan mnésique en deux conditions : 4 ou 5 consonnes à restituer dans l'ordre. Dans cette version, ils ont utilisé des séries requérant : n mises à jour (le sujet doit répéter toutes les consonnes); n+2 mises à jour soit 2 inhibitions; n+4 mises à jour soit 4 inhibitions. Plus le nombre de mises à jour et par conséquent d'inhibitions est important, plus la tâche est ardue et plus les performances se dégradent.

Mendoza et al. (1999) ont fait varier la charge cognitive de leurs sujets en leur demandant de parler plus vite ou plus clairement, en les plaçant dans un environnement bruyant, en leur demandant d'épeler des mots à l'envers ou de verbaliser leurs raisonnements durant la résolution d'un problème.

Outre ces tâches expérimentales conçues pour induire de la charge cognitive, les performances obtenues à une tâche globale peuvent être étudiées. Dans le domaine de la conduite automobile, qu'elle ait lieu en situation réelle ou sur simulateur, les techniques de mesure de la performance visent à évaluer l'acceptabilité et la sécurité de la conduite : c'est-à-dire le maintien du véhicule sur la route sans collision avec les autres usagers (da Silva, 2014). Le contrôle latéral consiste à tester la capacité du sujet à maintenir le véhicule sur la route. Le contrôle longitudinal peut également être testé : capacité à freiner (temps de réaction), à estimer une distance, etc. D'autres comportements peuvent être pris en compte : le fait de céder le passage au autres véhicules, de changer de voie de circulation, l'ajustement de la vitesse à l'approche d'un obstacle, l'utilisation des indicateurs de direction, les comportements envers les piétons, les dépassements, etc. (Ibeas et al., 2014).

Afin d'estimer la performance atteinte à des tâches cognitives qui ne produisent pas de comportements observables, l'utilisation d'une double tâche se révèle être une piste intéressante (Megaw, 2005). Par exemple, le recours à l'énonciation d'une litanie est envisageable. Johannes et al. (2007) ont demandé à des soldats de compter à voix haute pendant la réalisation d'exercices mentaux. Cette deuxième tâche étant routinière, elle ne consomme que très peu de ressources. L'évaluation de la performance à la seconde activité donne une indication sur les capacités allouées à la tâche principale, a fortiori si une ligne de base a été mesurée pour la litanie.

Le recours au paradigme de la double tâche se pratique aussi avec des tâches principales produisant des comportements observables. Dans ce cas, il s'agit d'ajouter une tâche secondaire pour estimer la proportion de ressources allouées à la tâche principale. En règle générale, l'objectif de la tâche secondaire n'est pas d'interférer avec la tâche principale mais d'essayer de mesurer la quantité de charge que cette dernière représente. Les tâches secondaires font souvent appel à la mémoire, au calcul ou à l'attention.

Paas et al. (2003) calculent l'efficacité (E) de l'effort mental en fonction des performances obtenues en rapportant la différence entre les notes centrées réduites de la performance et de l'effort sur la racine carré de 2 (voir figure 2.9).

$$E = \frac{Z_{\text{Performance}} - Z_{\text{Effort mental}}}{\sqrt{2}}$$

FIGURE 2.9 – Formule du calcul de l'efficacité (Paas et al., 2003)

Ainsi, sur base des notes z, ils représentent chaque sujet dans un plan cartésien et visualisent son écart avec la droite effort mental = performance, soit $E=0$. L'efficacité dépend de la distance (valeur de E) et de la position (signe de E) par rapport à cette

droite. Comme illustre la figure 2.10, l'efficacité est d'autant plus faible que E est grand et négatif (zone C sur la figure) et d'autant plus forte que E est grand et positif (zone A sur la figure).

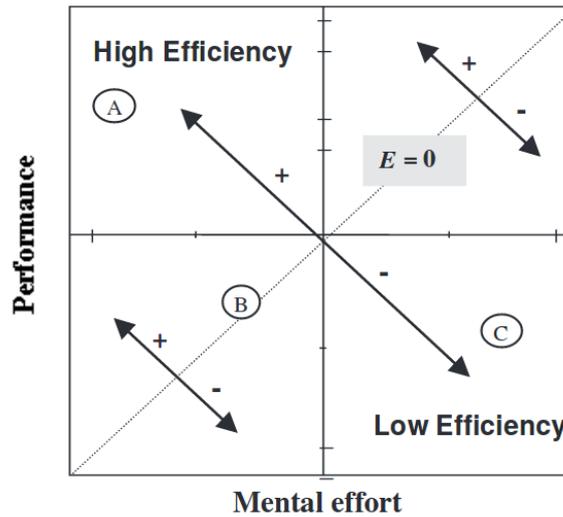


FIGURE 2.10 – Rapport entre l'effort mental et la performance (Paas et al., 2003, p. 68)

Nous estimons que le calcul de l'efficacité, c'est-à-dire le rapport entre les ressources investies et le résultat obtenu, est intéressant mais qu'il reste très théorique : une variation d'effort ne se traduit pas nécessairement dans les performances (Chanquoy et al., 2007).

Les performances offrent une belle opportunité d'estimation de la charge cognitive. Plusieurs mesures existent : elles portent soit directement sur la tâche si celle-ci se traduit par des comportements observables, soit indirectement, au travers du paradigme de la double tâche, sur des tâches secondaires permettant d'inférer l'importance des ressources cognitives allouées à la tâche principale. Il faut néanmoins rester vigilant quant à l'interprétation des performances car, comme nous l'avons vu précédemment, celles-ci sont affectées par les caractéristiques individuelles et, sur une courte période, elles peuvent rester stables alors que la charge cognitive fluctue.

Les mesures subjectives

Pour connaître la perception qu'a un individu de la charge cognitive qu'il subit, le recours à des questionnaires d'auto-évaluation est tout indiqué. Très utilisé (Lin et al., 2012 ; Faure et al., 2016), l'indice *Task Load indeX* (TLX) (Hart & Staveland, 2005) a été développé pour la NASA. Il mesure la charge de travail, concept intégrant la charge cognitive, et comporte 6 échelles.

1. **Mental Demand** - cette échelle évalue la quantité de sollicitation mentale (penser, décider, calculer, chercher, analyser, se souvenir ...) requise par la tâche ainsi que sa complexité.
2. **Physical Demand** - cette échelle interroge la quantité d'exigence physique (pousser, tirer, tourner, activer, contrôler...) requise par la tâche ainsi que la difficulté de celle-ci.

3. **Temporal Demand** - cette échelle mesure la pression temporelle ressentie pour l'exécution de la tâche : le temps accordé est-il suffisant pour mener l'activité à terme en toute quiétude ?
4. **Performance** - cette échelle porte sur la performance : tous les objectifs de la tâche ont-ils été atteints et avec quel degré de satisfaction.
5. **Effort** - cette échelle interroge sur la quantité d'effort que le sujet a fourni pour mener la tâche à son terme : Elle représente la quantité de ressources mentales et physiques qui ont été investies dans l'activité.
6. **Frustration** - cette échelle évalue le niveau de frustration ou de satisfaction ressenti lors de l'exécution de la tâche : nous établissons ici un parallèle avec la notion de charge émotionnelle.

Cette méthode est conçue pour s'appliquer à l'évaluation de nombreuses activités très diverses grâce à la pondération de chacune des échelles en fonction de leur importance dans la charge de travail perçue. Les échelles sont comparées deux à deux (15 comparaisons successives) : pour chaque paire, le sujet doit choisir quelle composante a représenté le poids le plus important dans la charge de travail. Chaque échelle est ainsi citée un certain nombre de fois, ce score correspond à leur poids. La mesure de la charge mentale consiste en la somme du score de chaque échelle multipliée par sa pondération (Hart & Staveland, 2005).

D'autres outils tels que le *Subjective Workload Assessment Technique* (SWAT) (Rubio, Díaz, Martín, & Puente, 2004) existent : il s'agit aussi d'une méthode basée sur trois échelles (charges temporelle, de l'effort mental, du stress psychologique), chacune comprenant trois affirmations. Sur base, entre autres, d'un classement de ces items, un score sur 100 est calculé dans chaque domaine. Enfin, des échelles unidimensionnelles sont employées, citons, par exemple, la *Rating Scale Mental Effort* (Zijlstra & Doorn, 1985) grâce à laquelle le sujet évalue l'effort perçu qu'il a fourni pour effectuer une tâche.

Une autre manière d'estimer la charge cognitive est d'analyser de façon subjective les exigences de la tâche. Le recours à un expert du domaine est une technique couramment usitée (Megaw, 2005). Cette méthode évalue la charge de la tâche mais reste néanmoins subjective puisqu'il s'agit de l'avis d'une personne.

Dans leur expérience avec des pilotes militaires, Huttunen et al. (2011) ont demandé à un expert d'évaluer, a posteriori, la charge cognitive de chacun de ceux-ci à l'aide d'échelles visuelles graduées de 0 à 100 représentant la conscience de la situation (SA), la charge informationnelle (IL) et la charge décisionnelle (DL). Ils ont ainsi obtenu un score pour chaque dimension permettant de mesurer la charge cognitive. Lors d'une étude similaire sur les effets de la charge cognitive auprès de pilotes de F-16, nous avons, à l'image de Huttunen et al. (2011), procédé à une hétéro-évaluation de la charge engendrée par chacune des phases de vol (Stavaux et al., 2016). De même, cette pratique est courante dans le secteur du transport routier : Ibeas et al. (2014) ont demandé à deux experts d'appliquer le protocole de Lund pour juger la qualité de la conduite de leurs sujets en situation réelle.

A la lumière de ces quelques éléments, nous pensons qu'il est très important de demander aux individus d'évaluer subjectivement la charge qu'ils ont ressentie. Cela est d'autant plus vrai si l'on adopte une approche transactionnelle. Des outils tels que le NASA-TLX ont montré leur efficacité. Le recours à des experts est aussi une solution intéressante, l'idéal étant de recruter plusieurs

examineurs afin de vérifier la fidélité inter-juge. Cependant, lors de l'interprétation, nous estimons qu'il faut garder à l'esprit que toutes les personnes n'ont pas la même aisance pour s'auto-évaluer.

2.4 Les charges de travail, mentale et cognitive : synthèse

Discriminer la charge de travail et la charge mentale de la charge cognitive est exercice peu évident, voire périlleux car toutes sont très souvent impliquées simultanément (Sperandio, 1988), mais cela nous a permis de baliser notre progression théorique. Afin d'être clair sur la distinction que nous opérons entre ces trois notions, nous considérons que lorsque la majorité des opérations à effectuer sont de nature purement cognitive, c'est-à-dire qu'il s'agit de traitements tels que la focalisation, l'inhibition, la mise à jour, la planification ou la mémorisation, le terme de charge cognitive est le plus adéquat. Lorsque des émotions sont impliquées en plus de ces traitements cognitifs, nous estimons qu'il s'agit de charge mentale. Enfin, si des comportements physiques sont également mobilisés, nous utilisons le terme de charge de travail. Cela signifie que lorsque nous utilisons le terme de charge de travail, sauf cas particulier comme un exercice physique (Wittels et al., 2002), la charge cognitive est toujours sous-entendue.

Au travers des définitions et des modèles discutés, nous avons relevé de nombreux éléments communs aux différents types de charge. Le premier est que la charge de travail résulte la perception qu'a un individu particulier d'une tâche spécifique se produisant dans un contexte singulier (Chanquoy et al., 2007). Le quantité de ressources mobilisables dépend des capacités attentionnelles, mnésiques et cognitives, des connaissances, des stratégies, de l'expertise et de la motivation du sujet. c'est sur base de tous ces éléments que l'individu évalue les demandes de la tâche.

Il est néanmoins possible d'objectiver les exigences de la tâche (Sperandio, 1988) : la charge de la tâche (Paas et al., 2003) est déterminée par la quantité, la qualité, l'accessibilité et la nature des informations mais aussi par la quantité, la nature et la complexité des traitements à opérer et encore par la quantité et la portée des décisions à prendre (Endsley, 1995 ; Huttunen et al., 2011).

L'individu réalise toujours une tâche dans un environnement particulier : celui-ci contribue à amoindrir ou à renforcer le niveau de la charge cognitive en stimulant l'individu ou, au contraire, en fourmillant de stimuli inutiles (Ibeas et al., 2014 ; Faure et al., 2016).

La relation entre l'effort mental consenti et les performances observées est délicate à interpréter : les performances ne traduisent pas nécessairement la quantité d'efforts délivrés (de Waard, 1996) : un sujet expert, grâce à ses connaissances et à ses stratégies automatisées aura besoin de peu d'investissement pour atteindre un haut niveau de performance alors qu'un individu novice devra recourir à des opérations mentales contrôlées plus lourdes qui aboutiront parfois à un faible niveau de performance. (Nguyen-Xuan, 1995 ; Leclercq & Zimmermann, 2000).

Plusieurs méthodologies éprouvées existent pour mesurer les performances d'un individu, en ce compris pour des activités mentales ne produisant pas de comportements observables. En plus de ces indices, Brookhuis et de Waard (2010) recommandent de collecter des mesures physiologiques même si leur interprétation requiert des compétences

pointues. Enfin, compléter ces mesures par le ressenti du sujet ou l'avis d'un expert apporte un complément d'informations précieux pour l'interprétation des résultats.

Chapitre 3

Les relations entre la charge de travail et le stress

Le stress et la charge de travail entretiennent des relations étroites : rappelons que Hansen et al. (2000) l'ont classée comme un facteur de stress psychologique. D'ailleurs, Hagmueller et al. (2006) vont dans le même sens en établissant une relation causale entre la charge de la tâche, la charge de travail, le stress et ses effets sur la production de parole. Cette relation est modélisée à la figure 3.1.

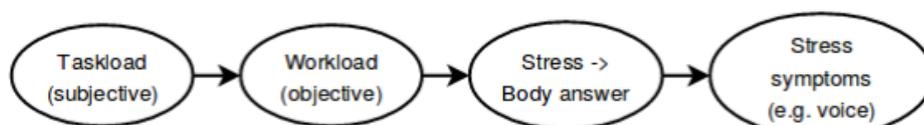


FIGURE 3.1 – Relation entre charge de la tâche, charge de travail, stress et symptômes du stress (Hagmueller et al., 2006, p. 6)

Signalons que la modélisation de la relation entre la charge de la tâche et le charge de travail proposée par Hagmueller et al. (2006) comporte une erreur non négligeable : en effet, la charge de la tâche est présentée comme subjective et la charge de travail comme objective. Or, cette affirmation va à l'encontre de leurs propres définitions de la charge de la tâche et de la charge de travail, lesquelles sont, ironiquement, rédigées sur la même page.

Dans son article de synthèse sur la norme internationale consacrée aux principes ergonomiques de la charge de travail mental (ISO, 1991), Nachreiner (1999) reproduit un schéma, visible à la figure 3.2, qui illustre la relation entre les contraintes et les astreintes mentales.

Nous pouvons tirer plusieurs enseignements de ce modèle : premièrement, nous retrouvons nos trois entités de la charge cognitive : à savoir l'environnement, la tâche et l'individu. Deuxièmement, les contraintes mentales (Sperandio, 1988), appelées mental stress dans le modèle, sont induites par la tâche, l'équipement, les environnements physique et social. Nous faisons le parallèle entre les contraintes mentales et la charge de la tâche (Hagmueller et al., 2006). Troisièmement, les contraintes mentales, lorsqu'elles sont appréhendées par l'individu, sont dès lors nommées mental strain dans le modèle, soit astreintes mentales (Sperandio, 1988). Nous les associons à la charge mentale de travail

(Hagmueller et al., 2006). Quatrièmement, les contraintes mentales entraînent des effets facilitateurs comme l'activation et l'échauffement. Nous effectuons le rapprochement entre ces effets et les stratégies destinées à mobiliser de l'énergie pour faire face à la tâche. Dernièrement, les contraintes mentales induisent différents effets nuisibles comme de la fatigue mentale, de la monotonie, une réduction de la vigilance et un dégoût de la tâche. Ces effets nuisibles correspondent, au moins en partie, aux réponses physiologiques du stress (Lundberg, 2002).

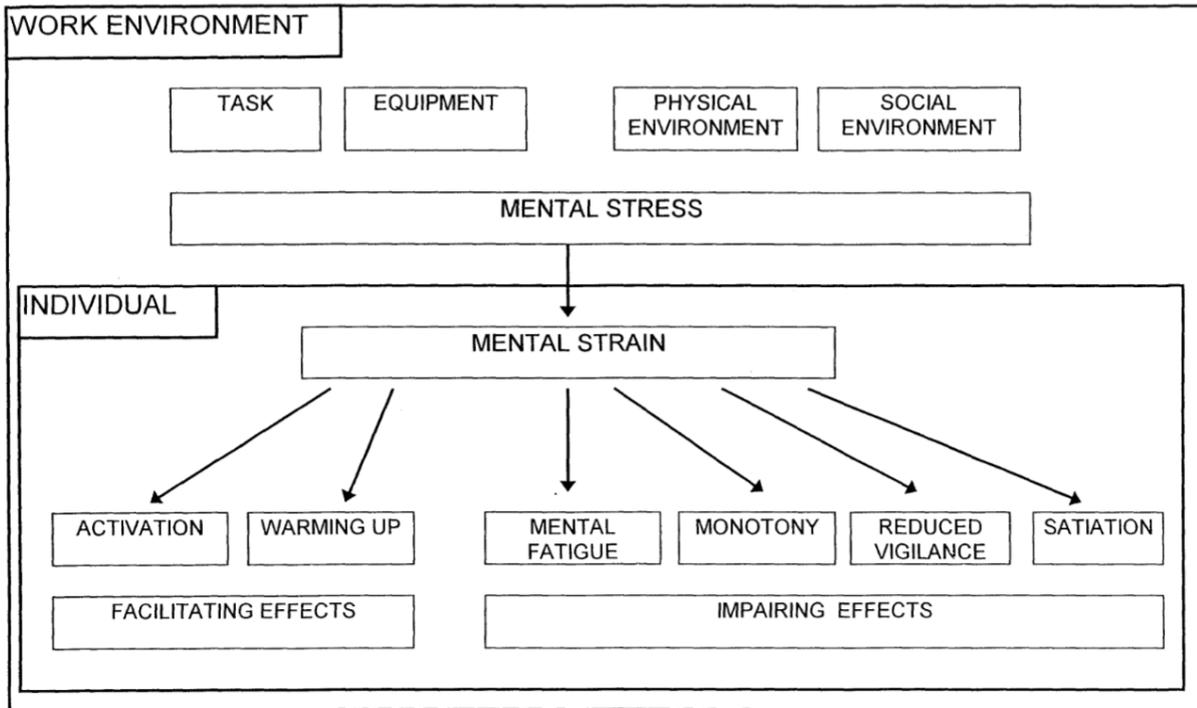


FIGURE 3.2 – Modèle ISO des contraintes et des astreintes mentales (Nachreiner, 1999, p. 129)

Dès lors, nous pouvons analyser la relation entre charge cognitive et stress dans l'autre sens : les états passagers induits par le stress tels que la fatigue (Faure et al., 2016) contribuent à alourdir la charge de travail en réduisant les ressources mobilisables et en requérant un effort compensatoire.

En prenant un peu de recul, nous nous apercevons que le stress et la charge cognitive présentent de nombreuses similarités : perception de la situation ou de la tâche par les biais de multiples appréciations cognitives, importance de l'interaction entre les facteurs liés à l'individu et à l'environnement, stratégies d'adaptation face à l'événement ou à la tâche. D'ailleurs, ce raisonnement est également applicable aux émotions. Dès lors, en guise de synthèse, nous avons entrepris de concevoir notre propre modélisation du stress induit par la charge cognitive. Ce modèle est présenté à la figure 3.3.

Pour étayer l'intérêt de notre modèle, nous illustrerons notre démonstration avec une tâche de conduite automobile. Précisons avant de commencer que ce modèle prend tout son sens dans des situations multi-focales, complexes et dynamiques, comme celles décrites par Martin et al. (2013) en aéronautique.

Pour commencer, nous avons intégré nos trois entités : l'individu, symbolisé par la zone rouge ; la tâche, circonscrite dans la zone bleue et l'environnement, s'étendant dans

la zone verte. A titre d'exemple, prenons un jeune conducteur qui circule avec son véhicule sur la bande de droite d'une autoroute à trois voies.

Un événement subit se produit dans l'environnement. Dans notre exemple, le pneu d'un camion circulant sur la bande de droite éclate et celui-ci freine brusquement et commence à se déporter sur la bande centrale.

L'exigence de la tâche de conduite, ou charge intrinsèque (Paas et al., 2003), augmente objectivement car le nombre d'informations à traiter croît, les traitements sont complexes et de nature variée, les décisions à prendre sont critiques et leurs conséquences doivent être anticipées (Huttunen et al., 2011). En effet, dans notre exemple, beaucoup d'informations sont disponibles : le bruit de l'éclatement du pneu, le déplacement du camion, l'allumage des feux arrières, la présence de plusieurs véhicules rapides sur les bandes centrale et de gauche. La qualité de certaines informations est dégradée : seul un feu arrière du camion sur deux fonctionne. Une information n'est pas accessible : la voiture sur la bande centrale la plus proche du conducteur se trouve dans l'angle mort du rétroviseur latéral. Le conducteur a le choix entre plusieurs décisions, certaines sont susceptibles de provoquer un accident. La plus sûre est de procéder à une manœuvre d'évitement en focalisant son regard sur la bande d'arrêt d'urgence pour s'y déporter et ensuite freiner le plus efficacement possible tout en allumant ses feux de détresse pour avertir les autres conducteurs. Une alternative consiste à freiner suffisamment pour augmenter la distance avec le camion. Le conducteur peut aussi tenter de changer de voie circulation pour dépasser le camion en perdition, cette manœuvre est beaucoup plus risquée car il doit tenir compte de la position des autres véhicules. La plus mauvaise décision étant de freiner le plus fort possible et de fixer le camion du regard : cette décision va orienter le véhicule vers l'obstacle et le freinage risque de verrouiller la direction, rendant toute correction de trajectoire ultérieure impossible.

L'environnement joue un rôle crucial (Ibeas et al., 2014 ; Faure et al., 2016) car il ajoute des stimuli, certains sont pertinents, d'autres doivent être inhibés. Dans notre exemple, le téléphone du conducteur sonne au moment de la survenue de l'événement, le conducteur doit l'ignorer mais doit prendre en compte le fait que la route est humide à cause de la légère pluie, ce qui modifie l'adhérence de son véhicule. Par ailleurs, le temps disponible pour réagir est minime, la situation se caractérise donc par de la pression temporelle (Martin et al., 2013).

L'individu joue donc un rôle central, il va appréhender toutes les caractéristiques de la tâche et de l'environnement pour se construire une représentation personnelle des exigences de la situation. Cette phase correspond à l'évaluation cognitive primaire telle que décrite par Lazarus et Folkman (1984). Dans notre exemple, le fait que notre conducteur soit novice implique qu'il a peu d'expertise : s'il n'a jamais vécu de situation analogue, il risque de sous-estimer les demandes objectives de la tâche et la dangerosité de la situation.

Pour faire face à la tâche, l'individu se trouve dans un état particulier et dispose de ressources et de connaissances (Chanquoy et al., 2007). Dans notre exemple, notre sujet est bien éveillé et calme, il est attentif à ce qui se produit devant lui et est capable de procéder à des raisonnements cognitifs très rapidement : il évalue la décélération et le changement de trajectoire du camion. Lors de son apprentissage en auto-école, son moniteur lui a appris à effectuer une manœuvre d'évitement, il connaît la procédure mais n'est pas en mesure de l'exécuter de façon spontanée. En revanche, il est capable d'effectuer un freinage puissant tout en conservant la maîtrise de sa direction. Il est donc en mesure de mobiliser de nombreuses ressources et de fournir un effort maximal suffisant pour répondre adéquatement à la situation.

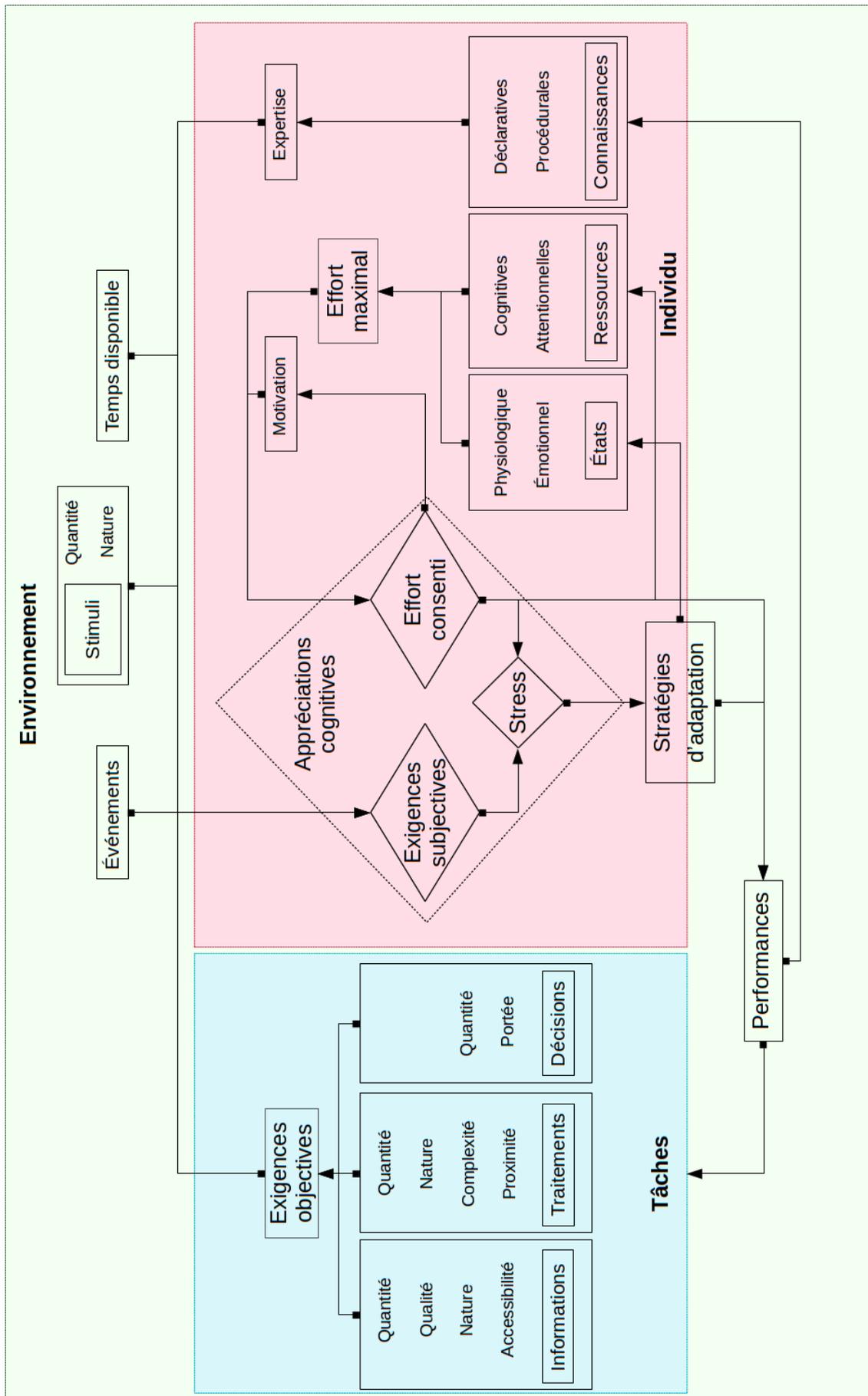


FIGURE 3.3 – Modèle dynamique du stress induit par la charge de travail

L'individu réalise alors une évaluation cognitive secondaire pour déterminer la quantité de ressources à mobiliser et l'effort effectif à prodiguer. La quantité de ressources mobilisées et l'effort effectif dépendent de la motivation de l'individu (da Silva, 2014). Dans notre exemple, comme il se rend à l'anniversaire de son frère et qu'il est déjà en retard, notre conducteur est motivé pour arriver le plus vite possible et souhaite ne pas ralentir son allure. Par conséquent, il décide, dans un premier temps, de décélérer en relâchant simplement l'accélérateur.

L'individu procède à une appréciation cognitive de l'adéquation entre, d'une part, des exigences subjectives et, d'autre part, les ressources mobilisées et l'effort consenti (Cox & Mackay, 1978). Lorsque les ressources sont inférieures aux demandes, une situation de stress émerge et l'individu adopte des stratégies d'adaptation, tantôt inconsciemment (Lundberg, 2002), tantôt volontairement (Ibeas et al., 2014). Dans notre exemple, notre conducteur s'aperçoit rapidement que l'effort consenti n'est pas adapté : la distance le séparant du camion se réduit, ce qui renforce le danger et les exigences de la tâche. Cette différence entre les ressources mobilisées et les exigences perçues engendre un stress, lequel déclenche l'adoption de stratégies de coping. Parmi celles-ci, une entraîne des réactions physiologiques telles qu'une augmentation du rythme cardiaque pour mieux oxygéner les muscles et le cerveau, une autre l'amène à revoir les exigences de la tâche, les ressources à mobiliser et l'effort à consentir grâce à l'évaluation des performances, une autre enfin lui permet de réguler ses émotions. Instinctivement, notre jeune conducteur entame un freinage dont il contrôle la puissance et arrive ainsi à stabiliser la distance qui le sépare du camion. Finalement, après quelques légères corrections de trajectoire, le camion réduit progressivement son allure et se stationne sur la bande d'arrêt d'urgence.

A l'issue de cette aventure, notre conducteur novice se retrouve face à une tâche de conduite plus simple, il peut procéder à une régulation émotionnelle pour restaurer son calme (Folkman, 2008). En se basant sur ces performances et en réévaluant l'événement a posteriori, il peut tirer des enseignements de cette situation tels que l'importance de la distance de sécurité et de l'anticipation. Tout cela l'amène à accroître ses connaissances et à développer son expertise.

Notre modèle du stress induit par la charge cognitive, bien qu'il n'ait pas pour ambition d'être exhaustif, est complexe car il tient compte de processus parfois très rapides liés aux systèmes physiologique, émotionnel et cognitif. Il est capable, selon nous, de mieux expliciter la transaction singulière qui se déroule entre un individu, son environnement et la tâche à laquelle il est confronté. Nous pensons qu'il est particulièrement adapté aux situations dynamiques et que la prise en compte de toutes ses dimensions offre l'opportunité de mieux objectiver, notamment en situation écologique, les résultats observés, que ce soit les comportements directs ou indirects comme les effets dans la production de parole.

Chapitre 4

Le signal de parole

4.1 La parole et la voix, même concept ?

La littérature scientifique abonde d'études analysant le signal de parole sous l'effet de différents stressseurs. Une simple lecture du titre de ces publications montre que certains auteurs traitent spécifiquement de la voix, ou *voice* en anglais (Wittels et al., 2002; Hagmueller et al., 2006; Johannes et al., 2007; Alvear et al., 2013) alors que d'autres se concentrent sur la parole, ou *speech* (Harmegnies & Landercy, 1992; Ruiz et al., 1996; Murray et al., 1996; Hansen et al., 2000; Fernandez & Picard, 2003; Huttunen et al., 2011; Yu et al., 2014). MacPherson et al. (2016) utilisent, quant à eux, les deux termes simultanément au sein du titre de leur article.

Le chercheur profane que nous étions lors de nos premières lectures a tout d'abord estimé que ces termes étaient synonymes. D'ailleurs, bien que Hansen et al. (2000) et Hagmueller et al. (2006) présentent des résultats identiques issus de bases de données partagées (SUSC-0 : Speech Under Stress Conditions, SUSAS : Speech Under Simulated and Actual Stress, DERA : Defence Evaluation Research Agency), les premiers emploient le terme parole dans le titre de leur rapport alors que les seconds préfèrent le mot voix.

Cependant, une lecture plus attentive laisse supposer que tous ces auteurs choisissent, en règle générale, leurs termes avec grand soin. Par exemple, Yu et al. (2014) emploient préférentiellement le terme parole, 28 occurrences dans leur article, alors qu'ils mesurent uniquement la fréquence fondamentale qui est, comme nous le verrons plus loin, l'indice acoustique le plus utilisé pour la voix, laquelle totalise seulement 18 occurrences auxquelles il faut en ajouter 2 pour l'adjectif "vocal".

Ce qui nous interpelle le plus n'est pas le fait que les chercheurs mélangent voix et parole, mais plutôt le constat qu'aucun ne définit ces concepts. Face à cet état de fait, deux pistes d'explications sont envisageables : soit ces concepts sont tellement évidents qu'il n'est pas utile de les définir, soit les différencier est inutile. Si la première piste est vraie, il est, selon nous, regrettable qu'aucun des auteurs ne rappelle la définition de ces concepts alors qu'ils le font quasi-systématiquement pour d'autres comme le stress ou la charge de travail. Si, au contraire, parole peut être utilisée pour voix, pourquoi certains auteurs choisissent-ils de les distinguer dans leurs publications ?

Un détour par les ouvrages didactiques de phonétique n'est pas forcément salutaire : Ladefoged (2006) et Vaissière (2015) abordent bien sûr de façon approfondie les sons voisés et les sons non voisés mais ne différencient pas explicitement voix et parole. D'ailleurs, le terme *speech* est absent du glossaire proposé par Ladefoged (2006) alors que les entrées *voiced* et *voiceless* s'y trouvent.

A notre soulagement, Landercy et Renard (1977) apportent une réponse précise à notre interrogation sous formes textuelle et graphique. Ainsi, ils définissent la voix comme un : « *complexe sonore dont le support est fourni par le ton laryngé et auquel peuvent s'ajouter d'autres signaux apparentés aux bruits pour constituer la parole* » (Landercy & Renard, 1977, p. T14) et la parole comme un : « *acte concret et individuel des sujets usant de la langue ; cette définition saussurienne ne correspond pas à celle que nous lui donnons lorsque nous envisageons l'acte de parole tant du point de vue de la production que de celui de la perception ; dans cette perspective, la parole intègre non seulement des données linguistiques mais aussi psycho-socio-culturelles, situationnelles et proxémiques. Acoustiquement, la parole résulte de l'excitation des cavités supraglottiques par une source périodique (la voix) et/ou une source de bruits (explosions ou frictions)* » (Landercy & Renard, 1977, p. T9).

La définition de la parole proposée par Landercy et Renard (1977) est très riche : elle investigate trois domaines tandis que leur définition de la voix se cantonne à la dimension acoustique, les deux soutiennent l'idée que la voix fait partie de la parole. Pour décortiquer plus en profondeur ces définitions, des notions de base sur la production des sons de parole doivent d'abord être passées en revue.

4.1.1 La production des sons de parole

La production des sons de parole repose sur plusieurs organes, dont la fonction première n'est pas la phonation, et comporte au moins trois processus distincts (Vaissière, 2015) qui sont illustrés à la figure 4.1.

Le premier est la soufflerie subglottique : elle repose principalement sur le diaphragme, les poumons et la trachée. Le rôle du diaphragme est, en s'abaissant, de gonfler les poumons d'air et, en remontant, de les comprimer pour en expulser l'air grâce à la surpression engendrée. Dans la production des sons de parole, les poumons fournissent donc de l'énergie sous la forme d'un flux d'air. A la sortie des poumons, l'air remonte vers le larynx en empruntant la trachée.

Le deuxième processus est appelé phonation : lorsque le flux d'air arrive dans le larynx, il circule jusqu'à la glotte où il rencontre les plis vocaux, ce sont deux muscles vibratiles recouverts d'une membrane muqueuse (Vaissière, 2015). En fonction de la configuration des cartilages aryténoïdes, les plis vocaux sont écartés ou accolés. Ainsi, ceux-ci admettent ou bloquent la circulation de l'air. Dans leur configuration accolée, les plis finissent par s'écarter sous l'effet de la pression subglottique. Dès lors que l'air commence à s'échapper, la pression chute sous l'effet de l'accélération de l'air et pousse les plis vocaux à s'accoler de nouveau. Ce phénomène est décrit par la théorie myo-élastique (Landercy & Renard, 1977 ; Ladefoged, 2006 ; Vaissière, 2015). Ce cycle d'ouvertures et de fermetures recommence tant que la pression subglottique est suffisante et que les plis vocaux sont configurés pour entrer en adduction, il a pour conséquence de mettre en vibration les plis vocaux. Cette fréquence de vibration, appelée fréquence fondamentale, oscille autour de 100 Hz chez un homme adulte, 250 Hz chez une femme et 350 Hz chez un enfant. Elle est modulée par de nombreux facteurs dont la pression subglottique, la masse de plis vocaux, plus dense chez les hommes que chez les femmes, la tension des plis vocaux, ajustée à l'aide des muscles crico-thyroïdien et thyro-aryténoïdiens, et la force d'accolement des plis vocaux. Cette vibration est la source vocale, dénommée flux ou ton laryngé (Landercy & Renard, 1977) ou encore bourdonnement laryngal (Vaissière, 2015).

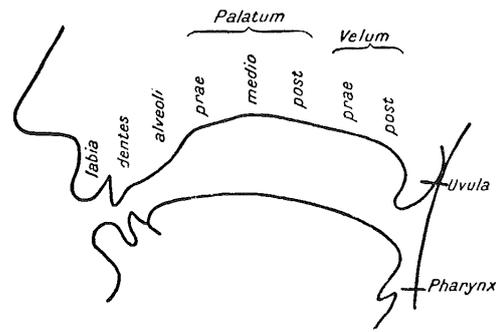
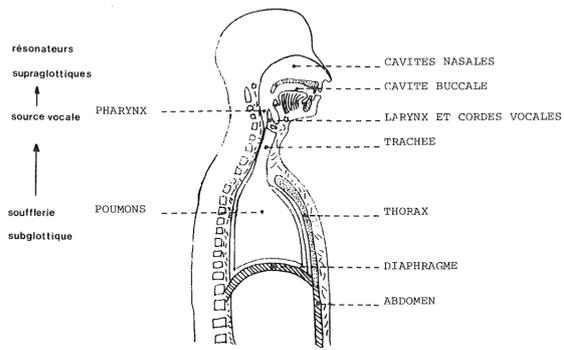


FIGURE 4.1 – Organes de la phonation (Landericy & Renard, 1977, p. 77)

FIGURE 4.2 – Lieux d’articulation, adapté de Landericy et Renard (1977, p. 89)

Le troisième processus est l’articulation. A la sortie le larynx, le flux d’air traverse diverses cavités jusqu’aux lèvres et/ou aux narines, ce parcours est qualifié de tractus vocal. La première cavité est le pharynx dont le volume est principalement modulé par l’arrière de la langue. Plus la langue est placée vers l’avant, plus la cavité pharyngale gagne en volume, ce qui favorise, grâce au phénomène de résonance, l’amplification des zones spectrales de basse fréquence du ton laryngé. Au contraire, un volume réduit renforce l’énergie présente dans les zones spectrales de haute fréquence du ton laryngé. En sortie du pharynx, le flux d’air arrive dans la cavité buccale et, si le voile du palais est en position basse, dans les cavités nasales. Dans ce cas, on parle de nasalisation. La régulation du passage de l’air vers les cavités nasales par l’abaissement ou l’élévation du voile du palais est considéré comme un quatrième processus, oro-nasal, par Ladefoged (2006). Le volume de la cavité buccale varie cette fois en fonction de l’aperture de la bouche et de la position de la langue, induisant à nouveau un renforcement de certaines zones spectrales du ton laryngé. En outre, les lèvres, et surtout la langue peuvent, selon leurs positions, laisser passer librement le flux d’air, le contraindre ou même le bloquer. Il s’agit du mode d’articulation : la contrainte est appelée constriction et le blocage porte le nom d’occlusion, toutes deux engendrent des bruits égressifs (Vaissière, 2015). De plus, contrairement aux lèvres, la langue, très mobile, a la faculté d’exercer une contrainte ou un blocage à différents endroits de la cavité buccale. Comme l’illustre la figure 4.2, l’endroit où se déroulent ces restrictions et ces occlusions s’appelle le lieu d’articulation : on identifie, en partant des lèvres jusqu’au le pharynx, les zones labiale, dentale, alvéolaire, palatale, vélaire, uvulaire et pharyngale (Landericy & Renard, 1977).

4.1.2 Les phonèmes du français

Au travers des caractéristiques vues à la partie précédente, il est possible de décrire tous les sons de parole utiles en français, également appelés phonèmes. Tout d’abord, les voyelles se distinguent des consonnes par la présence du ton laryngé et par le fait que le flux d’air circule sans aucune entrave dans les cavités supraglottiques, toutes les voyelles sont donc des phonèmes voisés. En français, les voyelles sont au nombre de 15 (voir table 4.1) et sont discriminées en fonction de leur lieu d’articulation, de l’aperture de la bouche, de la nasalisation et de la labialisation. Par exemple, le phonème /i/ est une voyelle antérieure, fermée, orale et non-arrondie : pour produire ce phonème, le locuteur doit projeter sa langue vers l’avant, quasiment fermer la bouche, relever son voile du palais pour empêcher le passage de l’air vers les fosses nasales et étirer ses lèvres.

Voyelles	Lieu d'articulation	Aperture	Nasalisation	Labialisation
/i/	antérieure	fermée	orale	non-arrondie
/y/	antérieure	fermée	orale	arrondie
/u/	postérieure	fermée	orale	arrondie
/e/	antérieure	mi-fermée	orale	non-arrondie
/ø/	antérieure	mi-fermée	orale	arrondie
/o/	postérieure	mi-fermée	orale	arrondie
/ɛ/	antérieure	mi-ouverte	orale	non-arrondie
/œ/	antérieure	mi-ouverte	orale	arrondie
/ɔ/	postérieure	mi-ouverte	orale	arrondie
/ê/	antérieure	mi-ouverte	nasale	non-arrondie
/œ̃/	antérieure	mi-ouverte	nasale	arrondie
/õ/	postérieure	mi-ouverte	nasale	arrondie
/a/	antérieure	ouverte	orale	arrondie
/ɑ/	moyenne	ouverte	orale	arrondie
/ã/	moyenne	ouverte	nasale	arrondie

TABLE 4.1 – Description des voyelles du français, adapté de Landercy et Renard (1977)

Les consonnes, quant à elles, sont le fruit d'une constriction ou d'une obstruction dans le tractus vocal à laquelle peut s'ajouter le ton laryngé, toutes les consonnes ne sont donc pas voisées. En français, on dénombre 17 consonnes dont 15 (voir table 4.2) peuvent être différenciées en fonction de leur source sonore, du mode d'articulation, du lieu d'articulation et de la nasalisation.

Consonnes	Mode d'articulation	Lieu d'articulation	Nasalisation	Source sonore
/p/	occlusive	labiale	orale	non-voisée
/b/	occlusive	labiale	orale	voisée
/t/	occlusive	dentale	orale	non-voisée
/d/	occlusive	dentale	orale	voisée
/k/	occlusive	palatale	orale	non-voisée
/g/	occlusive	palatale	orale	voisée
/f/	constrictive	labio-dentale	orale	non-voisée
/v/	constrictive	labio-dentale	orale	voisée
/s/	constrictive	dentale	orale	non-voisée
/z/	constrictive	dentale	orale	voisée
/ʃ/	constrictive	palatale	orale	non-voisée
/ʒ/	constrictive	palatale	orale	voisée
/m/	occlusive	labiale	nasale	voisée
/n/	occlusive	dentale	nasale	voisée
/ɲ/	occlusive	palatale	nasale	voisée

TABLE 4.2 – Description des consonnes du français, d'après Landercy et Renard (1977)

Par exemple, le phonème /ʃ/ est une consonne constrictive, palatale, orale et non voisée : pour produire ce phonème, le locuteur doit réduire le passage du flux d'air en

plaçant l'apex de sa langue à proximité de son palais, relever son voile du palais pour empêcher le passage de l'air vers les fosses nasales et écarter ses cartilages aryténoïdes pour que ses plis vocaux n'entrent pas en vibration.

A ces 15 consonnes, il faut ajouter deux liquides : le phonème /l/ est latéral tandis que le phonème /ʁ/ est vibrant. Ces deux consonnes liquides sont réalisables de plusieurs façons.

Le français compte également 3 semi-consonnes : le phonème /j/ est palatal et non-arrondi, le phonème /ɥ/ est palatal et arrondi alors que le phonème /w/ est vélaire et arrondi (Landeracy & Renard, 1977).

4.1.3 La production de la parole

Le fait que parler ne se résume pas à juxtaposer des phonèmes. Au contraire, ceux-ci se regroupent sous la forme de syllabes dans la chaîne parlée. Ces combinaisons sont à l'origine de la modification de certaines propriétés des phonèmes en fonction de leur proximité. La source sonore des consonnes s'altère : voisement ou dévoisement d'une consonne en fonction de la consonne suivante. L'aperture des voyelles se modifie : ouverture ou fermeture d'une voyelle en fonction de la consonne précédente. Le lieu d'articulation varie : palatalisation, vélarisation, labialisation en fonction des caractéristiques des phonèmes précédents ou suivants. Ces phénomènes d'assimilation et d'autres facteurs expliquent une grande variabilité dans la réalisation des phonèmes qui sont pourtant correctement perçus par l'auditeur.

Les syllabes sont donc une combinaison de phonèmes, elles s'assemblent en mots, lesquels s'organisent en phrases pour former un discours dont le but est de transmettre des idées. Cette production de parole repose bien sûr sur des processus cognitifs. Ceux-ci ont été décrits à l'aide de modèles dont l'un des plus connus est celui proposé par Levelt en 1989. Nous présentons brièvement ce modèle, dont la traduction française (Garcia-Debanco & Fayol, 2002) est reproduite à la figure 4.3, car il a servi de base aux travaux de Hansen et al. (2000) sur l'effet des stressés sur la production de parole.

La partie gauche de ce modèle présente les trois processus qui régissent la production de la parole : le conceptualisateur, le formulateur et l'articulateur.

Le conceptualisateur est chargé de l'élaboration conceptuelle du message qui correspond aux intentions, aux idées que le locuteur veut exprimer. Le message produit à ce stade, sans être linguistique, contient toutes les informations nécessaires à sa conversion en langage, il est appelé message préverbal. Le conceptualisateur comporte un mécanisme de contrôle dont le rôle est de s'assurer que le message préverbal correspond bien aux intentions du locuteur.

Le formulateur se charge d'encoder grammaticalement et phonologiquement le message pré-verbal : ces opérations requièrent l'accès au lexique et se scindent en deux sous-étapes : la sélection lexicale et l'encodage phonologique. Le produit du formulateur prend la forme d'un plan phonétique, c'est-à-dire la succession de phonèmes à produire.

Enfin, l'articulateur convertit le plan phonétique en paroles par le jeu des muscles respiratoires, laryngés et supra-laryngés.

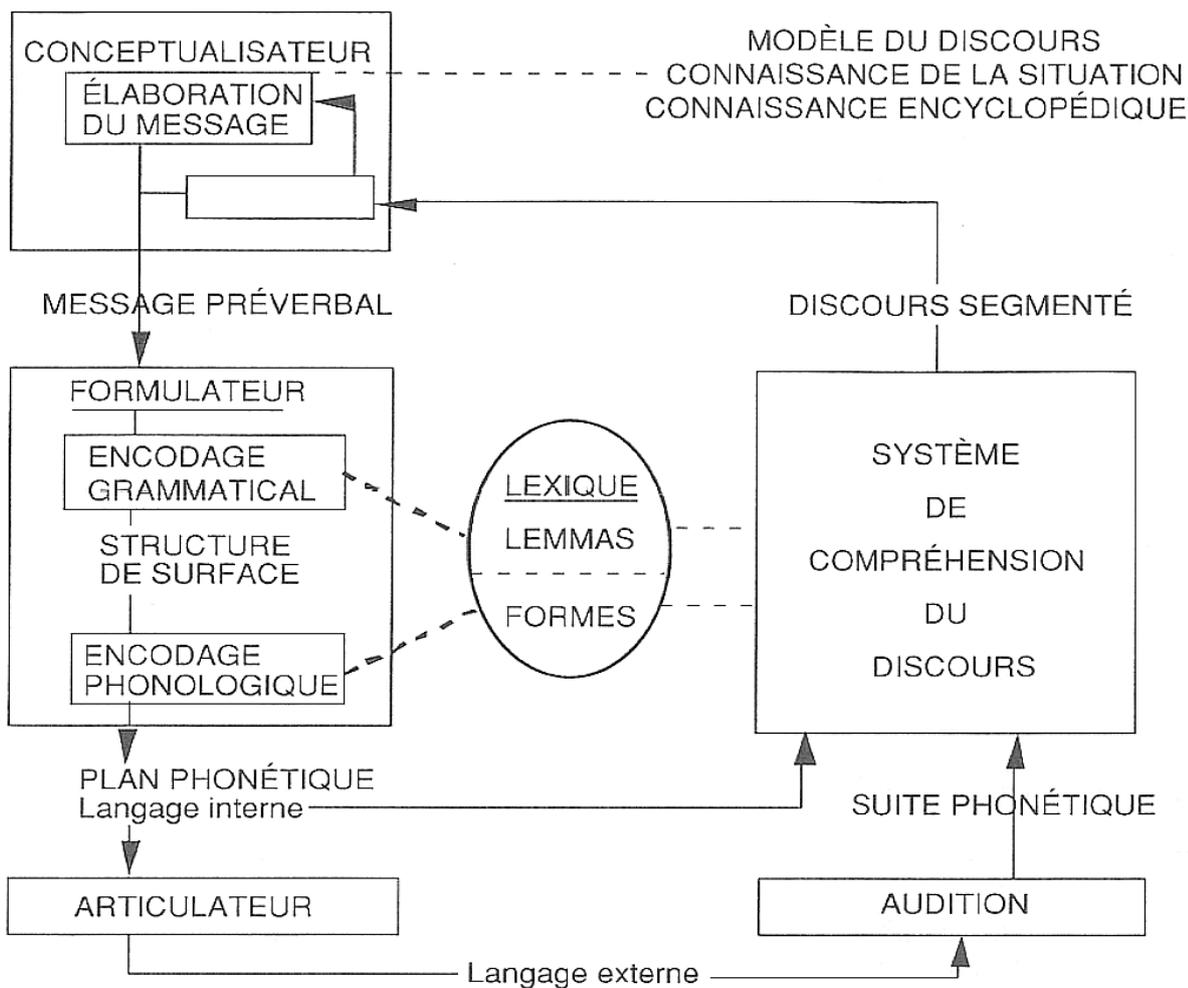


FIGURE 4.3 – Modèle psycholinguistique de la production de parole de Levelt (Garcia-Debanc & Fayol, 2002, p. 299)

Bien que non visibles sur cette traduction, Levelt a prévu de nombreuses rétro-actions dans son modèle : des mécanismes de contrôle régulent la production de parole dans et entre les processus.

Grâce à ces éclairages théoriques, nous sommes désormais plus à même de revenir sur la distinction entre voix et parole que Landercy et Renard (1977) ont résumé graphiquement dans leur ouvrage (voir figure 4.4). Sur cette illustration, nous observons que ces auteurs décrivent la voix comme la source périodique résultant de la vibration des plis vocaux, c'est-à-dire le flux laryngé, la parole correspondant, quant à elle, aux cavités supraglottiques excitées par la voix à laquelle s'ajoutent les bruits égressifs provoqués par les constriction et les occlusions.

Nous sommes tentés d'analyser ce diagramme avec plus ou moins de latitude. Dans l'interprétation la plus stricte, postulant que la parole est la somme des deux conditions (le "+" signifiant "ET" dans ce cas), la voix correspond au ton laryngé et la parole à l'ajout des constriction ou des occlusions à ce flux laryngé : cela impliquerait que seules les consonnes voisées /b/, /d/, /g/, /v/, /z/ et /ʃ/ respectent ce critère et peuvent être considérées comme de la parole. Outre le fait que cette première analyse soit peu sensée, la définition de la parole proposée par Landercy et Renard (1977) permet d'écarter cette interprétation : ils précisent que la parole est la résultante de deux types de source : une source périodique et/ou une source de bruit.

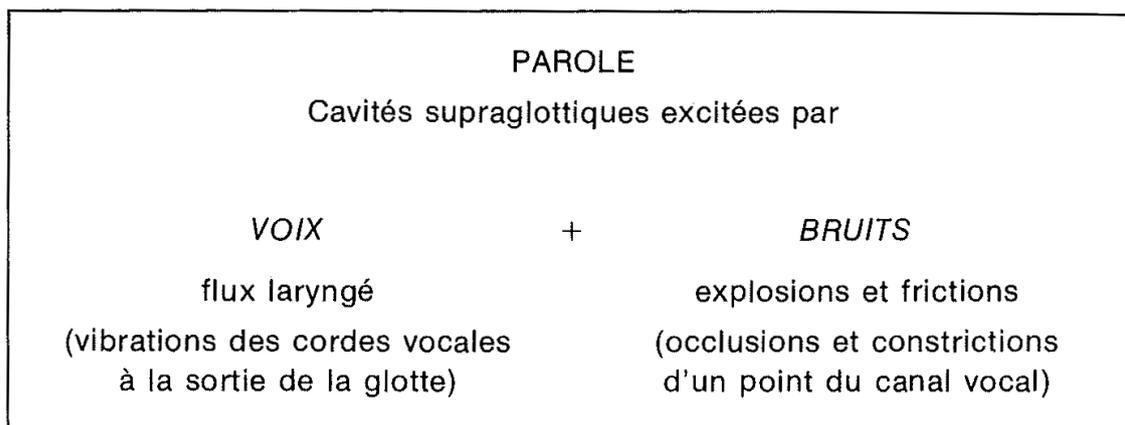


FIGURE 4.4 – Différences entre voix et parole selon Landercy et Renard (1977, p. 83)

Une deuxième interprétation, plus large, consiste à se focaliser sur la source des sons de parole : la voix correspond dès lors au signal sonore émis dans le larynx alors que la parole est observée au niveau des cavités supraglottiques. Dans cette optique, seul le terme parole peut être usité puisque le ton laryngé, étant inobservable, est toujours modulé par le tractus vocal. Dès lors, tous les phonèmes passés en revue ci-avant sont à classer dans la parole, aucun n'étant le produit isolé de la voix.

Une troisième interprétation, beaucoup plus permissive, repose sur l'idée que les sons voisés, c'est-à-dire ayant pour source primaire le ton laryngé, appartiennent au registre de la voix, sans tenir compte du fait qu'ils soient agrémentés ou non d'une constriction ou d'une occlusion. Les voyelles et les consonnes voisées relèveraient alors de la voix et de la parole tandis que les consonnes non voisées appartiendraient seulement à la parole.

D'autres interprétations sont possibles entre ces points de vue extrêmes. D'ailleurs, pour élargir encore un peu plus la réflexion, examinons les trois définitions de la voix proposées par Harmegnies (2015) lors d'un cours-conférence organisé par l'Académie royale des Sciences, des Lettres et des Beaux-Arts de Belgique. Premièrement, au sens le plus restreint, il définit la voix comme le son issu du larynx, produit par la vibration des plis vocaux. Le son laryngé n'est pas directement observable car il est transformé sous l'action des résonateurs que sont les diverses cavités qui constituent le tractus vocal. Cette première définition de la voix correspond à la seconde interprétation que nous avons faite du diagramme proposé par Landercy et Renard (1977).

Deuxièmement, Harmegnies (2015) ajoute à la première définition la notion de qualité vocale issue des travaux de Abercombie (1967) : « *la qualité acoustique propre à une personne, toujours présente, quelles que soient les caractéristiques des sons de parole qu'elle produit* » (Harmegnies, 2015, p. 151). A propos de la qualité vocale, Waaramaa, Laukkanen, Airas, et Alku (2010) précisent, en se basant sur les travaux de Laver (1980), qu'elle est la résultante des caractéristiques phonatoires et articulatoires. Ainsi, la voix ne se limiterait pas au produit des plis vocaux dans le larynx.

Enfin, Harmegnies (2015) propose une troisième définition, encore plus étendue, décrivant la voix comme : « *l'ensemble des caractéristiques portées par le signal vocal* » (Harmegnies, 2015, p.177). Cette dernière rejoint notre troisième interprétation du diagramme avancé par Landercy et Renard (1977). Bien que ces définitions ne nous permettent pas de discriminer voix et parole, elles sont néanmoins dignes d'intérêt : la parole

et la voix, dans leur globalité, sont porteuses de nombreuses informations telles que le genre, l'âge ou encore l'état du locuteur (Giddens et al., 2013).

En conclusion, nous comprenons mieux la frilosité de nombreux auteurs à avancer des définitions distinguant de façon univoque, claire et précise la voix de la parole. Tout bien réfléchi, l'approche de Ladefoged (2006) consistant à discriminer les sons voisés des sons non voisés nous paraît finalement bien plus judicieuse d'autant qu'elle s'accorde bien avec les différents types d'indices acoustiques que nous allons aborder dans la prochaine partie. Dans un souci de clarté pour la suite de ce travail, nous proposons de différencier, au niveau segmental, les sons voisés des sons non voisés et d'employer le terme de parole pour nos analyses de la chaîne parlée au niveau suprasegmental.

4.2 Les indices acoustiques

A partir du signal de parole, il est possible d'extraire de très nombreux indices acoustiques. Ceux-ci offrent l'opportunité d'apprécier les caractéristiques tantôt des sons non voisés, tantôt des sons voisés, tantôt de la parole. Nous proposons de passer brièvement en revue les types d'indices qui sont analysables dans le signal de parole.

4.2.1 Le plan segmental

Au niveau de l'analyse de la réalisation isolée des phonèmes, la présence ou l'absence de voisement conditionne les indices à sélectionner pour en décrire les caractéristiques.

Les sons de parole

En ce qui concerne tous les phonèmes, qu'ils soient voisés ou non, leur timbre, leur intensité et leur durée font l'objet d'analyse.

Pour le timbre, l'analyse la plus commune est d'évaluer la répartition de l'énergie dans le spectre des fréquences. Il existe plusieurs indices qui reposent sur un découpage du spectre en plusieurs bandes de fréquences et qui mesurent la proportion d'énergie présente dans chacune de celles-ci. Parmi ces indices, citons le rapport alpha (alpha ratio) : il s'agit de différence d'énergie entre les bandes de fréquences comprises entre 50 Hz - 1 kHz et entre 1 kHz - 5 kHz, il donne des informations sur la pente de la courbe spectrale (Guzman, Correa, Muñoz, & Mayerhoff, 2013). Dans le même ordre d'idées, l'indice de Hammarberg évalue la différence d'énergie maximale entre les bandes de fréquences comprises entre 0 kHz et 2 kHz et 2 kHz et 5 kHz. Des variations quant au découpage des bandes de fréquences utilisé pour cet indice ont été testées (Fernandez & Picard, 2003 ; Krajewski, Schnieder, Sommer, Batliner, & Schuller, 2012). Avec leur indice de la balance spectrale, Ruiz et al. (1996) proposent d'observer la répartition de l'énergie dans le spectre non plus en découpant celui-ci en bandes de fréquences choisies arbitrairement mais en fonction de la valeur fréquentielle qui divise la surface du spectre en deux parts égales.

L'intensité apprécie la puissance transportée par l'onde sonore, plusieurs indices sont employés pour la quantifier : le SPL (Sound Pressure Level) (MacPherson et al., 2016) ou le Leq (Equivalent Sound Level) (Patel et al., 2011).

La durée est, quant à elle, simplement mesurée en millisecondes. Elle peut porter sur la totalité de la réalisation d'un phonème ou sur une partie de celui-ci, par exemple, la durée maximale d'occlusion lors de la réalisation d'une consonne occlusive non voisée.

Les sons de parole voisés

En plus des indices abordés ci-avant, il en existe d'autres qui portent spécifiquement sur les sons voisés, lesquels se caractérisent par la vibration des plis vocaux. L'indice le plus commun est la fréquence fondamentale (F0) : elle évalue le nombre de vibrations des plis vocaux par seconde. Relativement simple à extraire, elle s'avère très intéressante à analyser car ses variations sont porteuses d'informations riches, notamment pour l'étude des effets du stress ou des émotions (Juslin & Laukka, 2003 ; Giddens et al., 2013).

Le mode de vibration des plis vocaux est souvent étudié sous l'angle de la qualité vocale : l'idée est d'apprécier la manière dont ceux-ci entrent en adduction et en abduction. Les indices les plus usités sont le Normalized Amplitude Quotient (NAQ) qui permet de différencier les phonations hypo-fonctionnelles et hyper-fonctionnelles, OQ (Open Quotient) qui est la durée d'abduction des plis vocaux rapportée sur la durée d'une période, CQ (Close Quotient) qui est la durée d'adduction des plis vocaux rapportée sur la durée d'une période (Waaramaa et al., 2010). Le jitter quantifie les variations de durées des périodes issues de la réalisation d'un même phonème voisé. Le shimmer mesure les variations d'intensité en comparant l'amplitude de chaque période avec ses voisines au sein d'un même son voisé (Giddens et al., 2013).

Sur le plan spectral, les zones fréquentielles proches de certaines harmoniques, des multiples de la fréquence fondamentale, sont soit amplifiées, soit atténuées par le tracé vocal. Ces zones fréquentielles amplifiées s'appellent des formants. Juslin et Laukka (2003, p.790) les définissent comme « *des régions fréquentielles dans lesquelles l'amplitude est forte. Ces emplacements sont déterminés par les cavités de résonance. Les 2 premiers formants déterminent la qualité des voyelles tandis que les suivants sont plus dépendants de chaque individu* ». Le premier formant correspond au degré d'aperture de la bouche : un /a/ se caractérise par un premier formant élevé, de l'ordre de 800 Hz chez un homme adulte, car la bouche est très ouverte tandis qu'un /i/ a une valeur proche de 250 Hz car la bouche est quasiment fermée. Le deuxième formant correspond, quant à lui, au lieu d'articulation : la voyelle /i/, antérieure, se caractérise par un deuxième formant proche de 2500 Hz alors que la voyelle /u/ a une valeur proche de 800 Hz car elle est postérieure. Les valeurs du troisième formant sont corrélées avec la labialisation. Les formants sont particulièrement intéressants à étudier car ils rendent compte des phénomènes articulatoires (Le et al., 2011).

Enfin, au niveau de la durée, outre le temps maximal de phonation, le VOT (Voice Onset Time) est étudié : pour les consonnes occlusives voisées, le VOT mesure la durée de vibration des plis vocaux durant l'occlusion jusqu'à l'explosion, appelée burst. Dans le cas des consonnes occlusives voisées, le VOT est négatif car la durée est soustraite du burst. Pour les consonnes occlusives non voisées, le VOT mesure le temps s'écoulant jusqu'à la mise en vibration des plis vocaux, nécessaire pour la réalisation de la voyelle suivante, après l'explosion de la consonne non voisée. Dans ce cas, cette durée est positive car elle est mesurée à partir du burst jusqu'à l'apparition du voisement. Le VOT est intéressant à analyser car il informe sur le contrôle moteur fin des plis vocaux et des articulateurs d'une personne (Giddens et al., 2013).

4.2.2 Le plan supra-segmental

Au niveau de la chaîne parlée, la prosodie est inspectée : elle correspond aux variations de la fréquence fondamentale, de l'intensité et de la durée dans un énoncé (Vaissière, 2015). Landercy et Renard (1977) nomment mélodie les variations de la fréquence fondamentale. L'évolution de ces paramètres est en grande partie réalisable à l'aide des indices décrits ci-avant.

Au niveau de la durée, d'autres indices sont pertinents : le taux d'articulation, c'est-à-dire le nombre de syllabes produites par seconde, la durée des pauses pleines, correspondant à l'émission tenue d'un son voisé, et la durée des pauses silencieuses, sans production de sons de parole, renseignent notamment sur la charge cognitive d'un individu (Muller, Grossmann-Hutter, Jameson, Rummer, & Wittig, 2001). En ce qui concerne les pauses, la difficulté est de déterminer à partir de quelle durée minimale elles doivent être considérées comme telles. Pour pallier cette difficulté, Piccaluga et Harmegnies (2006) proposent de calculer l'écart inter-syllabique en mesurant l'intervalle de temps séparant les pics d'intensité entre les noyaux syllabiques contigus. Plus l'écart inter-syllabique est faible, plus le débit de parole est élevé.

Enfin, le timbre d'un énoncé peut être représenté en moyennant l'ensemble des spectres pour construire le spectre moyen à long terme (SMLT), il peut être décrit au moyen des mêmes indices que ceux employés pour le spectre. Les spectres moyens à long terme sont sensibles aux spécificités du locuteur, à la langue, au contenu du corpus (Harmegnies, 1992) et évoluent dans le temps (Bruyninckx & Harmegnies, 1994). Il faut donc être attentif au choix du corpus ainsi qu'aux techniques de calcul de la moyenne des spectres (durée des spectres, type de fenêtrage, matériel employé, etc.).

En conclusion, il est possible d'extraire de très nombreux indices acoustiques dans le signal de parole. Le choix des indices à calculer dépend des phénomènes étudiés : fréquence fondamentale, fréquence des formants pour les sons voisés, répartition de l'énergie dans le spectre pour les sons de parole voisés et non voisés, écart inter-syllabique, durée des pauses et composition spectrale pour la parole. La majorité des ces indices ont été analysés dans la production de parole sous les effets du stress, la prochaine partie est d'ailleurs consacrée à une revue de ces études.

Chapitre 5

Les effets du stress dans le signal de parole

Nous pouvons désormais passer en revue les effets du stress sur la production de parole. Cependant, l'absence de définitions univoques des concepts de stress ou de charge de travail ainsi que le recours à des méthodes différentes pour le recueil des données rendent délicates la comparaison et la généralisation des résultats obtenus dans les diverses études. C'est pourquoi les résultats rapportés ci-dessous sont replacés dans leur contexte de recherche. Pour baliser cette synthèse de résultats, nous avons fait le choix de nous baser sur le modèle de la production de parole sous les effets du stress proposé par (Hansen et al., 2000). Ce modèle est reproduit à la figure 5.1.

En effet, tout en améliorant la classification des facteurs de stress proposée par Murray et al. (1996), Hansen et al. (2000) ont construit un modèle décrivant leurs effets sur la production de parole. Nous retrouvons ici le modèle de Levelt (1989) sur la partie gauche de la figure 5.1 et les facteurs de stress sur la partie droite.

L'idée défendue par Hansen et al. (2000) est que certains types de stressseurs agissent plus spécifiquement sur l'un ou l'autre processus de la production de la parole. Ainsi, les facteurs de stress physiques affecteraient principalement les articulateurs tandis que les stressseurs psychologiques impacteraient plutôt les processus cognitifs de formulation du message.

Toutefois, Hansen et al. (2000) précisent qu'un facteur de stress est tout de même susceptible de perturber plusieurs processus impliqués dans la production de parole. De plus, il existe une très grande variabilité interindividuelle quant aux effets des facteurs de stress, notamment pour les facteurs de stress des ordres supérieurs (voir table 1.1). De fait, les individus sont affectés différemment par les divers types de stressseurs, ils développent des stratégies spécifiques pour en contrer les effets. Parmi ces stratégies de coping (Folkman, 2008), l'entraînement permet aux individus de s'habituer à l'effet de certains stressseurs et d'en réduire ainsi les nuisances (Baber & Noyes, 1996).

Tout cela explique qu'un seul facteur de stress puisse parfois engendrer plusieurs effets : par exemple, la consommation d'alcool peut affecter la génération des patterns neuromusculaires (stressseur physiologique, effet sur les neurotransmetteurs) et la conceptualisation des idées (stressseur psychologique, induction de colère ou de tristesse).

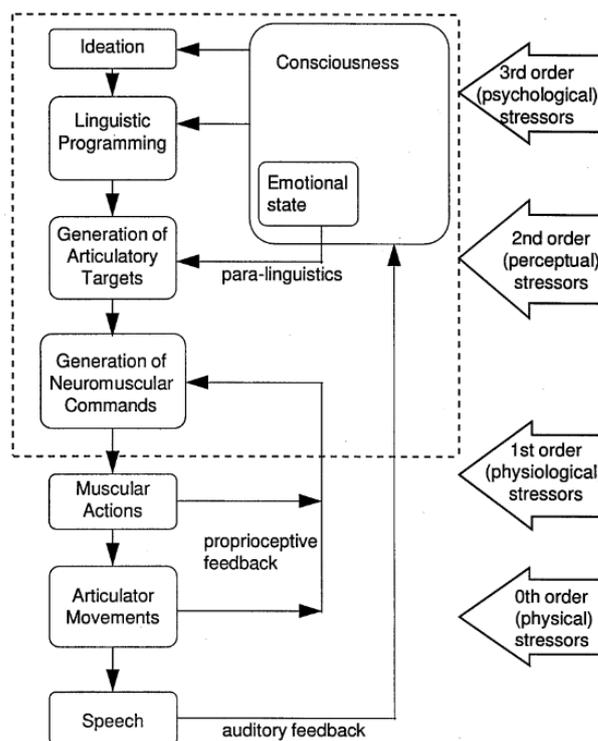


FIGURE 5.1 – Modèle de production de parole sous les effets du stress (Hansen et al., 2000, p. 6)

5.1 Les effets des stressseurs physiques sur la parole

Les facteurs de stress physiques (ordre 0 de la table 1.1) rassemblent les phénomènes qui agissent directement sur l'appareil phonatoire tels que les vibrations, l'accélération ou la pression atmosphérique. Leurs effets portent essentiellement sur le processus d'articulation.

Dans le domaine aéronautique, Baber et Noyes (1996) ont étudié les effets des vibrations, de l'accélération et du bruit sur les systèmes de reconnaissance automatique de la parole. Ils rapportent que, lors d'une accélération d'au moins 3G, seule la perception visuelle est altérée, ce qui affecte, par exemple, la lecture rapide de données affichées sur un écran. Par contre, à partir d'une force de 5G, les sujets déclarent éprouver des difficultés importantes pour la motricité fine, ce qui pénalise leur temps de réaction. La motricité fine est importante pour la coordination des articulateurs. Au delà de 6G, les articulateurs peuvent être déplacés, néanmoins, une parole intelligible reste possible jusqu'à 9G.

Les changements observés sous l'effet de l'accélération se marquent surtout par une augmentation du rythme respiratoire. Le déplacement des articulateurs se traduit par un changement de la fréquence des formants. L'accélération n'implique pas une augmentation de l'intensité mais bien de la fréquence fondamentale et une réduction de l'espace vocalique (F1, F2). De plus, au delà de 6G, des dysfonctionnements mémoriels et une incapacité à suivre les procédures sont observés, ce qui montre que les stressseurs physiques peuvent aussi impacter le conceptualisateur. Notons qu'il est possible de lutter contre la gravité, à l'aide notamment de ceinture de compression.

Yu et al. (2014) ont analysé les communications des astronautes lors de la mission Apollo 11 qui s'est déroulée en juillet 1969 et au cours de laquelle l'homme a aluni pour

la première fois. Ces astronautes ont été soumis à divers stress physiques comme de l'apesanteur, des forces d'accélération et une faible pression atmosphérique. Ces auteurs, dans une publication récente, ont mis en avant que la fréquence fondamentale des trois astronautes était globalement plus élevée lors de phases lunaire et de vol dans l'espace que lorsqu'ils étaient sur terre. Remarquons néanmoins que ces auteurs n'envisagent pas la présence d'autres facteurs de stress comme la charge de travail ou les émotions.

Hansen et al. (2000) rapportent également une augmentation de la fréquence fondamentale chez deux locuteurs soumis à une accélération supérieure à 6G ainsi qu'une réduction de leur espace vocalique (F1, F2).

Enfin, selon (Baber & Noyes, 1996), les performances motrices sont pareillement altérées par les vibrations, cela se répercute sur la respiration du sujet, la rendant irrégulière, ce qui se manifeste par des perturbations de la production de parole. Des effets similaires à ceux provoqués par l'accélération ont été constatés : hausse de F0 et réduction de l'espace vocalique (F1, F2). Cependant, les effets des vibrations sur les capacités cognitives sont moins évidents : les temps de réaction ne semblent pas être affectés.

En règle générale, les modifications induites par les facteurs de stress physiques se traduisent par un parasitage des mouvements des articulateurs et une altération du rythme respiratoire. Celles-ci produisent des effets relativement identiques chez tous les sujets, principalement une hausse de la fréquence fondamentale et une réduction de l'espace vocalique.

5.2 Les effets des stressseurs physiologiques sur la parole

Les facteurs de stress physiologiques (ordre 1 de la table 1.1) impactent l'appareil phonatoire en altérant la transduction des commandes neuromusculaires en mouvements articulatoires. Cela perturbe, entre autres, le retour en position initiale des articulateurs. Parmi ces facteurs de stress, nous retrouvons la consommation de médicaments, de drogues, d'alcool ou encore la déshydratation, la maladie, la fatigue, etc.

Notons tout d'abord que la puissance de ces facteurs de stress varie au cours du temps : la concentration des substances dans le corps se réduit grâce à la dégradation et à l'élimination par l'organisme tandis que la fatigue tend au contraire à se renforcer tant que l'individu n'a pas pris de repos. Nous n'entrerons pas ici dans les détails en ce qui concerne les effets de l'alcool, de la drogue ou des médicaments mais chacun sait que la conduite automobile, par exemple, est grandement affectée par la prise de ces substances. Effectivement, de nombreux effets indésirables tels qu'une augmentation des temps de réaction, une sous-estimation des dangers de la route entraînant une hausse de la prise de risques potentiellement accidentogène ou encore de la somnolence sont bien connus et ont d'ailleurs poussé les législateurs à en limiter, voire à en interdire, l'usage.

Dans leur revue de la littérature sur la somnolence, Krajewski et Kröger (2007) affirment que celle-ci implique des handicaps dans les étapes de perception précoce, de traitement et d'activation des patterns moteurs. Ces handicaps se marquent par des diminutions de la vitesse et de la précision dans la réalisation de tâches variées. Ces diminutions s'expliquent par une baisse des performances de la mémoire de travail, des fonctions exécutives, du contrôle de supervision, de l'orientation spatiale, de la conscience de la situation, des opérations mathématiques, des aptitudes motrices telles que la dextérité manuelle, la

force de serrage et le contrôle moteur fin. Cette chute de la performance influence également la production de la parole (Krajewski, Batliner, & Golz, 2009). Ils classent les impacts de la somnolence en 5 catégories : la planification cognitive, la respiration, la phonation, l'articulation et la radiation.

La planification cognitive correspond aux étapes de conceptualisation et de formulation de la production de la parole. La vitesse de traitement cognitif étant réduite, la planification est altérée et la coordination des processus neuromusculaires moteurs est dégradée.

La respiration joue un rôle important puisqu'elle constitue la source d'énergie de la parole. Avec la somnolence, la tension musculaire décroît, ce qui implique que la respiration soit plus calme et plus douce : la pression subglottique étant plus faible, l'intensité et la fréquence fondamentale diminuent.

Du point de vue de la phonation, la diminution de la tension musculaire résulte en une hausse de l'élasticité du tractus vocal et en une baisse la tension des plis vocaux. De plus, comme la température corporelle diminue, un changement de la viscosité du mucus présent sur les plis vocaux s'opère. Tout ces éléments favorisent une diminution de la fréquence fondamentale et une adduction moins prononcée des plis vocaux.

Au niveau de l'articulation et de la résonance des cavités, une perte d'énergie est provoquée par une moindre tension musculaire qui rend les parois du tractus vocal plus "douces". De plus, les flux laminaires sont affectés par un accroissement de la salivation et par la baisse de la température corporelle qui réduit la conduction thermique des parois du tractus vocal. Enfin, le changement de posture, le tassement de la partie haute du corps, modifient la forme du tractus vocal. Tout ceci est visible sur la forme des spectres avec une propagation de l'énergie vers les hautes fréquences, le pente spectrale est plus faible.

La radiation du signal à la sortie des lèvres est aussi affectée par la somnolence : la fréquence des deux premiers formants est plus basse car il y a une diminution des mouvements oro-faciaux, des expressions faciales et de l'étirement des lèvres, ce qui réduit la longueur du conduit vocal et amoindrit l'effort articulatoire. Enfin, une augmentation de la nasalité est observée à cause de la détente oro-pharyngale (Krajewski et al., 2012).

Le fonctionnement du corps humain est altéré par les facteurs de stress physiologiques : l'absorption ou la sécrétion de substances perturbent les neurotransmetteurs chargés de véhiculer les commandes aux muscles. L'articulation est moins précise et plus lente. La somnolence ralentit la vitesse des traitements cognitifs et le rythme respiratoire, ce qui conduit à une diminution de l'intensité et de la fréquence fondamentale. La baisse de la température corporelle et le relâchement musculaire favorisent le déplacement de l'énergie vers les hautes fréquences, ce qui affaiblit la pente spectrale.

5.3 Les effets des stressseurs perceptuels sur la parole

Les facteurs de stress perceptuels (ordre 2 de la table 1.1) sont principalement le bruit ou la dégradation du canal de communication. Ces stressseurs jouent un rôle sur la traduction des éléments linguistiques en patterns neuromusculaires. L'individu modifie ses

gestes articulatoires sans faire appel à des processus cognitifs conscients. Cela se produit par exemple lorsque le canal de communication est perturbé ou que des soucis de transmission du message sont perçus.

Selon Baber et Noyes (1996), le bruit peut affecter le traitement de l'information : les sujets exposés à un environnement bruyant ont tendance à se focaliser sur les informations de surface au détriment des aspects les plus profonds.

De plus, lorsque le bruit ambiant croît, le locuteur augmente inconsciemment l'intensité de sa voix afin de le couvrir et s'assurer que son message reste audible (Murray et al., 1996). Cette tendance à hausser la voix porte le nom d'effet Lombard. Ce phénomène est très courant dans le secteur aéronautique : le bruit des moteurs est assourdissant et des niveaux sonores de 115 dB ne sont pas rares dans un cockpit d'avion de chasse, celui-ci est heureusement atténué de près de 15 dB par le casque du pilote (Hansen et al., 2000). Même en recourant à un simulateur de vol, Huttunen et al. (2011) ont relevé des bruits ambiants d'une intensité de 75 dB.

L'augmentation de l'intensité s'accompagne d'une hausse de la fréquence fondamentale, sa distribution devenant plus leptokurtique. Une réduction de l'espace vocalique formé par les 2 premiers formants est à nouveau observée tandis que les valeurs du troisième formant s'élèvent et que l'énergie se déplace vers les hautes fréquences dans le spectre (Hansen et al., 2000).

Mendoza et al. (1999) ont mené une étude dans laquelle 82 sujets ont dû lire des virelangues, c'est-à-dire des énoncés de diction remarquables par leur énonciation complexe. Dans une des conditions expérimentales, le feed-back auditif des sujets était retardé de 250 ms. Ces chercheurs rapportent aussi une hausse de la fréquence fondamentale, des baisses du jitter et du shimmer et une propagation de l'énergie vers les hautes fréquences.

Les effets des facteurs de stress perceptuels semblent, comme les stressseurs physiques, assez semblables chez tous les sujets qui y sont confrontés : au niveau acoustique, une augmentation de l'intensité, une hausse de la fréquence fondamentale, une réduction de la valeur des deux premiers formants et un déplacement de l'énergie vers les hautes fréquences sont observés.

5.4 Les effets des stressseurs psychologiques sur la parole

Les facteurs de stress psychologiques (ordre 3 de la table 1.1) impactent principalement les processus cognitifs impliqués dans la production de parole. Ces stressseurs agissent au niveau des processus mentaux et induisent des changements dans la construction du message, mais aussi dans l'articulation. Certains facteurs de stress psychologiques sont internes à l'individu : c'est le cas notamment des émotions qui impactent le choix des mots dans le lexique mental ainsi que les commandes neuromusculaires, il s'agit des informations para-linguistiques (Hansen et al., 2000). Les stressseurs externes, tels que la charge de travail, font toujours l'objet d'évaluations cognitives ce qui ouvre la voie aux différences inter et intra-individuelles.

La fréquence fondamentale est sans doute l'indice le plus étudié pour évaluer les effets des facteurs de stress dans le signal de parole. Au cours de plusieurs expériences, consignées dans une base de données dénommée *Speech Under Simulated and Actual Stress*, Hansen

et al. (2000) rapportent que la moyenne de la fréquence fondamentale varie de manière très contrastée en condition de double tâche : elle a augmenté chez certains sujets et diminué chez d'autres. Les pilotes, 4 hommes et 4 femmes, devaient exécuter plusieurs tâches simultanément : maintenir leur avion sur son axe et verrouiller une cible en mouvement tout en prononçant 35 mots isolés.

Ruiz et al. (1996) ont étudié l'effet du stress induit par la charge cognitive sur le signal vocal en laboratoire et en conditions réelles. Lors de l'expérience en laboratoire, le sujet a été soumis au test de Stroop. En conditions réelles, les conversations captées par l'enregistreur phonique d'un avion qui s'est écrasé ont été analysées : trois moments représentant des niveaux de stress psychologique distincts ont été établis a posteriori : une absence de stress avant l'arrivée de la défaillance technique, un niveau modéré lors des échanges à propos des soucis techniques rencontrés, un niveau très élevé juste avant l'issue fatale. Ruiz et al. (1996) observent dans les deux situations une augmentation significative de la moyenne de la fréquence fondamentale. Toutefois, cette élévation ne s'est pas opérée à la même phase de vol pour les deux pilotes. Cette différence s'explique peut-être par une moins bonne conscience de la situation chez le co-pilote (Endsley, 1995). Selon Ruiz et al. (1996), l'augmentation de la fréquence fondamentale constatée au cours de l'expérience en laboratoire s'explique par un niveau d'activité supérieur : une réponse physiologique commune est l'accélération des rythmes cardiaque et respiratoire afin d'apporter plus d'oxygène aux organes. Ces auteurs ont également étudié les micro-variations de la fréquence fondamentale au sein de chaque voyelle : ils ont mis en avant une augmentation de la variabilité de la fréquence fondamentale pour le test de Stroop et chez le copilote. Cette tendance n'a par contre pas été établie chez le pilote.

Au cours d'une expérience antérieure, Harmegnies et Landercy (1992) avaient déjà relevé une hausse de la fréquence fondamentale chez un sujet soumis au test de Stroop. Cependant, lorsque ce même individu a été placé au cœur d'une double tâche : jouer au jeu vidéo Tetris et répéter des phrases, il s'est avéré que la fréquence fondamentale de ce dernier n'était plus statistiquement différente de sa ligne de base. Ces auteurs avancent une piste d'explication : si les deux expériences engendrent bien un stress induit par la charge cognitive, le test de Stroop se focalise sur des productions verbales tandis que la tâche secondaire de répétition est ajoutée artificiellement à une tâche principale qui fait essentiellement appel à des traitements cognitifs spatiaux.

Les expériences similaires relatées dans la revue de littérature proposée par Giddens et al. (2013) vont dans le même sens : des hausses de la fréquence fondamentale, de l'intensité et du rythme cardiaque sont observées auprès de pilotes d'avion soumis à des situations de vol caractérisées par une forte charge de la tâche. De même, Huttunen et al. (2011) ont observé chez 13 pilotes d'avions de chasse, lors de phases de vol et de combat simulées, des tendances similaires : la fréquence fondamentale et l'intensité moyennes ont augmenté avec le niveau de charge cognitive et la variabilité de ces indices a diminué chez 9 pilotes. Les auteurs expliquent que l'intensité influence la fréquence fondamentale, particulièrement lorsqu'elle est forte : cela s'explique par la tension musculaire et la pression subglottique. Stavaux et al. (2016) ont mené une étude comparable et ont aussi constaté des variations de la fréquence fondamentale : celle-ci a significativement augmenté sous les effets de la charge cognitive chez les trois pilotes mais à des moments différents, tout comme Ruiz et al. (1996). De plus, ils relèvent une évolution contrastée de la fréquence fondamentale au fur et à mesure de l'avancement dans les étapes du plan de vol : deux sujets ont vu leur fréquence augmenter à la fin de la simulation tandis que celle du troisième individu est redescendue sous sa ligne de base. Cette chute de la fréquence fondamentale pourrait s'expliquer par une stratégie de coping centrée sur la régulation des émotions.

Plus récemment, MacPherson et al. (2016) ont soumis 16 sujets à une variante de la tâche de Stroop et ont déterminé deux niveaux de charge cognitive : charge faible en condition congruente du test de Stroop et charge forte en condition d'interférence. Au travers d'une régression logistique binaire destinée à classer les productions de parole, ces auteurs ont montré que ni la fréquence fondamentale, ni l'intensité, appréciée au moyen du SPL, ne sont de bons prédicteurs de la charge cognitive. À l'inverse, le rapport entre l'énergie présente sous et au-dessus de 4000 Hz ainsi que la conductance cutanée sont plus fiables pour prédire la charge cognitive. Ils concluent que la qualité vocale semble être plus impactée par l'augmentation de la charge cognitive que la fréquence fondamentale et que l'intensité. Néanmoins, bien que le test de Stroop permette de manipuler la charge cognitive de façon équivalente entre les sujets grâce à des conditions expérimentales très contrôlées, la généralisation des résultats reste peu évidente.

Johannes et al. (2007) ont, quant à eux, comparé l'évolution de la fréquence fondamentale, du rythme cardiaque et de la pression sanguine chez 11 soldats soumis à des activités physiques et cognitives. Les sujets ont réalisé deux tâches : un test physique sur un vélo elliptique avec plusieurs degrés de résistance exprimés en watts et deux exercices cognitifs : le premier, sous contrainte temporelle, consistait en la sélection d'un élément parmi une série d'informations à la complexité croissante, le second, sans pression temporelle, était une tâche de résolution de problèmes de plus en plus complexes. Durant chaque tâche, les soldats devaient compter à voix haute de 1 à 10. Au niveau de la charge physique, Johannes et al. (2007) mettent en avant une corrélation entre le niveau de résistance en watts (charge physique) et le mode de la fréquence fondamentale. Toutefois, celle-ci n'est pas linéaire. Les auteurs observent un effet de palier : en situation de repos, la fréquence fondamentale est stable. Dès les premiers efforts, elle augmente et se stabilise en un deuxième palier. Enfin elle s'accroît de nouveau lorsque les sujets s'approchent de l'épuisement physique. Lors des exercices cognitifs, le mode de la fréquence fondamentale des sujets augmente durant les exercices et atteint des valeurs proches de celles du deuxième palier observé lors du test physique. En situation de repos, les valeurs sont identiques mais, en condition de charge cognitive, elles ne dépassent pas le palier intermédiaire, au contraire des exercices physiques. Si la relation entre la charge physique et la fréquence fondamentale est démontrée, il en va autrement entre la charge cognitive et la fréquence fondamentale.

Au cours de leurs expériences, Mendoza et al. (1999) ont induit un stress lié à la charge cognitive chez leurs sujets en leur demandant de réciter l'alphabet dans l'ordre et à rebours. Les sujets ont évalué l'énonciation de l'alphabet à l'envers comme beaucoup plus exigeante en termes de concentration et de charge cognitive. Au niveau acoustique, ces auteurs rapportent à nouveau une hausse de la fréquence fondamentale et un déplacement de l'énergie vers les hautes fréquences dans le spectre mais de manière moins marquée que lors de la lecture de virelangues avec feed-back auditif retardé.

Au niveau spectral, Fernandez et Picard (2003) ont étudié les effets du stress induit par la charge cognitive chez des conducteurs placés dans un simulateur automobile. Pour engendrer de la charge cognitive, les sujets ont suivi un itinéraire tantôt à faible vitesse, tantôt à vitesse élevée. De plus, une tâche secondaire équivalente à une communication téléphonique était ajoutée : les sujets devaient répondre à une addition de 2 termes, dont la somme était toujours inférieure à 100, toutes les 4 ou 9 secondes. À partir de ces données, Fernandez et Picard (2003) ont procédé à des découpages en de multiples bandes et sous bandes de fréquences et ont calculé plusieurs indices sur chacune de celles-ci. Connaissant le niveau de stress a priori, ils ont introduit ces indices dans plusieurs modèles de classification basés sur des réseaux neuronaux artificiels. Il ressort de ces expériences

que ces systèmes de classification atteignent une performance satisfaisante mais certains individus présentaient une faible différence au niveau de leur production de parole selon les situations de conduite. Ce sont bien sûr les productions de ces individus qui étaient les mieux bien classées par les modèles automatiques. Nous pouvons adresser un reproche à ces auteurs : ils ont considéré que l'augmentation de la vitesse et de la fréquence des questions impliquait nécessairement une hausse nette de la charge cognitive chez tous les sujets, ce qui, à notre avis, est loin d'être évident en fonction des caractéristiques spécifiques de chaque individu.

Le et al. (2011) ont étudié la fréquence et l'amplitude des centroïdes spectraux calculés dans 32 bandes de fréquences, tous les spectres étaient extraits de voyelles. Ces sons voisés ont été recueillis dans deux sources de parole : une en laboratoire, les sujets ont passé un test de Stroop ; l'autre est plus spontanée, les sujets ont lu plusieurs textes plus ou moins complexes et répondu à des questions de compréhension sur ces derniers. L'analyse de la répartition de l'énergie dans les bandes de fréquences a permis de discriminer le niveau de la charge cognitive. Toutefois, pour la parole spontanée, les résultats sont moins fiables que pour le test de Stroop. La plupart des informations pertinentes pour la discrimination du niveau de la charge cognitive se trouvent en dessous de 1 kHz. Ces auteurs recommandent donc d'utiliser une échelle fréquentielle plus précise pour inspecter cette zone du spectre.

Ruiz et al. (1996) ont montré que la balance spectrale des voyelles a tendance à prendre trois valeurs particulières : deux valeurs extrêmes : une en basse fréquence autour des 500 Hz, l'autre en haute fréquence proche des 4500 Hz et une troisième plus centrale comprise entre 1000 Hz et 3000 Hz. En situation de stress, principalement en laboratoire, la proportion de voyelles ayant une balance spectrale centrale est plus importante.

Au niveau des formants, Harmegnies et Landercy (1992) ont montré, lors de leur expérience durant laquelle un sujet devait lire un texte phonétiquement équilibré et répéter des phrases tout en jouant au jeu vidéo Tetris, que les valeurs moyennes des deux premiers formants pour les voyelles /i/, /a/ et /u/ étaient plus faibles, ce qui va montrer à nouveau une réduction de l'espace vocalique.

En ce qui concerne les aspects temporels, Khawaja et al. (2009) ont enregistré 27 opérateurs d'un centre de lutte contre les incendies de forêts dans le bush australien. Ces sujets ont participé à 9 exercices simulés durant 5 heures. Les auteurs ont remarqué que, en situation de charge cognitive élevée, les opérateurs formulaient des phrases plus longues, contenant plus de mots. Ils ne précisent malheureusement pas si le débit de parole a augmenté. Hansen et al. (2000) rapportent, au travers de l'analyse de leur base de données *Speech Under Simulated and Actual Stress*, un allongement de la durée des consonnes et des semi-voyelles tandis que celle des voyelles diminue. Ces auteurs ont également observé une augmentation de l'intensité de certaines consonnes, principalement celles qui sont nasalisées.

De même, Simpson (1986) a étudié la performance d'un système de reconnaissance de la parole embarqué dans un hélicoptère de combat. Ce système était assez basique car son lexique ne comportait que quelques mots et il acceptait des séquences de seulement deux mots. Les pilotes ont été entraînés à utiliser le système de reconnaissance de la parole, en veillant notamment à faire des pauses entre les 2 mots. Ces pilotes ont effectué plusieurs tâches, certaines isolément, d'autres simultanément. Le taux de reconnaissance de la parole du système diminuait en situation de double tâche. L'analyse de spectres a montré que les pauses entre les mots étaient trop courtes en situation de double tâche et que l'intensité était beaucoup plus élevée que dans celle présente dans les modèles du système de reconnaissance.

Muller et al. (2001) ont analysé les effets de la pression temporelle et d'une tâche de navigation sur la production de parole. Ils ont demandé à 32 personnes de produire 20 énoncés dans 4 conditions : ils ont croisé la présence et l'absence de pression temporelle avec la présence et l'absence d'une tâche secondaire de navigation. La tâche de navigation consistait à déplacer un point dans un labyrinthe à l'aide des flèches du clavier. Ils ont mesuré la disflue, le taux d'articulation, la qualité du contenu, le nombre de syllabes par énoncé, la durée totale des pauses silencieuses pondérée par le nombre de mots de l'énoncé, la durée totale des pauses pleines pondérée par le nombre de mots de l'énoncé. Notons que ces auteurs ont choisi 200 ms comme valeur seuil pour les pauses. Ils ont mis en évidence que les disfluences augmentent lorsque le sujet doit accomplir une tâche de navigation, même lorsqu'il n'a aucune contrainte temporelle. Ensuite, les sujets produisent plus de syllabes par seconde lorsqu'ils sont en situation de contrainte temporelle. Par contre, l'absence de contrainte temporelle conduit les sujets à élaborer des énoncés plus longs. De plus, la contrainte temporelle joue un rôle significatif sur la durée et le nombre de pauses silencieuses : celles-ci sont beaucoup moins nombreuses en situation contraignante. Enfin, la tâche de navigation augmente significativement le nombre de pauses pleines.

Les quelques résultats que nous avons présentés ici portent essentiellement sur l'effet des stressseurs psychologiques liés à la charge de travail et à la charge cognitive. Nous constatons que la fréquence fondamentale a fait l'objet de beaucoup d'études et reste encore aujourd'hui un paramètre intéressant à analyser. La répartition de l'énergie dans le spectre et la fréquence des formants est également à analyser. Le débit de parole semble lui aussi impacté par les facteurs de stress psychologiques. Cependant, comme pour les facteurs de stress physiologiques, la variabilité inter individuelle est très forte. Cela est d'autant plus vrai lorsque la prise de données s'effectue dans une situation écologique. Ces variations individuelles montrent toute la pertinence du modèle que nous avons proposé à la figure 3.3.

5.5 Les effets des stressseurs : synthèse

A la lecture de ces quelques résultats, il semble évident que le signal de parole est porteur d'informations sur le stress ressenti par le locuteur. Les facteurs de stress physiques et perceptuels paraissent produire des effets semblables chez l'ensemble des locuteurs. Nous pensons que cela s'explique par le fait qu'ils ne font pas appel à des processus cognitifs conscients. Murray et al. (1996) avaient d'ailleurs fait le choix de classer le bruit dans les stressseurs physiques. A l'inverse, les caractéristiques individuelles s'avèrent fondamentales pour expliquer les effets des facteurs de stress physiologiques et psychologiques.

Au niveau des indices acoustiques, plusieurs éléments ont retenu notre attention. Tout d'abord, nous sommes étonnés des résultats mis en avant par Hansen et al. (2000) : la réduction de l'espace vocalique chez des sujets soumis au bruit nous interpelle : étant donné la dégradation du canal de communication, nous nous attendions plutôt à une augmentation de cet espace pour maximiser les écarts entre les voyelles afin d'en faciliter la perception par l'auditeur.

Ensuite, de manière générale, les méthodes de calcul ainsi que le choix des indices sont très disparates. Si certains auteurs comme Fernandez et Picard (2003) ou Le et al. (2011) décrivent leurs calculs, d'autres, en revanche, se contentent d'utiliser des logiciels sans se questionner sur leur fonctionnement, c'est notamment le cas des travaux de Mendoza et

al. (1999) dont toutes les analyses reposent sur les indices calculés par MDVP. Nous ne pensons bien sûr pas qu'il s'agisse d'un mauvais logiciel mais il est peu aisé de s'assurer que ses algorithmes ne produisent pas d'artefacts. Nous avons d'ailleurs émis le même type de critique pour l'ICA employé par Demberg et Sayeed (2016). Les nombreuses techniques de découpage du spectre en bandes de fréquences nous paraissent parfois quelque peu aléatoires. Une comparaison de ces techniques serait la bienvenue. De même, la durée minimale d'une pause varie d'une étude à l'autre.

Ensuite, dans une très grande majorité des études présentées dans cette partie, les chercheurs se sont privés de l'avis des sujets quant au stress qu'ils ont ressenti. Par ailleurs, nous nous apercevons également que si de nombreux auteurs suggèrent de combiner des mesures physiologiques, subjectives et des indices acoustiques, peu l'ont réellement fait.

Enfin, bien que de nombreux chercheurs reconnaissent l'importante influence des stratégies de coping et de l'expertise du sujet, peu envisagent un dispositif expérimental permettant leur libre expression. Il est évident que ce type d'approche est plus complexe car multifactorielle mais nous pensons qu'à terme, elle permettra une meilleure généralisation. Ainsi, nous n'avons pas vraiment trouvé d'analyse de cas mais beaucoup de tentatives de classification automatique de la parole "stressée" à l'aide d'algorithmes plus complexes les uns que les autres. Nous pensons que notre modèle proposé à la figure 3.3 constitue une piste à explorer.

5.5.1 Nos questions de recherche

La rédaction de ce cadre conceptuel nous a conduit à nous poser de nombreuses questions de recherche.

Comment le stress induit par la charge de travail et la charge cognitive se manifeste-t-il au niveau des performances ? Quels sont les effets de l'expertise sur le stress réellement perçu ? Quelles sont les stratégies de coping effectivement mises en œuvre et quels sont leurs effets ? Est-il possible d'objectiver le stress induit par la charge de travail et par la charge cognitive en confrontant les mesures subjectives, les mesures physiologiques et les indices acoustiques ?

Au niveau du signal de parole, observerons-nous globalement les mêmes tendances sur les indices acoustiques les plus usités comme la fréquence fondamentale, la répartition de l'énergie dans le spectre, la fréquence des formants et le taux d'articulation ? Tout nous laisse penser que les variabilités inter et intra-individuelles se marqueront également dans les indices acoustiques.

Dès lors, notre modèle permettra-t-il de mieux expliquer les interactions complexes entre l'individu, l'environnement et la tâche ? Pourrons-nous objectiver le stress réellement ressenti et en observer les effets particuliers dans le signal de parole ? Une exploration "phonétique" du signal de parole apportera-t-elle d'autres informations susceptibles de mieux appréhender cette interaction ?

Dans la partie suivante de ce travail, nous présentons le dispositif méthodologique que nous avons conçu pour tenter de répondre à une partie de ces questions de recherche.

Deuxième partie
Cadre méthodologique

Afin d'investiguer nos questions de recherche, nous avons mis au point un dispositif expérimental ayant pour objectifs de placer nos sujets dans des situations susceptibles d'induire du stress engendré par la charge de travail et d'analyser les productions de parole de ces derniers. Pour ce faire, nous avons choisi de moduler la charge de travail à laquelle nos sujets étaient soumis et d'enregistrer leurs productions verbales.

Ainsi, tout au long de l'expérience, nous avons fait varier le nombre de tâches à accomplir simultanément ainsi que leur difficulté. Toutefois, comme nous l'avons évoqué précédemment, l'effet d'un facteur de stress psychologique dépend de nombreux paramètres liés à l'environnement, à la tâche et surtout à l'évaluation cognitive qu'en fait le sujet, laquelle est affectée par ses états cognitif, émotionnel et physique. Ceux-ci conditionnent largement les stratégies de coping déployées par l'individu. C'est pourquoi, afin de pouvoir observer ces stratégies de coping, nous avons veillé à accorder une large liberté à nos sujets afin qu'ils puissent aisément les mettre en œuvre.

Chapitre 6

La démarche expérimentale

Dans cette partie, nous détaillons et justifions les tâches auxquelles nos sujets ont été soumis ainsi que l'ordre dans lequel elles ont été administrées. Ensuite, nous présentons les variables dépendantes que nous allons analyser et nous décrivons les mesures retenues et en expliquons le calcul. Enfin, nous terminons ce chapitre par une description des critères d'inclusion de nos sujets.

6.1 Le choix des tâches

6.1.1 La tâche de conduite

Bien que le projet BIOVOC soit spécifique au domaine de l'aéronautique, nous avons décidé de mener cette première étude sur des conducteurs de voiture. Nous justifions ce choix par une meilleure connaissance du contexte et une compréhension accrue des facteurs susceptibles de moduler la difficulté de la tâche de conduite. De plus, parmi les tâches expérimentales autorisant des manipulations de la charge de travail, la conduite automobile s'avère être une tâche complexe signifiante qui requiert de l'attention, des connaissances déclaratives et des aptitudes comportementales. En effet, cette tâche repose largement sur l'anticipation et sur l'automatisation, ces facultés sont étroitement liées aux facteurs individuels tels que l'expertise ou le type de conduite. De surcroît, contrairement au domaine aéronautique, la population des conducteurs est très large, elle constitue une source facilement accessible et offre l'opportunité de recruter de sujets aux profils divers. Par ailleurs, l'évolution des outils informatiques permet aujourd'hui de concevoir des simulations très réalistes au sein même de notre laboratoire. L'immersion de ces dernières est renforcée par la présence de périphériques à retour de force favorisant le ressenti du véhicule. Ces périphériques ne sont pas trop onéreux et sont disponibles dans le commerce. La simulation automobile présente un autre avantage : à quelques agencements près, les commandes d'un modèle de voiture sont largement comparables à celles d'un autre modèle, ce qui est loin d'être le cas des nombreux systèmes dont les aviateurs équipent leurs appareils. Enfin, la simulation automobile est tout à fait à même d'engendrer de la charge de travail et de la charge cognitive, en témoignent les études de Mehler et al. (2009) ; da Silva (2014) ; Faure et al. (2016).

Nous avons retenu *City Car Driving v.1.5.0* comme logiciel de simulation pour cette expérience, il est développé par le studio russe *Forward Development*. Ce jeu vidéo a été conçu comme une simulation réaliste destinée à l'apprentissage de la conduite, l'intelligence artificielle du jeu vise donc à reproduire un comportement crédible des autres

véhicules : le code de la route est fidèlement appliqué et tout incite le joueur à adopter une conduite naturelle. Il offre de nombreuses options pour paramétrer finement la conduite (voir figure 6.1) : choix du véhicule, du fonctionnement des feux de signalisation, des vitesses autorisées, de la densité du trafic des voitures et des piétons, du comportement des autres véhicules, conditions météorologiques, cycle jour-nuit, etc. La simulation est de type "bac à sable", le joueur évolue librement dans un univers détaillé aux environnements variés : ville, route de campagne, autoroute, etc. Tous ces environnements sont interconnectés entre eux de façon cohérente et ininterrompue. Ce logiciel est compatible avec la plupart des périphériques grand public tels qu'un volant, une boîte de vitesse ou un pédalier ainsi qu'avec des périphériques de réalité virtuelle comme l'Oculus rift. Enfin, le logiciel enregistre dans une base de données tous les événements survenant durant la conduite : franchissement d'une ligne blanche, accident, violation des règles de priorité, etc.

La complexité visuelle de l'environnement ayant un effet sur la charge mentale des conducteurs (Faure et al., 2016), nous avons conçu un parcours dans lequel cette variable est figée : il se déroule dans les trois types d'environnement : un tiers en ville (vitesse limitée à 50 km/h, voir figure 6.2), un tiers sur route de campagne (vitesse limitée à 90 km/h, voir figure 6.3) et un tiers sur autoroute (vitesse limitée à 120 km/h, voir figure 6.4).

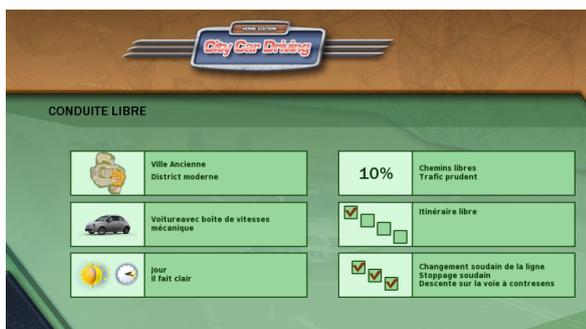


FIGURE 6.1 – Ecran de configuration



FIGURE 6.2 – Ville, trafic faible



FIGURE 6.3 – Campagne, trafic modéré



FIGURE 6.4 – Autoroute, trafic dense

Etant donné que ce parcours est utilisé à plusieurs reprises, nous avons conçu deux itinéraires (voir figures 6.5 et 6.6 : le cercle vert indique le point de départ, le cercle rouge désigne le point d'arrivée), employés en alternance, afin d'éviter un effet d'apprentissage. Ceux-ci sont très similaires, l'itinéraire B étant identique à 95 % à l'itinéraire A mais étant parcouru en sens inverse. Chaque itinéraire a une durée moyenne comprise entre 10

et 15 minutes en fonction de la densité de la circulation et de la vitesse du véhicule. Ils se terminent tous deux par la portion autoroutière.

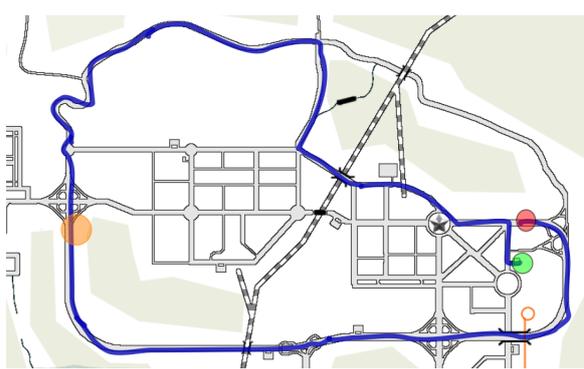


FIGURE 6.5 – Itinéraire A

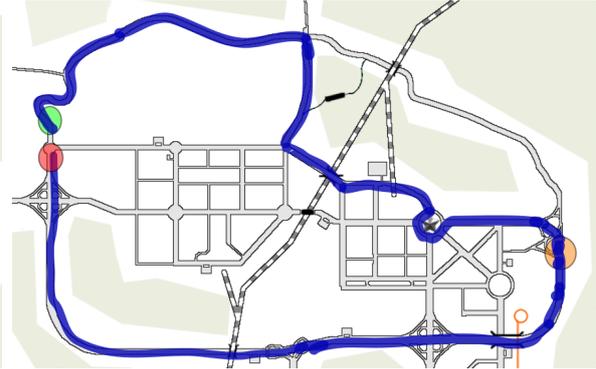


FIGURE 6.6 – Itinéraire B

En ville et sur les routes de campagne, les sujets sont guidés oralement par l'expérimentateur à l'aide consignes prédéfinies (voir tables 6.1 et 6.2). Il est demandé aux participants de respecter le code de la route. le guidage se termine lorsque les sujets arrivent sur l'autoroute (cercles oranges sur les figures 6.5 et 6.6), des tâches secondaires, décrites plus loin, sont alors déclenchées.

Zones	Numéros	Instructions
Ville 50 km/h Max	1	Tournez à droite à la sortie du parking.
	2	Tournez à gauche au feu tricolore.
	3	Prenez la première sortie à droite au rond-point.
	4	Tournez à droite au feu tricolore.
	5	Tournez à droite au feu tricolore.
	6	Tournez à gauche au carrefour.
Campagne 90 km/h Max	7	Suivez la route principale jusqu'au rond-point.
	8	Prenez la première sortie au rond-point.
Autoroute 120 km/h Max	9	Restez sur l'autoroute aussi longtemps que possible.
	10	Fin du guidage vocal.

TABLE 6.1 – Consignes de guidage pour l'itinéraire A

Zones	Numéros	Instructions
Campagne 90 km/h Max	1	Suivez la route principale jusqu'au carrefour.
	2	Tournez à droite au carrefour.
Ville 50 km/h Max	3	Tournez à gauche au feu tricolore.
	4	Tournez à gauche au feu tricolore.
	5	Continuez tout droit jusqu'au rond-point.
	6	Prenez la quatrième sortie au rond-point.
	7	Continuez tout droit au feu tricolore.
	8	Engagez-vous sur l'autoroute.
Autoroute 120 km/h Max	9	Restez sur l'autoroute aussi longtemps que possible.
	10	Fin du guidage vocal.

TABLE 6.2 – Consignes de guidage pour l'itinéraire B

Les sujets sont placés aux commandes d'une voiture citadine disposant d'un petit moteur à essence (1200 cm³, 69 CV) les obligeant ainsi à changer fréquemment de rapport à l'aide de la boîte de vitesse manuelle. Ils manipulent le véhicule par le biais d'un dispositif comprenant un volant à retour de force, un pédalier équipé d'un embrayage, d'un frein et d'un accélérateur et d'une boîte de vitesse à 5 rapports + marche arrière (Logitech G27). La simulation est affichée sur un écran de 27 pouces en résolution full HD (1920 x 1080 pixels) placé à environ 80 cm du sujet. La fluidité de la simulation est assurée par un puissant ordinateur équipé d'un processeur Intel Core I7 4790K cadencé à 4 Ghz avec 16 Go de mémoire vive et une carte graphique Nvidia GTX960 embarquant 2 Go de mémoire vidéo.

Afin de faire varier la quantité de ressources mobilisées par cette tâche, nous avons déterminé, a priori, 3 niveaux de difficulté que nous appelons conduites simple, modérée et complexe.

Le niveau de conduite "simple" se caractérise par une faible densité de trafic routier (10 %, voir figure 6.2) et de piétons dans les rues (10 %), les autres véhicules adoptent une attitude défensive (niveau d'agressivité réglé à 10 %). Cette modalité implique une charge de travail faible pour peu le sujet soit suffisamment expérimenté et ait automatisé les processus de la conduite automobile.

Le niveau de conduite "modérée" est déterminé par une densité moyenne du trafic routier (50 %, voir figure 6.3) et des piétons dans les rues (50 %), les autres véhicules adoptent une attitude normale (niveau d'agressivité réglé à 50 %). A ce niveau, le sujet doit consacrer plus d'attention à la conduite, notamment à l'approche des carrefours, des ronds points et des passages pour piétons.

Enfin, le niveau de conduite "complexe" est le plus exigeant : la densité du trafic routier et de piétons est élevée (90 %, voir figure 6.4) et les autres conducteurs adoptent une conduite agressive (non respect des limitations de vitesse, accélérations rapides et freinages tardifs, changements intempestifs de voie circulation). Cette modalité requiert une attention soutenue de la part du sujet pour évoluer en toute sécurité dans la circulation.

Bien que notre tâche de conduite présente de nombreuses qualités et produise des comportements observables, elle ne contraint pas le sujet à parler. Il est très probable que les sujets commentent spontanément leur conduite mais rien ne les y oblige. C'est pourquoi nous avons sélectionné plusieurs tâches verbales à réaliser tantôt isolément, tantôt en conduisant dans le simulateur.

6.1.2 L'énonciation d'une litanie

La première tâche verbale que nous avons retenue est le récit à voix haute d'une litanie simple. Etant donné que nous avons envisagé de calculer des spectres moyens à long terme, il convient de prendre quelques précautions quant au choix du corpus de la litanie. En effet, les spectres moyens à long terme sont sensibles aux spécificités du locuteur mais aussi à la langue employée, au contenu du corpus (Harmegnies, 1992) et au décours temporel (Bruyninckx & Harmegnies, 1994). L'utilisation d'un corpus phonétiquement équilibré est conseillée si l'on souhaite obtenir une forme du spectre moyen à long terme qui représente fidèlement l'identité du locuteur : en effet, dans une langue, tous les phonèmes n'ont pas la même fréquence d'apparition : par exemple, si la fricative /s/, riche en hautes fréquences, est sous ou sur-représentée, la forme finale du spectre moyen à long terme sera altérée.

La fréquence d'occurrence des phonèmes du français

Construire un texte phonétiquement équilibré dans une langue cible suppose donc de connaître la fréquence moyenne d'apparition de chaque phonème. Boë et Tubach (1992) ont rédigé un dictionnaire dont les entrées sont classées par ordre d'occurrence. Ils ont travaillé à partir d'un corpus oral basé sur la transcription d'une dizaine d'heures d'échanges entre une trentaine de locuteurs. Wioland (1991) propose également un classement sur base de la fréquence d'apparition des phonèmes dans le discours.

Il convient de remarquer que Wioland (1991) a rassemblé les phonèmes /o/ et /ɔ/, /ø/ et /œ/, /e/ et /ɛ/ au sein des archiphonèmes (Martinet, 1970) /o/, /œ/ et /ɛ/. De plus, Wioland (1991, p. 11) fait le choix, dans son ouvrage didactique, de ne pas utiliser la représentation du schwa /ə/ et de l'associer à l'archiphonème /œ/. Enfin, il ne discrimine pas les phonèmes /a/ et /ɑ/ et les phonèmes /œ̃/ et /ɛ̃/.

Nous avons analysé la base de données lexicale libre *lexique 3.80* (New, Brysbaert, Veronis, & Pallier, 2007). Celle-ci a été alimentée par 14,8 millions de mots extraits de livres et 50,4 millions de mots issus de films. Cette gigantesque base de données répertorie plus de 140.000 mots et nous livre pour chacun sa fréquence d'apparition (en million) dans les livres et dans les films. En nous appuyant sur ces données, nous avons calculé, pour chaque phonème, sa fréquence d'apparition moyenne en pourcentage à l'aide de la formule présentée dans la figure 6.7.

$$\text{Fréquence d'un phonème} = \frac{\sum_{i=1}^n ((a \times b \times 14,8) + (a \times c \times 50,4))}{\sum_{i=1}^n ((d \times b \times 14,8) + (d \times c \times 50,4))} \times 100$$

a = nombre d'occurrences du phonème dans le mot
b = fréquence du mot par million dans les livres
c = fréquence du mot par million dans les films
d = nombre de phonèmes dans le mot
n = nombre total de mots dans la base de données

FIGURE 6.7 – Formule du calcul de la fréquence d'occurrence des phonèmes en français

Afin de comparer les fréquences obtenues à partir de la base de données lexicale 3.80 (New et al., 2007) à celles présentées dans les classements de Wioland (1991) et de Boë et Tubach (1992), nous avons procédé aux mêmes groupements en archiphonème que Wioland (1991). Les résultats de ces opérations sont présentés dans la table 6.3.

Nous avons ensuite estimé la similarité de ces trois répartitions, prises deux à deux, à l'aide du coefficient de corrélation de Bravais et Pearson et d'un χ^2 de conformité. Il apparaît très clairement, comme le montre la table 6.4, que celles-ci sont très positivement corrélées et que les distances séparant chacune des valeurs sont faibles.

Phonèmes	Boë et Tubach (1992)	Wioland (1991)	Lexique 3.80 (2007)
e (e + ε)	11,00 %	10,60 %	11,18 %
a (a + α)	7,98 %	8,55 %	8,57 %
r	7,22 %	7,25 %	7,89 %
s	6,10 %	6,00 %	5,49 %
l	5,74 %	5,63 %	6,07 %
t	5,22 %	5,34 %	5,41 %
i	5,50 %	5,12 %	4,99 %
œ (œ+ ø+ ə)	6,05 %	4,31 %	6,46 %
k	4,22 %	4,06 %	3,22 %
d	4,13 %	4,04 %	4,18 %
m	3,30 %	3,84 %	3,34 %
p	3,74 %	3,71 %	3,89 %
o (o + ɔ)	3,13 %	3,36 %	3,22 %
n	2,79 %	3,10 %	2,79 %
ā	3,55 %	3,09 %	3,04 %
v	2,27 %	2,76 %	2,92 %
u	2,02 %	2,42 %	2,43 %
ō	1,95 %	2,25 %	2,02 %
j	1,77 %	2,00 %	1,69 %
y	1,90 %	1,90 %	2,43 %
ê (ê+ ē)	1,80 %	1,84 %	1,59 %
z	1,59 %	1,66 %	0,75 %
f	1,85 %	1,53 %	0,75 %
w	1,50 %	1,40 %	1,39 %
b	1,08 %	1,40 %	1,35 %
ʃ	1,05 %	1,31 %	1,23 %
ç	0,47 %	0,54 %	0,65 %
q	0,46 %	0,52 %	0,52 %
g	0,55 %	0,47 %	0,53 %
ŋ	0,08 %	0,00 %	0,11 %

TABLE 6.3 – Fréquence d’occurrence des phonèmes en français

	Lexique 3.80 (2007)	Wioland (1991)
Wioland (1991)	$r = .980, \chi^2 = 3.736$	-
Boë et Tubach (1992)	$r = .986, \chi^2 = 2.331$	$r = .987, \chi^2 = 1.369$

TABLE 6.4 – Coefficients de corrélation et χ^2 pour les 3 répartitions

Au vu de ces résultats, nous avons moyenné, pour chaque phonème et archiphonème, sa fréquence d’apparition issue des 3 classements afin d’établir une clé de répartition pour la langue française. Ainsi, nous disposons d’une référence pour évaluer l’équilibre phonétique de nos corpus.

Le choix du corpus de la litanie

Nous nous sommes inspiré des travaux de Wittels et al. (2002) et Johannes et al. (2007) : notre corpus consiste en une litanie que les sujets énumèrent à voix haute. Nous avons choisi ce type de corpus car son énonciation requiert peu d’effort mental (Johannes et al., 2007), les anomalies dans son déroulement étant dès lors raisonnablement imputables au poids des autres tâches traitées simultanément. Afin de déterminer le contenu et la longueur de notre litanie, nous avons procédé empiriquement à la comparaison de plusieurs corpus différents avec la norme de référence établie précédemment. Le contenu des corpus testés est présenté dans la table 6.5.

Corpus	Contenu
1	Nombres de 0 à 20
2	Nombres de 0 à 30
3	Nombres de 0 à 40
4	Nombres de 0 à 45
5	Nombres de 0 à 50
6	Nombres de 0 à 55
7	Nombres de 0 à 60
8	Nombres de 0 à 70
9	Nombres de 0 à 50 + mots
10	Jour et mois de l'année

TABLE 6.5 – Composition des différents corpus testés

Parmi les corpus basés sur une énonciation des nombres, c'est la version allant de 0 à 50 qui obtient le coefficient de corrélation le plus élevé ($r = .567$) et le χ^2 le plus bas (122.873). Celui-ci se caractérise par une carence entre autres en /y/, /l/ et en /f/. Afin de les compenser, nous avons accolé la séquence *turlu tu tu chapeau pointu* mais il apparaît que cet ajout n'améliore pas la valeur de la corrélation ($r = .561$) et réduit assez peu la valeur du χ^2 (117.136) alors qu'il complexifie la tâche, ce pourquoi nous n'avons pas retenu ce corpus. Enfin, nous avons testé la litanie des jours de la semaine et des mois de l'année. Ce dernier corpus est davantage corrélé à notre norme ($r = .684$) et obtient une valeur de χ^2 près de deux fois inférieure (65.402).

Bien que la litanie des jours et des mois se caractérise par l'absence de quelques phonèmes comme /š/, /y/, /z/ ou /w/ et par la présence trop forte des phonèmes /i/, /d/ et /ã/, nous assumons son utilisation car cette litanie requiert très peu d'effort mental lors de l'énonciation.

A propos du récit de la litanie, nous avons retenu deux modalités : une énonciation à l'endroit dont la durée moyenne est estimée à 10 secondes et une énonciation à rebours. Cette seconde énonciation est plus difficile car elle requiert d'inhiber l'ordre chronologique de présentation des jours de la semaine et des mois de l'année, ce qui sollicite l'intervention du contrôle attentionnel (Posner & Rothbart, 2007). Sa durée moyenne estimée est de 20 secondes.

6.1.3 Les opérations arithmétiques

Dans notre dispositif, nous avons adapté l'épreuve de running span de Vieillard et Bougeant (2005) afin de provoquer une élévation de la charge cognitive chez nos sujets en faisant appel à leur fonctions exécutives d'inhibition, de flexibilité et de mise à jour ainsi qu'à du traitement arithmétique. Pour ce faire, nous présentons des stimuli auditifs (chiffres) à nos sujets et leur demandons de réaliser un calcul simple entre les deux ou trois derniers éléments dans trois conditions :

- n mises à jour (le sujet doit utiliser tous les chiffres) ;
- n+1 mises à jour et 1 inhibition ;
- n+2 mises à jour et 2 inhibitions.

Le sujet doit donner sa réponse oralement. L'ajout d'une opération mathématique de base nous a conduit à renommer cette épreuve en *operation span*. Le déroulement de cette épreuve est représenté graphiquement à la figure 6.8.

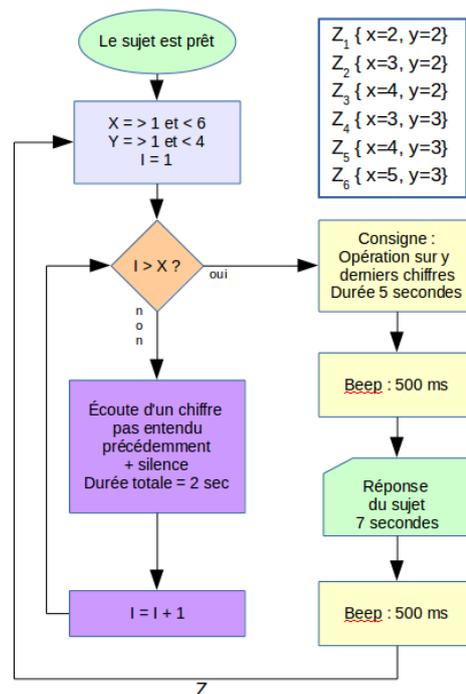


FIGURE 6.8 – Déroulement de notre épreuve de running span

Concrètement, le sujet entend une suite de chiffres différents comprenant entre 2 à 5 éléments(x). Deux secondes s’écoulent entre le début de chaque chiffre, la durée de l’empan à mémoriser varie donc entre 4 et 10 secondes. Une consigne invite le sujet à réaliser une opération mathématique entre les 2 ou les 3 derniers chiffres (y). Lorsque deux chiffres sont conservés, l’opération arithmétique à réaliser est une soustraction ou une division. L’addition et la multiplication sont utilisées lorsque 3 chiffres sont gardés : leur propriété commutative permet de simplifier la consigne. Chaque consigne dure 4,5 secondes (énonciation suivie d’une silence) et est suivie par un signal sonore (son périodique simple ayant une fréquence de 440 Hz pendant 500 ms). Le sujet dispose alors de 7 secondes pour répondre. Un nouveau signal sonore retentit pour l’informer que le temps imparti est écoulé. Deux secondes plus tard, une nouvelle séquence de chiffres est amorcée.

Notre operation span se compose de 6 séquences ($z = 3$ modalités d’inhibition \times 2 modalités d’opérande) diffusées dans un ordre pseudo-aléatoire. La durée totale de l’épreuve est de 145 secondes. Chaque operation span comporte deux additions, deux soustractions, une multiplication et une division. Nous avons intentionnellement choisi certaines combinaisons de chiffres afin d’obtenir des réponses présentant le phonème /a/ (3 /trwa/, 4 /katr/ , 14 /katɔrz/, 23 /vẽ trwa/, 24 /vẽ katr/). La sixième réponse est aléatoire et joue le rôle de distracteur. Si le sujet ne trouve pas la réponse, il lui est demandé de répondre "passe" (/pas/) afin de récolter le phonème /a/. Pour les besoins de notre expérience, nous avons construit 7 épreuves de type operation span. Elles sont présentées aux tables 6.6 à 6.12.

	Séquences	Nombre d’inhibitions	Nombre d’opérandes	Opérations	Réponses
1	9 - 7 - 8	0	3	Addition	24
2	5 - 9 - 2	1	2	Soustraction	7
3	7 - 9 - 6 - 2	2	2	Soustraction	4
4	2 - 6 - 8 - 9	1	3	Addition	23
5	3 - 6 - 1 - 2 - 7	2	3	Multiplication	14
6	3 - 9	0	2	Division	3

TABLE 6.6 – Operation span - série 1

	Séquences	Nombre d'inhibitions	Nombre d'opérandes	Opérations	Réponses
1	6 - 5	0	2	Soustraction	1
2	4 - 3 - 7	0	3	Addition	14
3	6 - 2 - 3 - 4	1	3	Multiplication	24
4	5 - 2 - 6	1	2	Division	3
5	1 - 8 - 7 - 3	2	2	Soustraction	4
6	4 - 3 - 9 - 8 - 6	2	3	Addition	23

TABLE 6.7 – Operation span - série 2

	Séquences	Nombre d'inhibitions	Nombre d'opérandes	Opérations	Réponses
1	7 - 5 - 2 - 8	2	2	Division	4
2	2 - 1 - 7	0	3	Multiplication	14
3	7 - 6 - 9 - 8	1	3	Addition	23
4	3 - 9 - 4	1	2	Soustraction	5
5	2 - 5 - 8 - 7 - 9	2	3	Addition	24
6	7 - 4	0	2	Soustraction	3

TABLE 6.8 – Operation span - série 3

	Séquences	Nombre d'inhibitions	Nombre d'opérandes	Opérations	Réponses
1	4 - 9 - 1	1	2	Soustraction	1
2	2 - 5 - 3 - 8 - 1	2	3	Multiplication	24
3	2 - 7 - 5	0	3	Addition	14
4	4 - 8 - 9 - 6	1	3	Addition	23
5	1 - 4	0	2	Division	4
6	5 - 2 - 9 - 6	2	2	Soustraction	3

TABLE 6.9 – Operation span - série 4

	Séquences	Nombre d'inhibitions	Nombre d'opérandes	Opérations	Réponses
1	4 - 1 - 9 - 6 - 8	2	3	Addition	23
2	7 - 9 - 8	0	3	Addition	24
3	8 - 4	0	2	Soustraction	4
4	1 - 4 - 7 - 2	2	2	Soustraction	5
5	6 - 7 - 2 - 1	1	3	Multiplication	14
6	4 - 1 - 3	1	2	Division	3

TABLE 6.10 – Operation span - série 5

	Séquences	Nombre d'inhibitions	Nombre d'opérandes	Opérations	Réponses
1	1 - 3 - 4 - 8	2	2	Division	2
2	3 - 6 - 8 - 1 - 5	2	3	Addition	14
3	1 - 8 - 6 - 9	1	3	Addition	23
4	8 - 5	0	2	Soustraction	3
5	1 - 9 - 5	1	2	Soustraction	4
6	4 - 3 - 2	0	3	Multiplication	24

TABLE 6.11 – Operation span - série 6

	Séquences	Nombre d'inhibitions	Nombre d'opérandes	Opérations	Réponses
1	2 - 7 - 5	0	3	Addition	14
2	7 - 5 - 1	1	2	Soustraction	4
3	2 - 8 - 6 - 3	2	2	Soustraction	3
4	5 - 6 - 8 - 9	1	3	Addition	23
5	9 - 4 - 1 - 3 - 8	2	3	Multiplication	24
6	1 - 6	0	2	Division	6

6.1.4 Le test attentionnel

L'attention est un facteur essentiel dans l'exécution d'une tâche de conduite tout comme dans la réalisation, simultanée ou non, des tâches verbales présentées ci-avant (Posner & Rothbart, 2007). Par ailleurs, selon Weaver et al. (2009), la performance à des tests attentionnels semble être corrélée à la performance de conduite sur simulateur. C'est pourquoi, nous avons opté pour la passation du test attentionnel mis au point par Fan, McCandliss, Sommer, Raz, et Posner (2002), son déroulement est représenté à la figure 6.9.

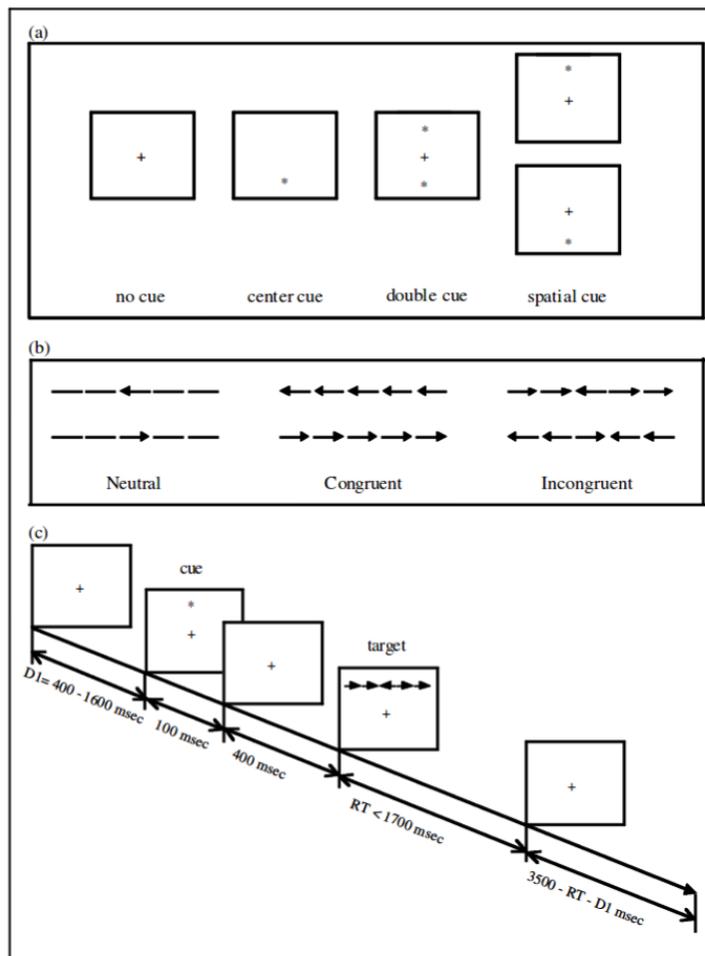


FIGURE 6.9 – Procédure expérimentale de l'ANT (Fan et al., 2002, p.341)

Le test des réseaux attentionnels (Posner & Rothbart, 2007) consiste en la combinaison du test de temps de réaction de Posner et de la tâche des indices/distracteurs "ailiers" d'Eriksen. Les sujets doivent déterminer si la flèche centrale est orientée vers la gauche ou vers la droite (voir figure 6.9 b). Celle-ci apparaît au-dessus ou en dessous d'un point de fixation (croix) et elle peut être accompagnée ou non d'ailiers et peut être précédée ou non d'un indiçage (voir figure 6.9 a). L'efficacité des réseaux attentionnels est évaluée à l'aide des temps de réaction mesurés en fonction des indices d'alerte, des indices spatiaux et de la présence d'ailiers. Il s'agit d'une tâche "simple" qui peut être réalisée par des enfants, des adultes, voire par des singes.

Chaque série se compose de 96 items provenant du croisement des 4 conditions d'indices, des 2 localisations de la cible, des 2 directions de la flèche centrale, des 3 conditions des ailiers, le tout étant répété 2 fois. La présentation de chaque item se déroule en 5 phases (voir figure 6.9 c) :

1. rien n'est affiché, à part la croix de fixation centrale, durant une période allant de 400 ms à 1600 ms ;
2. l'indice est présenté durant 100 ms ;
3. rien n'est affiché, à part la croix centrale, durant une période de 400 ms ;
4. la cible et les patterns latéraux (flèches ou tirets) sont présentés durant maximum 1700 ms, le sujet doit répondre durant cette période en cliquant sur le bouton gauche ou le bouton droit de la souris ou du clavier ;
5. rien n'est affiché, à part la croix centrale, durant une période variant en fonction de la durée du temps 1.

Le test se compose de 4 étapes : un entraînement de 2 minutes suivi de trois passations des 96 items chacune. Trois scores évaluant l'indépendance des 3 réseaux neuronaux sont calculés. La passation complète dure près de 30 minutes. La passation totale dure environ 30 minutes.

6.2 Le déroulement expérimental

L'objectif de cette étude est d'analyser les effets du stress induit par la charge de travail dans les productions orales. Notre variable indépendante consiste donc à faire varier la charge de travail à laquelle nos sujets sont soumis. Cependant, d'autres facteurs tels que l'expertise, les capacités attentionnelles ou la fatigue sont susceptibles d'influencer nos résultats. C'est pourquoi, outre l'exécution de tâches censées moduler la charge de travail, nous avons intégré d'autres épreuves pour, soit contrôler, soit mesurer l'effet de ces variables parasites. Schématiquement, notre plan prend la forme d'une série de traitements expérimentaux entre-coupés de mesures répétées. Ces différentes étapes sont représentées schématiquement à la figure 6.10.

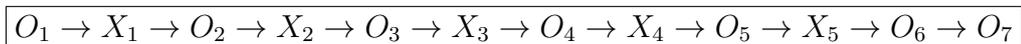


FIGURE 6.10 – Représentation schématique du plan expérimental

Plus concrètement, la durée totale de l'expérience variait en 4h00 et 4h30. Hormis pour les sujets 4 et 12, elle s'est déroulée entre 13h00 et 18h00. Le décours temporel de cette expérience est illustré graphiquement à la figure 6.11.

L'expérience s'est déroulée dans deux locaux contigus très calmes. La salle d'observation dans laquelle se trouvait le sujet était équipée d'un écran de 27 pouces, du volant accompagné de son pédalier et de sa boîte de vitesse, de deux webcams, d'un ordinateur portable qui était éteint durant les phases d'enregistrement, des lunettes d'eye tracking (SMI ETG), d'un casque audio de type Sennheiser HD-429, d'un micro-casque de type Sennheiser HSP 2-EW-M relié à boîtier d'alimentation connecté à un système de multiplexage audio (Roland Octa-Capture). La salle de contrôle comprenait 4 ordinateurs : le premier, connecté à deux écrans, celui du sujet et un clone pour l'expérimentateur, faisait tourner la simulation et enregistrait le contenu affiché sur les écrans ; le deuxième

était dédié à l'enregistrement et à la gestion des données capturées par les lunettes d'eye tracking, le troisième était connecté au boîtier de multiplexage audio et capturerait les fichiers sons ; le dernier servait uniquement à afficher l'image d'une webcam et à diffuser les enregistrements des opérations span. L'expérimentateur disposait également d'un casque et d'un micro.

Grâce à une configuration avancée du système de multiplexage audio, le sujet entendait dans son casque le son provenant de la simulation, les consignes de l'expérimentateur et les consignes de l'opération span. L'expérimentateur entendait, quant à lui, le son du simulateur, la voix du sujet et les consignes de l'opération span.

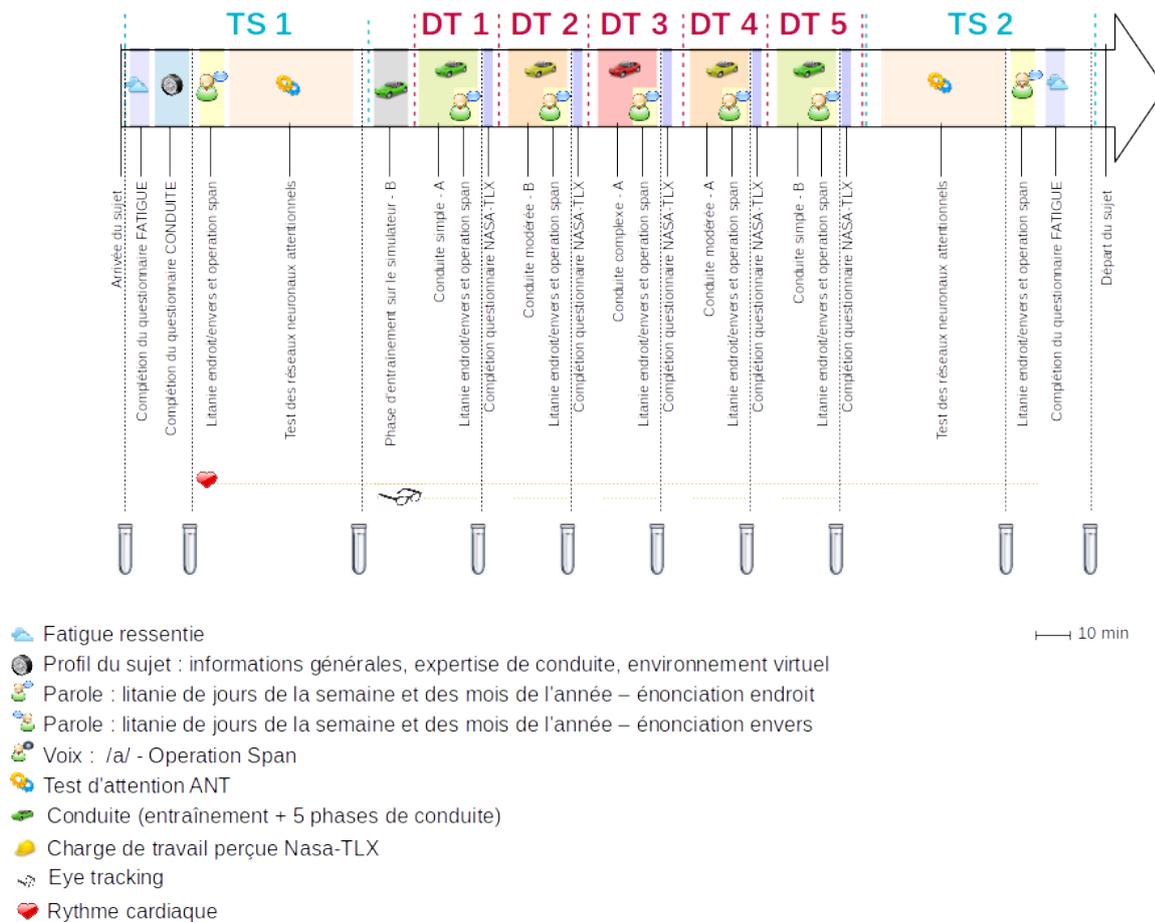


FIGURE 6.11 – Représentation chronologique du dispositif expérimental

Etape 1 : ligne de base

La première étape correspond à la zone "TS 1" présente à la figure 6.11, elle vise le recueil d'informations générales et constitue une ligne de base. Lors de son arrivée, nous avons expliqué à chaque sujet l'objet et le déroulement de l'expérience et avons complété le formulaire de consentement. Ensuite, le sujet commençait l'expérience en remplissant deux questionnaires informatisés. Le premier, disponible en annexe xxx, comporte 17 questions évaluant les niveaux de fatigue physique, mentale et motivationnelle ressentis.

Le second formulaire, inspiré d'un rapport de l'Institut Belge pour la Sécurité Routière (Slootmans, Dupont, & Silverans, 2011) et des travaux de Roskam et al. (2002),

consultable à l'annexe xxx, vise à collecter un maximum d'informations sur l'expertise et les habitudes de conduite des sujets.

Ensuite, afin d'établir une ligne de base, que nous appelons "tâche simple 1" (TS1), le sujet réalise successivement trois productions orales : il récite la litanie des jours de la semaine et des mois de l'année à l'endroit, il l'énonce ensuite à l'envers et passe la série 1 de l'épreuve d'opération span (voir table 6.6). Il termine enfin cette partie par la passation du test attentionnel ANT, nous avons utilisé la version informatique de ce test, elle est programmée en java et distribuée gratuitement¹ par ses auteurs (Fan et al., 2002).

L'étape 1 avait une durée d'environ 1h15.

Avant de passer aux étapes suivantes, nous avons accordé une période d'environ 15 minutes pour la découverte et la prise en main du simulateur. Durant cette phase d'entraînement, les sujets suivent l'itinéraire B.

Etapes 2 à 6 : phases de conduite

Ces étapes correspondent au traitement expérimental : au cours de chaque étape, le sujet doit suivre le parcours proposé dans le simulateur. Une fois qu'il est arrivé sur l'autoroute, le guidage vocal prend fin et il doit réciter les litanies à l'endroit et à l'envers et enfin passer le test de l'opération span. Ces trois tâches verbales sont réalisées tout en conduisant sur l'autoroute. Il s'agit donc ici d'un paradigme de double tâche, nous avons dès lors nommé chacune de ces étapes par les lettres DT pour double tâche.

Afin de faire varier la charge de travail, nous avons alterné les conditions de conduite simple, modérée et complexe décrites ci-avant. Afin de distinguer les effets immédiats du stress induit par la charge de travail et leur potentielle accumulation, nous avons opté pour une courbe de difficulté en cloche : la densité du trafic augmente progressivement de l'étape 2 (DT 1) jusqu'à l'étape 4 (DT 3) pour ensuite se réduire et revenir à un niveau faible à l'étape 6 (DT 5). Voici les variations précises entre ces étapes :

- étape 2 ou phase de conduite 1 (DT 1) - conduite simple sur l'itinéraire A, série 2 de l'opération span ;
- étape 3 ou phase de conduite 2 (DT 2) - conduite modérée sur l'itinéraire B, série 3 de l'opération span ;
- étape 4 ou phase de conduite 3 (DT 3) - conduite complexe sur l'itinéraire A, série 4 de l'opération span ;
- étape 5 ou phase de conduite 4 (DT 4) - conduite modérée sur l'itinéraire A, série 5 de l'opération span ;
- étape 6 ou phase de conduite 5 (DT 5) - conduite simple sur l'itinéraire B, série 6 de l'opération span ;

A la fin de chaque phase de conduite, dans l'optique de recueillir une mesure subjective la charge de travail perçue, les sujets devaient compléter une version informatisée du Nasa-TLX (Hart & Staveland, 2005).

Au total, la durée de passation des étapes 2 à 6 représentait une durée approximative de 2h.

1. Cette application est téléchargeable à cette adresse : https://www.sacklerinstitute.org/cornell/assays_and_tools/ant/jin.fan/ant/ANTdownload.html.

Etape 7 : ligne de contrôle

Durant cette dernière étape, les sujets passaient une seconde fois le test d'attention. L'objectif de cette deuxième passation est de mesurer une éventuelle accumulation des effets du stress induit par la charge de travail et/ou de la fatigue. Ensuite, en situation de simple tâche (TS 2), les sujets énonçaient une ultime fois la litanie des jours de la semaine et des mois de l'année à l'endroit et à l'envers et effectuaient la série 7 de l'épreuve d'opération span (voir table 6.12). Pour conclure, ils remplissaient une seconde fois le questionnaire traitant de la fatigue et l'expérience prenait fin.

6.3 Variables dépendantes et mesures associées

Brookhuis et de Waard (2010) ont pointé la pertinence de conjuguer des mesures de nature différente. Dans la section traitant de l'évaluation de la charge cognitive, partie intégrante de la charge de travail, nous avons mis en avant trois types de mesure. Dans le cadre de cette étude, nous avons souhaité toutes les prendre en compte : ainsi nous évaluons les performances de sujets aux tâches administrées et, pour affiner l'interprétation de celles-ci, nous nous basons sur le ressenti de chaque sujet ainsi que sur leurs paramètres physiologiques. Enfin, la voix, la parole et le langage sont au cœur de ce travail. Pour chacune de ces variables dépendantes, nous avons choisi ou construit une ou plusieurs mesures.

6.3.1 Les mesures de performance

Le score de conduite

L'inventaire des infractions collectées par le logiciel révèle 31 événements différents consignés dans la base de données. Afin de tenir compte de la différence de gravité entre certains événements, par exemple l'oubli d'un clignotant lors d'un changement et l'écrasement d'un piéton, nous avons attribué, en nous basant sur la législation française (Loi 89-469 du 10 juillet 1989) du permis de conduire à points, une valeur à chaque infraction, celles-ci sont comprises entre 2 et 6 points. Ce barème est présenté à la table 6.13, la description des infractions est parfois "exotique" : il s'agit d'une piètre traduction française proposée par les développeurs russes de ce logiciel. Le score de conduite est obtenu en additionnant les points, pondérés par le barème, de chaque infraction commise pour chaque phase de conduite, plus ce score est élevé, moins les performances (respect du code de la route) sont bonnes.

Outre les infractions collectées par le simulateur, toutes les phases de conduite ont été enregistrées afin d'être analysées sous un angle qualitatif : par exemple, il est arrivé à plusieurs reprises qu'un sujet doive freiner brusquement : il s'agit d'un événement critique qui n'a pas engendré d'infractions. L'observation de ce type d'événement est très pertinente pour apporter un éclairage sur des altérations de la parole comme une pause très longue.

Pondération	Description de l'infraction
2	Excès de limitation de vitesse pour plus de 20 km/h
2	Vous avez passé les limites de la route en chaussée
3	Aller aux fraises sans mettre de clignotant à droite.
3	Aller aux fraises sans mettre de clignotant à gauche.
3	Arrêt sur un passage piéton.
3	Création des obstacles au véhicule chemin faisant.
3	Création des obstacles au véhicule de rencontre.
3	Direction du virage ne coïncide pas avec le clignotant allumé.
3	Entrée sur la ligne du mouvement sans le signofile gauche allumé.
3	Franchissement de la ligne continue.
3	L'arrêt sur l'autoroute.
3	La descente du mouvement circulaire est permis seulement à la ligne droite extrême.
3	Le clignotant droit n'était pas embrayé à l'entrée sur le mouvement circulaire.
3	Le clignotant droit n'était pas embrayé à la sortie du mouvement circulaire.
3	Le clignotant droit n'était pas embrayé au basculement.
3	Le clignotant gauche n'était pas embrayé au basculement.
3	Le clignotant n'était pas embrayé.
3	Les règles de l'exécution du retournement sont violées.
3	Lors de l'arrêt on n'a pas mis de clignotant de droite.
3	Lors de l'arrêt on n'a pas mis de clignotant de gauche.
3	Violation des règles de l'arrêt.
4	Brûlage d'un feu rouge.
4	Collision avec un piéton.
4	Conduite dans la direction interdite.
4	Conduite sur la circulation venant en sens inverse.
4	Descente sur la circulation venant en sens inverse avec la croisée des marquages de la route.
4	Excès de limitation de vitesse pour plus de 40 km/h.
4	Infraction de la priorité du passage du carrefour.
4	Vous avez un accident.
4	Vous n'avez pas livré passage au piéton.
6	Excès de limitation de vitesse pour plus de 60 km/h.

TABLE 6.13 – Barème des pénalités en fonction du type d'infraction

Les scores aux épreuves arithmétiques

Deux mesures de la performance aux opérations span ont été calculés. La première évalue la qualité des réponses : il s'agit du rapport entre le nombre de bonnes réponses et le nombre d'énoncés (6), elle s'exprime en pourcentage. La seconde consiste à mesurer les temps de réaction, indépendamment de la qualité de la réponse fournie. Le temps de réaction correspond à la durée s'étant écoulée entre le début de la consigne annonçant l'opération à réaliser et le début de la réponse fournie par sujet, cette mesure s'exprime en millisecondes. Etant donné que cette épreuve est effectuée à sept reprises, il est possible de comparer les résultats entre chaque passation.

Les scores au test attentionnel

Le test attentionnel ANT(Fan et al., 2002) procure trois mesures différentes, exprimées en millisecondes.

Le score d'alerte de l'attention est calculé en soustrayant le temps médian de réaction en condition de double indice du temps médian de réaction sans indice. Aucune de ces deux conditions ne fournit d'information sur le lieu d'apparition du stimulus suivant (haut ou bas). Dans la condition sans indice, l'attention reste centrée de façon diffuse sur les emplacements potentiels sans donner d'indication sur le moment d'apparition tandis que lorsque le double indice est présenté, l'attention reste également diffuse sur les points potentiels d'apparition mais le sujet sait que l'apparition du stimulus est proche. Plus ce score est élevé, plus l'alerte est efficace.

L'effet de l'orientation est calculé en soustrayant le temps médian des conditions avec indice spatial des conditions de l'indice central. Les deux conditions permettent d'alerter le sujet mais seuls les indices spatiaux permettent au sujet de connaître l'emplacement d'apparition du prochain stimulus. Celui-ci permet au sujet de concentrer son attention sur un endroit précis avant l'apparition du stimulus alors que la condition indice central sur la croix de fixation sert de contrôle. Plus le score est élevé, plus l'orientation est efficace.

Le score du contrôle exécutif est obtenu en soustrayant le temps médian de réaction des flèches convergentes du temps médian de réaction des flèches divergentes. Plus le score est faible, plus le contrôle exécutif est performant.

En outre, un temps de réaction moyen global (en ms) et un taux d'erreurs (%) sont calculés pour le test entier. Etant donné que ce test est administré deux fois, l'évolution de ces 5 mesures entre les deux passations est appréciable.

6.3.2 Les mesures physiologiques

Cette étude faisant partie du projet de recherche BIOVOC, des paramètres physiologiques sont récoltés à certains moments durant l'expérience.

Dix prélèvements de salive étaient prévus à différents moments (voir figure 6.11) : l'analyse de la salive a pour objectif d'étudier la concentration de *3-Methoxy-4-hydroxy-phenylglycol* (MHPG).

Nous avons eu l'opportunité d'employer des lunettes (SensoMotoric Instruments, Eye Tracking Glasses) assurant un suivi du regard à l'aide de caméras infrarouges capturant la position de chaque pupille toutes les 33 ms, soit à une fréquence de 30 Hz. Cette faible résolution temporelle ainsi que les variations incontrôlées de la luminosité, provenant principalement de la lumière émise par l'écran affichant la simulation, nous ont amené à ne pas mesurer la dilatation pupillaire. Nous avons dès lors privilégié l'analyse de la nictation du sujet : Faure et al. (2016) ont montré que, dans des phases de conduite sur simulateur, la fréquence de clignement des yeux augmente lors de l'introduction d'une tâche secondaire. Comme mesure de la nictation, nous avons mesuré la durée, exprimée en secondes, séparant deux clignements des yeux entre les phases de conduite en tant que tâche isolée et les phases de conduite avec exécution simultanée des tâches cognitives (double tâche).

6.3.3 Les mesures acoustiques

Captation des productions verbales

Lors de chaque étape, quatre fichiers audio étaient enregistrés, chacun sur seul un canal (mono) à une fréquence d'échantillonnage de 44100 Hz sur une profondeur de 16 bits dans un format non compressé (.WAV) : le premier comprenait les productions du sujet, le deuxième les productions de l'expérimentateur, le troisième les consignes de l'opération span, le dernier était un mixage des 3 premiers. Il convient de signaler que le son du simulateur et la voix du sujet étaient également enregistré par l'ordinateur affichant et capturant la simulation.

Parmi les productions enregistrées, nous focalisons notre attention, dans le cadre de ce document, sur les litanies réalisées. En plus des mesures quantitatives fréquemment

analysées comme la fréquence fondamentale, nous pensons qu'il est pertinent d'explorer la dynamique prosodique et les particularités phonétiques de ces litanies. Souhaitant comparer des productions censées être identiques, nous avons rapidement éprouvé le besoin de disposer d'un outil autorisant ces mises en parallèle. C'est pourquoi, avant de détailler les indices acoustiques retenus dans cette étude, nous allons brièvement présenter la représentation prosodique que nous avons développée.

Elaboration d'une représentation prosodique

Pour construire une représentation de la prosodie et y intégrer des informations phonétiques, nous nous sommes inspirés des prosogrammes proposés par Mertens (2004). L'idée est de disposer d'une représentation graphique à la fois riche et simple de l'évolution de la fréquence fondamentale et de l'intensité en fonction du temps. L'objectif étant de comparer plusieurs litanies, nous devons donc nous assurer de disposer d'échelles identiques entre nos prosogrammes. Pour parvenir à nos fins, nous avons tout d'abord segmenté et annoté nos fichiers audios à l'aide du logiciel Praat (V 6.0.0.4) grâce à 4 zones d'annotation, appelées "tiers" : la première est réservée à la transcription orthographique, la deuxième à la transcription phonétique, la troisième au découpage en syllabes et la quatrième à des commentaires. Cette étape est illustrée à la figure 6.12.

Rappelons que le découpage de la chaîne parlée en phonèmes isolés est une représentation théorique : en effet, comme évoqué précédemment, la parole ne se résume pas à une succession de phonèmes placés les uns derrière les autres. Au contraire, de nombreux phénomènes rendent le découpage difficile. Toutefois, bien qu'il soit quelque peu artificiel, nous pensons qu'un tel découpage, pour peu que les difficultés soient bien renseignées, par exemple dans les commentaires, présente un réel intérêt didactique. Pour être complet, signalons que nous avons bénéficié de l'assistance de plusieurs chercheurs chevronnés du laboratoire de phonétique de l'UMONS pour procéder à cette segmentation. Par ailleurs, cette tâche comportant une part de subjectivité, nous avons procédé à une validation intra-juge de nos segmentations en revenant sur nos premiers découpages pour assurer une segmentation homogène.

Ensuite, grâce à un script que nous avons écrit dans Praat, nous avons exporté dans un fichier texte le nombre de phonèmes, le nombre de syllabes, les représentations orthographiques et phonétiques, les points de début et de fin de chaque phonème et de chaque syllabe, nos commentaires ainsi que les valeurs de F0 et d'intensité mesurées toutes les 10 ms.

Enfin, nous avons conçu un programme en C++ incluant la bibliothèque de traitement d'images Magick++ qui lit le fichier texte généré par le script Praat, calcule et dessine dans un fichier image nos prosogrammes en fonction de quelques paramètres passés en ligne de commande. Nous avons ainsi la possibilité de dessiner des prosogrammes offrant plus ou moins d'informations.

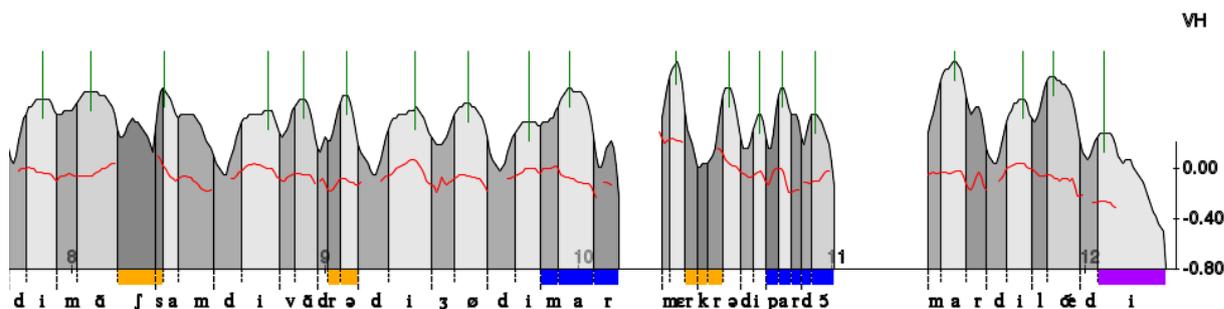


FIGURE 6.14 – Extrait d'un prosogramme détaillé

La ligne brisée rouge représente l'évolution de la fréquence fondamentale exprimée en valeur harmonique. L'axe secondaire des ordonnées, situé à droite du prosogramme, donne l'échelle des valeurs harmoniques (1 pixel équivaut à 0.01 VH dans le fichier image original).

Enfin, des rectangles de couleurs situés entre l'axe des abscisses et la légende des phonèmes permet de d'attirer l'attention : cinq couleurs ont été retenues, elles correspondent aux annotations rédigées dans la quatrième tier de praat, celui dédié aux commentaires. Un rectangle rouge signale la syncope d'un phonème ; un rectangle vert indique l'ajout d'un phonème ; un rectangle orange souligne la présence de phénomènes entre les phonèmes comme de la coarticulation, une fusion ou une assimilation ; un rectangle bleu renseigne une erreur de production telle que l'ajout, la suppression ou l'inversion de mots ; enfin, un rectangle mauve annonce une altération autre telle qu'un rire, un souffle, etc.

Les mesures de la voix

Au niveau de la voix, nous nous sommes intéressé au nombre de vibrations des plis vocaux par seconde. Nous avons donc extrait la fréquence fondamentale (F0) à raison d'une mesure toutes les 10 ms pour l'ensemble des segments voisés des litanies en recourant à l'algorithme d'extraction du pitch par auto-corrélation du logiciel Praat (version 6.0.04). Chaque mesure fréquentielle a ensuite été convertie en valeur harmonique (Piérart & Harmegnies, 1993). Comme le montre la formule reproduite à la figure 6.15, la valeur harmonique s'obtient par le logarithme en base 2 du rapport entre la valeur fréquentielle exprimée en hertz (f) et une valeur de référence (r), la hauteur de la note de musique do_2 , soit 130.813 Hz (Zwicker & Feldtkeller, 1981).

$$VH = \log_2 \left(\frac{f}{r} \right)$$

FIGURE 6.15 – Calcul de la valeur harmonique

Cette conversion offre plusieurs avantages : son principal atout est qu'elle exprime la relation harmonique entre deux valeurs, indépendamment de la fréquence de départ. Nous pouvons illustrer cela à l'aide de la figure 6.16 : les courbes bleues représentent la fréquence fondamentale exprimée en hertz, les rouges, la F0 transformée en valeur harmonique.

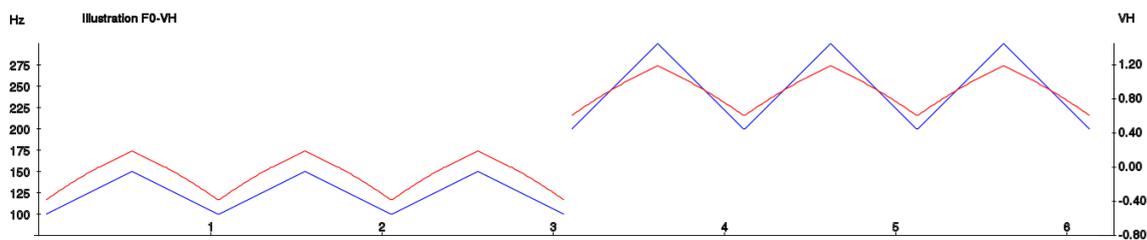


FIGURE 6.16 – Relation entre F0 exprimée en hertz et en valeur harmonique

Sur la partie gauche de la figure 6.16, nous observons une oscillation régulière de la F0 : elle passe de 100 Hz à 150 Hz puis redescend à 100 Hz, ce cycle se répétant trois fois. De manière générale, un auditeur perçoit que la F0 augmente et diminue de moitié. Si cette relation est exprimée en Hz, les variations sont comprises entre + 50 Hz et - 50 Hz alors qu'en valeur harmonique, elles sont comprises entre + 0.585 VH et - 0.585 VH.

Observons désormais les courbes de la partie droite de la figure 6.16. Nous relevons un phénomène identique mais dont les valeurs extrêmes sont cette fois-ci comprises entre 200 Hz et 300 Hz. La relation entre ces valeurs est identique à celles de la partie gauche : une multiplication ou une division par 1.5. Toutefois, si la F0 est exprimée en Hz, l'écart maximal varie désormais de + 100 Hz à - 100 Hz alors que les écarts exprimés en valeur harmonique sont strictement identiques : de + 0.585 VH à - 0.585 VH. La figure 6.16 illustre très clairement ce constat : les tracés bleus diffèrent tandis que les tracés rouges sont strictement identiques.

En conclusion, la conversion de la F0 en valeur harmonique permet, grâce à une transformation logarithmique d'une échelle de rapport, d'exprimer la relation harmonique entre deux valeurs de F0 sans être influencée par la valeur de départ. Selon nous, le recours à cette mesure est précieux pour comparer des individus présentant des fréquences fondamentales moyennes assez éloignées : en effet, nous avons relevé une F0 moyenne de 85 Hz pour un sujet et de 145 Hz pour un autre.

Enfin, le recours à une transformation logarithmique a tendance à normaliser la distribution des données : cet effet est illustré aux figures 6.17 et 6.18.

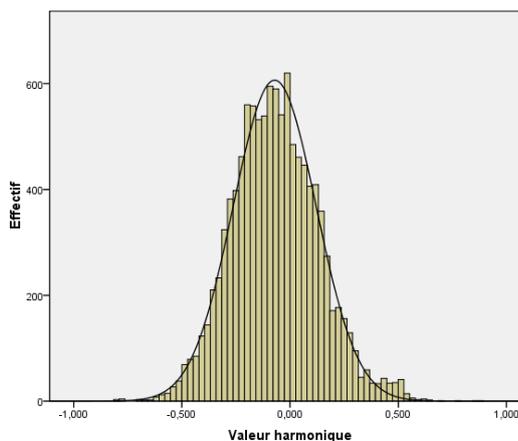
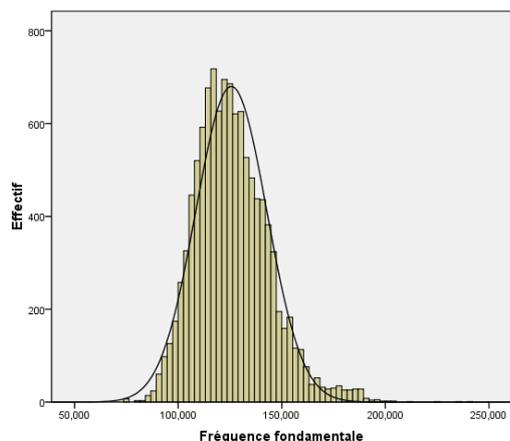


FIGURE 6.17 – Histogramme de F0 en Hz FIGURE 6.18 – Histogramme de F0 en VH

En plus de la mesure quantitative de F0, nos prosogrammes nous offrent un regard

qualitatif : en combinant la courbe rouge représentant l'évolution de F0 en VH avec la couleur de remplissage des phonèmes ou avec leur légende, il est par exemple possible d'observer des phénomènes de voisement ou de dévoisement. Par exemple, sur le prosogramme de la figure 6.14, on peut observer un dévoisement sur le deuxième /d/ de /vãdrædi/.

Les mesures de la parole

Au niveau de la parole, nous nous sommes concentrés sur les aspects temporels. Plus précisément, nous avons calculé les écarts inter-syllabiques (EIS) pour chaque litanie (Piccaluga & Harmegnies, 2006). Pour rappel, cet indice permet de caractériser la fluence d'un locuteur tout en contournant l'épineux problème des pauses. Concrètement, au sein de chaque syllabe, nous avons repéré le pic syllabique d'intensité en sélectionnant la valeur en intensité la plus élevée. Si le pic était constitué de plusieurs valeurs contiguës identiques, nous avons sélectionné le centre du plateau.

Pour calculer l'EIS, nous avons mesuré la durée séparant deux pics syllabiques adjacents, cette mesure s'exprime donc en ms. Par conséquent, nous obtenons un nombre d'EIS inférieur de 1 au nombre de syllabes. Sur la figure 6.14, nous observons la présence d'écarts irréguliers entre certains pics syllabiques, cela témoigne d'une altération de la fluence du locuteur.

En outre, nous apprécions également la fluence en comptant le nombre de pauses ainsi que leur durée en ms.

Grâce aux prosogrammes obtenus, nous avons la possibilité d'approcher la production de la parole sous un angle plus qualitatif : allongement, syncope ou ajout d'un phonème, pause, etc. Par exemple, à la figure 6.14, nous pouvons observer une fusion entre le /ʃ/ de /dimãʃ/ et le /s/ de /samdi/ ainsi que la présence de deux pauses.

Les mesures du langage

Toujours grâce aux prosogrammes, nous sommes en mesure d'identifier et de compter les erreurs de production telles que l'inversion de deux mots, l'oubli ou l'ajout d'un mot. Par exemple, à la figure 6.14, nous observons une inversion entre /mardi/ et /mækrædi/. Le locuteur, se rendant compte de son erreur, a interrompu sa production (/mar/) pour réparer son énonciation. Une fois l'erreur corrigée, il ajoute le mot /pardõ/ avant de terminer sa litanie. Nous pensons que ce type d'erreur de production du langage est à mettre en lien avec le stress induit par la charge de travail.

6.3.4 Les mesures subjectives

Le profil du sujet

Nous avons construit un questionnaire (voir annexe xxx) destiné à collecter des données sur le profil du sujet, il comporte plusieurs parties :

- informations générales comme l'âge du sujet et la date d'obtention de son permis de conduire ;
- informations sur les trajets quotidiens comme le type de routes empruntées et leurs durées ;
- informations sur l'expérience de conduite globale comme le nombre total de kilomètres parcourus ;

- informations sur le style de conduite comme les attitudes au volant ;
- informations sur l'expérience avec les univers virtuels et les simulations automobiles ;
- informations relatives sur le régime alimentaire et la prise de médicaments.

L'évaluation de la fatigue

Pour évaluer la fatigue ressentie, nous nous sommes inspiré des travaux de Piper et al. (1998) et avons adopté l'idée d'un continuum entre deux extrêmes (capable versus incapable) gradué de 0 à 100. Nous avons retenu 17 items, 9 portent sur la fatigue physique/sensorielle, 6 évaluent la fatigue mentale et 2 mesurent la motivation. Les scores de fatigue sont obtenus en calculant la moyenne pour chaque dimension ainsi que la moyenne pour l'ensemble du questionnaire, à l'image de ce que Gledhill, Rodary, Mahe, et Laizet (2002) effectuent. Afin de simplifier la passation, nous avons programmé une version informatique de cet outil en C++ en incluant la bibliothèque GTKmm 3 pour la gestion de l'interface graphique.

Nous obtenons donc 4 scores de fatigue compris entre 0 et 100. Etant donné que ce questionnaire est passé à deux reprises, l'évolution des 4 scores pourra être appréciée.

L'évaluation de la charge de travail perçue

La charge de travail ressentie est évalué à l'aide du NASA-TLX (Hart & Staveland, 2005). N'étant pas totalement satisfait des versions francophones disponibles (Maincent, 2001 ; Cegarra & Morgado, 2009), nous avons procédé à quelques adaptations.

De nouveau, nous avons programmé une version informatique de cet outil en C++ en incluant la bibliothèque GTKmm 3 pour la gestion de l'interface graphique. Nous disposons ainsi de 7 scores variant de 0 à 100 : des scores pondérés par échelle (charge physique, charge mentale, pression temporelle, performance, effort et frustration) ainsi qu'un score pondéré total. En nous référant aux travaux de Hart et Staveland (2005), nous avons fait le choix d'utiliser les scores pondérés plutôt que les scores bruts. Rappelons que Rubio et al. (2004) ont montré que les scores bruts et pondérés sont très corrélés. Nous avons le loisir de comparer les scores obtenus aux différentes échelles en fonction des phases de conduite.

6.4 Composition de l'échantillon

Nos sujets sont au nombre de 14, il s'agit d'un échantillon de convenance, tous les participants sont volontaires. Plusieurs critères d'inclusion ont été définis :

- les sujets sont des hommes ;
- les sujets disposent au minimum du permis de conduire provisoire B ;
- les sujets sont non fumeurs ;
- les sujets sont à jeun depuis au moins 2 heures ;
- les sujets doivent signaler s'ils suivent un régime alimentaire spécifique ;
- les sujets doivent signaler s'ils prennent une médication.

Afin de soutenir la motivation et l'intérêt des individus, une rémunération forfaitaire de 25 euros était accordée à la fin de l'expérience.

Les caractéristiques particulières de certains individus sont présentées dans la partie suivante car elles sont employées pour interpréter les résultats.

Pour étudier les effets du stress induit par la charge cognitive, nous avons recruté 14 sujets masculins disposant d'un permis de conduire. Nous les avons soumis à trois tâches de production verbale : l'énonciation à l'endroit d'une litanie des jours de la semaine et des mois de l'année, une énonciation à rebours de cette même litanie et une tâche impliquant de la mémorisation et du calcul mental. Ces trois tâches ont été administrées isolément au début et à la fin de l'expérience. Entre ces étapes, les sujets ont effectué 5 tâches de conduite sur un simulateur automobile. Afin d'engendrer du stress lié à la charge de travail, nous avons fait varier la densité du trafic et des piétons en fonction des phases de conduite. A la fin de chaque phase de conduite, alors que le sujets se déplaçaient sur une portion autoroutière, ils ont été plongés dans une double tâche : ils devaient conduire le véhicule tout en réalisant les trois tâches de production verbale mentionnées ci-avant.

Nous avons collecté de nombreuses variables dépendantes : les performances de conduite, les performances attentionnelles, les performances à la tâche de calcul, le taux de nictation par minute, les évaluations subjectives de la charge de travail et de la fatigue ressenties, les productions verbales, etc.

Nous avons retenu plusieurs indices pour analyser les litanies produites par les sujets : l'évolution de la F0 exprimée en valeur harmonique, la fluence mesurée grâce à l'évolution de l'écart inter-syllabique, le nombre et la durée des pauses, le nombre d'erreurs de production. A ces indices quantitatifs, nous associons une lecture plus qualitative des litanies produites grâce à des prosogrammes illustrant la prosodie et de certains aspects phonétiques segmentaux et supra-segmentaux.

Troisième partie

Résultats

Nous avons scindé cette partie en plusieurs chapitres afin de mieux structurer nos résultats. Tout d’abord, afin d’éviter un sentiment de redondance chez le lecteur, nous avons décidé de présenter nos données ainsi que les analyses statistiques que nous avons choisies pour les traiter.

Dans un deuxième chapitre, nous adoptons un regard global sur nos résultats en décrivant les effets généraux observables pour tous les sujets. Dans cette partie, nous analysons les performances de conduite, les scores attentionnels, les scores de charge de travail et l’évolution de la fréquence fondamentale. Nous investiguons également les liens existant entre certaines de ces mesures.

Dans un troisième chapitre, nous détaillons la procédure que nous avons suivie pour construire des profils de conducteurs sur base des performances obtenues dans le simulateur et nous avons testé la pertinence de cette classification en regard des informations provenant du questionnaire de profilage.

Dans un quatrième chapitre, nous centrons nos analyses sur 5 sujets choisis grâce à la classification construite dans le chapitre précédent : pour chacun, nous analysons les performances de conduite, les scores attentionnels, les scores aux tâches d’operation span, le taux de nictation, la charge de travail et la fatigue ressenties. Au niveau des productions verbales, nous analysons l’évolution de la fréquence fondamentale, la fluence et les erreurs de production. Grâce aux vidéos enregistrées et aux prosogrammes tracés, nous enrichissons ces analyses avec des informations qualitatives.

Enfin, dans un dernier chapitre, nous synthétisons ces résultats et les confrontons aux constats évoqués dans notre revue de la littérature.

Chapitre 7

Choix des procédures statistiques

Afin de répondre à nos questions de recherche, nous avons procédé à de nombreuses analyses statistiques sur nos différentes mesures. L'ensemble des procédures statistiques et des diagrammes ont été exécutés dans le logiciel SPSS 24.0 FR (64 bits). Des tests statistiques paramétriques sont applicables si 4 conditions sont remplies : les données doivent être métriques, l'échantillon doit avoir une taille minimum, les données doivent être distribuées normalement et les variances entre les groupes doivent être homogènes. Nous allons vérifier ces conditions pour chacune des mesures que nous souhaitons analyser.

7.1 Analyses inter-sujets

Au niveau de l'analyse globale des résultats, prenant en compte l'ensemble des sujets, nous avons analysé les performances de conduite, les scores attentionnels, les scores de charge de travail et l'évolution de la fréquence fondamentale.

7.1.1 Analyse des scores de conduite

Pour évaluer les performances de conduite, nous disposons d'un score de conduite par phase et par sujet. Ces 5 scores sont appariés car c'est le même individu qui effectue les 5 phases de conduite. Nous avons donc 14 sujets statistiques. Étant donné le faible nombre de sujets et la présence d'une seule donnée par phase et par sujet, nous optons pour un test non paramétrique de Friedman.

7.1.2 Analyse des scores de charge de travail

Pour évaluer la charge de travail ressentie, nous disposons du score total pondéré au NASA-TLX (Hart & Staveland, 2005) par phase et par sujet. Ces 5 scores sont appariés car c'est le même individu qui effectue les 5 phases de conduite. Nous avons donc 14 sujets statistiques. Étant donné le faible nombre de sujets et la présence d'une seule donnée par phase et par sujet, nous optons à nouveau pour un test non paramétrique de Friedman.

7.1.3 Analyse des scores attentionnels

Au niveau des performances attentionnelles, nous nous focalisons sur de 2 scores (temps de réaction ; taux de réussite) obtenus à 2 reprises (étape 1 ; étape 7) après pour chaque

sujet. Pour chaque sujet, nous disposons donc de 2 fois 2 scores appariés. A nouveau, en raison de la taille de l'échantillon (N=14) et du fait que nous ne disposons que d'une seule donnée par score et par étape, nous choisissons un test non paramétrique des rangs signés de Wilcoxon.

7.1.4 Analyse des scores aux opérations span

Compte tenu du fait que les énoncés de chaque opération span étaient uniques et présentés dans un ordre pseudo-aléatoire, nous considérons nos 7 ensembles de mesures métriques (ms) comme indépendants. Nous souhaitons procéder à une analyse de variance à deux critères croisés pour tester l'effet des sujets (facteur aléatoire), l'effet des étapes (facteur fixe) ainsi que les éventuels effets d'interaction. Toutefois, les tests d'homogénéité et de normalité pratiqués, disponibles à l'annexe xxx, s'avèrent être tous significatifs, c'est pourquoi nous optons pour deux tests non paramétriques H de Kruskal Wallis, si ceux-ci s'avèrent significatif, nous procédons à des comparaisons 2 à 2 à l'aide du test non paramétrique U de Mann-Whitney.

7.1.5 Analyse de la fréquence fondamentale

La fréquence fondamentale ayant été mesurée toutes les 10 ms, nous obtenons un nombre de mesures différent pour chaque litanie. En conséquence, nos échantillons sont indépendants. A l'aide d'une analyse de variance à trois critères croisés, nous pouvons tester l'effet des sujets (14 sujets, facteur aléatoire), l'effet des étapes (TS1, DT1, DT2, DT3, DT4, DT5, TS2, facteur fixe) et l'effet du sens d'énonciation des litanies (endroit, envers, facteur fixe) ainsi que les 4 effets d'interaction sur la fréquence fondamentale exprimée en valeur harmonique.

Sujets	Kolmogorov-Smirnov	Degré de liberté	Significativité
Sujet 1	.017	11083	<.001
Sujet 2	.012	12406	<.001
Sujet 3	.037	9507	<.001
Sujet 4	.044	14111	<.001
Sujet 5	.050	11558	<.001
Sujet 6	.050	8228	<.001
Sujet 7	.068	11809	<.001
Sujet 8	.049	10830	<.001
Sujet 9	.063	9960	<.001
Sujet 10	.052	14704	<.001
Sujet 11	.051	9195	<.001
Sujet 12	.039	9186	<.001
Sujet 13	.073	9539	<.001
Sujet 14	.073	10801	<.001

TABLE 7.1 – Tests de normalité des distributions de VH par sujets

Etapas	Kolmogorov-Smirnov	Degré de liberté	Significativité
TS 1	.037	21146	<.001
DT 1	.025	23158	<.001
DT 2	.026	22524	<.001
DT 3	.028	22314	<.001
DT 4	.033	21968	<.001
DT 5	.027	22270	<.001
TS 1	.046	19577	<.001

TABLE 7.2 – Tests de normalité des distributions de VH par étapes

Sens d'énonciation	Kolmogorov-Smirnov	Degré de liberté	Significativité
Endroit	.041	70384	<.001
Envers	.022	82573	<.001

TABLE 7.3 – Tests de normalité des distributions de VH par sens d'énonciation

Variabiles indépendantes	Levene	Degré de liberté 1	Degré de liberté 2	Significativité
Sujets	1071.880	13	152943	<.001
Etapes	132.053	6	152950	<.001
Sens d'énonciation	.261	1	152955	.609

TABLE 7.4 – Tests d'homogénéité des variances pour les trois facteurs

Comme l'illustrent les tables 7.1, 7.2 et 7.3, le postulat de normalité des distributions n'est en aucun cas respecté et ce malgré les transformations en valeur harmonique. Au niveau de l'homogénéité des variances (voir table 7.4), seuls les deux groupes formés par le sens d'énonciation respectent ce critère.

Compte tenu du non respect de ces critères, nous devons faire preuve de vigilance pour l'interprétation des résultats. Idéalement, il faudrait recourir à trois tests non paramétriques de Kruskal-Wallis, cependant, cette alternative nous prive des effets d'interaction.

7.2 Analyses individuelles

Etant donné l'importance des facteurs individuels dans la gestion de la charge de travail et dans l'émergence du stress, les résultats obtenus par 5 sujets sont présentés et interprétés séparément comme des études de cas. Il s'agit des sujets 1, 3, 5, 6 et 11. Ces derniers font l'objet d'analyses quantitatives et qualitatives.

Tout d'abord, pour chaque sujet pris isolément, nous évaluons l'évolution des scores de conduite, des taux de réussite et des temps de réactions aux opérations span et les confrontons à la charge de travail ressentie. Nous analysons ensuite l'évolution des résultats aux tests attentionnels : nous passons en revue les temps de réaction, le taux de réussite ainsi que les scores d'alerte, d'orientation et du contrôle exécutif et les mettons en parallèle avec la fatigue ressentie. Nous nous focalisons ensuite sur les litanies : nous analysons l'évolution de la fréquence fondamentale et de la fluence et explorons les prosogrammes tracés. Nous attirons l'attention du lecteur sur l'intérêt de consulter les prosogrammes au format numérique afin de pouvoir afficher en couleurs certains détails, peu visibles dans ce document, en raison notamment de la mise à l'échelle et du format de l'impression. Ces prosogrammes sont disponibles aux annexes xxx.

7.2.1 Analyse des scores aux tests attentionnels

Pour analyser les temps de réaction au test ANT de chaque sujet, nous avons écarté tous les essais auxquels le sujet n'a pas répondu ou s'est trompé. Par conséquent, nous obtenons deux ensembles indépendants de mesures métriques (ms). Comme pour la partie précédente, nous avons vérifié la normalité des distributions à l'aide du test de Kolmogorov-Smirnov ainsi que leur homogénéité au moyen du test de Levene. Afin de ne pas alourdir ce chapitre, nous avons consigné tous les tableaux dans l'annexe xxx. Il ressort de ces tests que la majorité des distributions s'écartent significativement d'une loi normale et que le postulat d'homoscédasticité est rarement respecté. Pour ces raisons, nous avons opté pour l'utilisation du test non paramétrique U de Mann-Whitney.

7.2.2 Analyse des scores aux opérations span

Compte tenu du fait que les énoncés de chaque opération span étaient uniques et présentés dans un ordre pseudo-aléatoire, nous considérons nos 7 ensembles de mesures métriques (ms) comme indépendants. Comme chaque ensemble de mesures, correspondant à une passation, ne comporte que 6 observations, nous optons pour un test non paramétrique H de Kruskal Wallis, si celui-ci s'avère significatif, nous procédons à des comparaisons 2 à 2 à l'aide du test non paramétrique U de Mann-Whitney. Contrairement aux temps de réaction des tests attentionnels, nous conservons toutes les mesures hormis lorsque le sujet n'a rien dit. Nous justifions ce choix par la faible taille de nos échantillons et par le fait que le sujet pouvait ne pas effectuer le calcul en disant "passe". Cette réponse d'évitement se caractérise par un temps de réaction.

7.2.3 Analyse du taux de nictation

Faure et al. (2016) ont mis en avant une augmentation du taux de nictation en condition de double tâche. Pour évaluer cet effet dans notre dispositif, nous comparons ici la durée, exprimée en secondes, séparant deux clignements des yeux entre les phases de conduite en tant que tâche isolée et les phases de conduite avec exécution simultanée des tâches cognitives (double tâche). A la vue de nos données, nous avons fait le choix, dans un premier temps, de ne pas comparer la fréquence de nictation entre les phases de conduite. En effet, étant donné la faible résolution temporelle de notre dispositif d'eye tracking, nous soupçonnons la présence d'artefacts. En outre, nous avons exclu les observations de 3 des 5 sujets retenus car celles-ci étaient aberrantes, cela est dû au fait que ces individus portaient des lunettes ou des lentilles.

Ces deux ensembles de mesures métriques sont indépendants, les tests de normalité et d'homogénéité des variances (voir table 7.5) montrent que les distributions ne sont pas normales et que le postulat d'homoscédasticité n'est pas respecté pour les deux sujets retenus. En conséquence, nous utilisons le test non paramétrique U de Mann-Whitney.

Sujets	Normalité conduite isolée	Normalité double tâche	Homogénéité
Sujet 1	$D(1156)=.230$ $p<.001$	$D(698)=.333$ $p<.001$	$F(1,1852)=256.716$ $p<.001$
Sujet 5	$D(577)=.215$ $p<.001$	$D(226)=.213$ $p<.001$	$F(1,801)=22.930$ $p<.001$

TABLE 7.5 – Tests de normalité et d'homogénéité des variances pour la nictation

7.2.4 Analyse de la fréquence fondamentale

Les données utilisées sont les mêmes que pour l'analyse inter-sujet. Nous disposons donc, pour chaque sujet étudié, d'un nombre de données différent pour chaque litanie. En conséquence, nos échantillons sont indépendants. A l'aide d'une analyse de variance à deux critères croisés, nous testons l'effet des étapes (TS1, DT1, DT2, DT3, DT4, DT5, TS2, facteur fixe) et l'effet du sens d'énonciation des litanies (endroit, envers, facteur fixe) ainsi que leur effet d'interaction sur la fréquence fondamentale exprimée en valeur harmonique. Malheureusement, les tests de normalité et d'homogénéité calculés, synthétisés à l'annexe xxx, sont pratiquement tous significatifs. Ces analyses étant au cœur de notre étude, nous ne pouvons nous satisfaire de tests dont les conditions d'application ne sont pas respectées. C'est pourquoi, outre ces analyses paramétriques, nous avons eu recours à leur

équivalent non paramétrique. Ainsi, pour statuer sur la présence d'un effet des étapes, nous avons opté pour un test H de Kruskal-Wallis, suivi d'une série de tests U Mann-Whitney comme post-hoc le cas échéant. Nous avons employé un test U de Mann-Whitney pour objectiver la présence d'un effet du sens d'énonciation des litanies. Enfin, pour apprécier un éventuel effet d'interaction, nous avons calculé un test U de Mann-Whitney pour chaque étape prise isolément.

7.2.5 Analyse des écarts inter-syllabiques

Le nombre d'écarts inter-syllabiques varie quelque peu d'une litanie à l'autre : en théorie, la litanie se compose de 36 syllabes, soit 35 valeurs d'EIS. Cependant, des oublis de mots, l'ajout de phonèmes ou de mots induit de légères fluctuations du nombre d'EIS par litanie. En conséquence, nous disposons, pour chaque sujet, d'échantillons indépendants de mesures métriques (ms). La présence de certaines pauses, parfois très longues (plusieurs secondes), se traduit par des valeurs très éloignées de la moyenne pour certaines mesures d'EIS. Ce constat, ainsi que les tests d'homogénéité et de normalité pratiqués (voir annexe xxx), nous ont amené à privilégier des tests non paramétriques. Ces tests étant également au centre de notre recherche, nous avons appliqué le même protocole d'analyse que celui décrit au point précédent.

7.2.6 Corrélations

Pour étudier le degré de liaison existant entre certaines de nos variables dépendantes, nous utilisons de corrélations linéaires de Bravais et Pearson si les deux mesures sont métriques. Si une de nos deux mesures est ordinale, nous privilégions alors une corrélation de Spearman.

En conclusion, les conditions d'application de tests paramétriques sont en règle générale non respectées. Nous y avons cependant recours dans les cas où nous souhaitons statuer sur la présence d'effets d'interaction. Nous les complétons par des tests non paramétriques, certes moins puissants, mais moins exigeants aussi, pour comparer nos groupes. Pour des 2 échantillons appariés, nous privilégions un test des rangs signés de Wilcoxon et un test de Friedman pour comparer plus de deux échantillons appariés. Pour les échantillons indépendants, nous comparons deux groupes à l'aide d'un test U de Mann-Whitney tandis que nous recourons à un test H de Kruskal-Wallis pour comparer plus de 2 groupes. Enfin, les corrélations linéaires sont mesurées grâce à de coefficients de Bravais et Pearson ou de Spearman.

Chapitre 8

Analyses globales et inter-sujets

Dans ce chapitre, nous posons un regard macroscopique sur nos résultats : l'objectif est d'apprécier l'évolution de nos indices pour l'ensemble de nos 14 sujets simultanément.

8.1 Evolution des performances de conduite

Tout d'abord, il convient d'évaluer si la difficulté de la tâche de conduite, déterminée par la densité de trafic et de piétons ainsi que par leur comportement, influence bien les performances, c'est-à-dire le nombre d'infractions commises. Nous observons, grâce à un test de Friedman opéré sur les scores de conduite de chaque phase de simulation, des différences significatives de performance globale ($\chi^2(4) = 15.842$, $p = .003$). Les comparaisons 2 à 2 opérées grâce à des tests des rangs signés de Wilcoxon, dont les résultats sont présentés à la table 8.1 ainsi qu'à la figure 8.1, mettent en évidence que, hormis la 4e phase de conduite (DT4, $rm^1 = 3.43$), le score de conduite est significativement plus élevé dans la phase de simulation complexe (DT3, $rm = 4.29$). Les différences entre les phases de conduites simples (DT1, $rm = 2.43$; DT5, $rm = 2.39$) et la 4e phase de simulation (DT2) sont au seuil de la significativité : le score de conduite est plus élevé durant la 2e phase de conduite modérée (DT4). Par contre, le score de conduite de la première phase de conduite modérée (DT2, $rm = 2.46$) ne diffère pas de ceux des phases de conduites simples (DT1, DT5).

DT2	Z=-.157 p=.875			
DT3	Z=-3.108 p=.002	Z=-2.481 p=.013		
DT4	Z=-1.853 p=.064	Z=-1.475 p=.140	Z=-1.416 p=.157	
DT5	Z=-.534 p=.594	Z=-.664 p=.507	Z=-2.857 p=.004	Z=-1.760 p=.078
	DT1	DT2	DT3	DT4

TABLE 8.1 – Comparaison des phases de simulation 2 à 2 pour le score de conduite

1. rang moyen

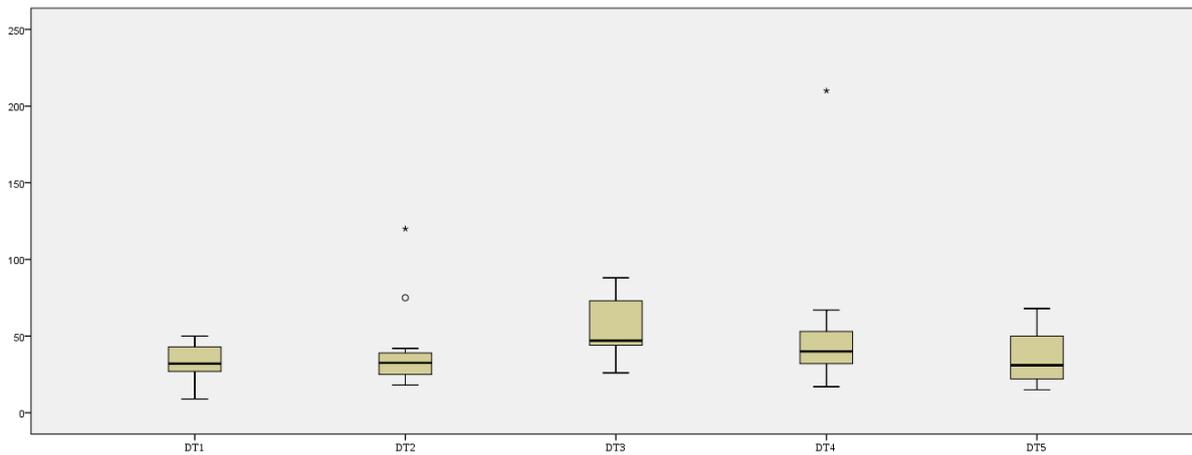


FIGURE 8.1 – Distribution du score de conduite par phases de simulation

Globalement, nous pouvons conclure que l'augmentation de la densité du trafic et des piétons se traduit par une augmentation du nombre d'infractions au code de la route, c'est-à-dire par une diminution de performances de conduite.

8.2 Evolution de la charge de travail ressentie

Comme le montre la figure 8.2, la charge de travail que les sujets ont déclaré ressentir est plus élevée dans les phases de conduite modérées et complexe (DT2, DT3, DT4). Néanmoins, le test de Friedman opéré sur le score total pondéré ne montre pas de différences globales de charge de travail entre les phases de conduite ($\chi^2(4, N=14)=3.971$, $p=.410$).

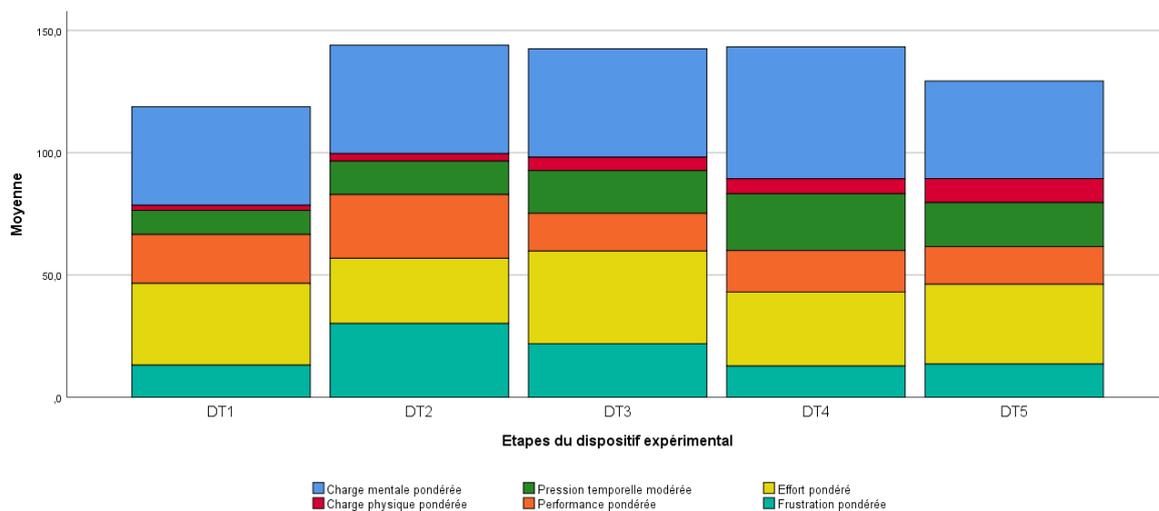


FIGURE 8.2 – Evolution des échelles pondérées de la charge de travail

Par ailleurs, la charge de travail ressentie par les sujets semble assez peu corrélée avec les performances de conduite atteintes ($r= .382$). Cette corrélation est dessinée à la figure 8.3.

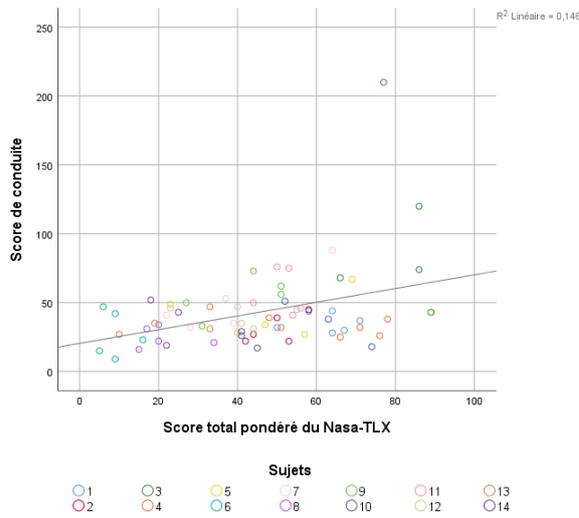


FIGURE 8.3 – Conduite et NASA-TLX

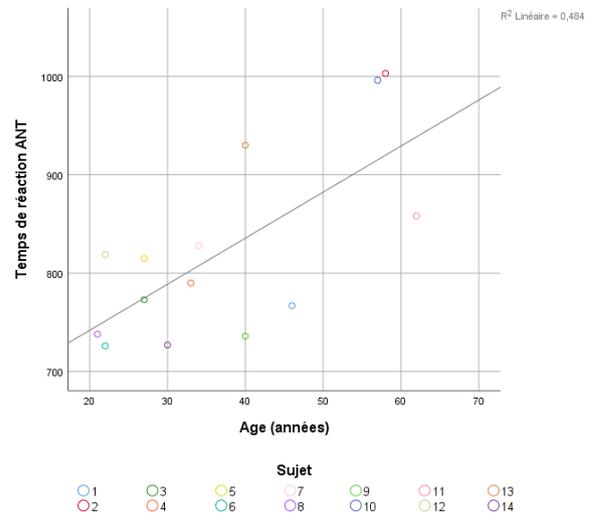


FIGURE 8.4 – Age et ANT

Les scores totaux pondérés du NASA-TLX ne permettent pas de discriminer les phases de conduite. Par ailleurs, ceux-ci sont peu corrélés avec les scores de conduite.

8.3 Evolution des performances attentionnelles

Les résultats obtenus aux tests attentionnels, reproduits à la table 8.2, montrent une absence de différence au niveau des temps de réaction entre les deux passations ($Z=.785$, $p=.433$) : 8 sujets ont vu leur temps de réaction augmenter tandis qu'il a diminué chez les 6 autres sujets. Nous observons par contre, même si son ampleur est réduite, une réduction significative du taux de réussite ($Z=-2.165$, $p=.030$) : 7 sujets ont vu leur score diminuer.

Toujours à l'aide de la table 8.2, nous relevons des différences de temps de réaction entre nos sujets : lors de la première passation du test attentionnel, le sujet 6 a un temps moyen de réaction de 726 ms contre 1003 ms pour le sujet 2. Nous notons une relation forte ($r=.696$) entre l'âge du sujet et le temps moyen de réaction obtenu à la première passation du test ANT. Cette corrélation est représentée à la figure 8.4.

Sujets	RT - TS1	RT - TS2	Réussite - TS1	Réussite - TS2
Sujet 1	767 ms	691 ms	99%	99%
Sujet 2	1003 ms	1098 ms	100%	100%
Sujet 3	773 ms	627 ms	98%	97%
Sujet 4	790 ms	776 ms	98%	97%
Sujet 5	815 ms	869 ms	100%	100%
Sujet 6	726 ms	756 ms	97%	96%
Sujet 7	828 ms	786 ms	98%	98%
Sujet 8	738 ms	795 ms	98%	98%
Sujet 9	736 ms	756 ms	98%	96%
Sujet 10	996 ms	932 ms	97%	98%
Sujet 11	858 ms	836 ms	97%	96%
Sujet 12	819 ms	791 ms	99%	97%
Sujet 13	930 ms	847 ms	98%	96%
Sujet 14	727 ms	731 ms	99%	99%

TABLE 8.2 – Comparaison des scores attentionnels

Nous pouvons, à l'instar des travaux de Weaver et al. (2009), étudier le degré de liaison existant entre le temps moyen de réaction au test attentionnel obtenu lors de la

première passation et le score moyen de conduite : si l'on prend en compte les 14 sujets, la corrélation est pratiquement nulle ($r = -.103$). Cependant, comme nous pouvons le voir à la figure 8.5, il semble que cette faible valeur puisse s'expliquer par quelques individus : les sujets 3 et 9 se caractérisent par des faibles temps de réaction au test ANT et par des scores de conduite élevés alors que le constat inverse peut être dressé pour les sujets 2, 10 et 13. Ainsi, si nous excluons ces 5 individus, nous obtenons une corrélation très forte ($r = .893$) : cela signifie que, pour les 9 sujets conservés, il est possible de prédire le score de conduite sur base du temps moyen de réaction au test attentionnel. Cette corrélation sur ce sous-ensemble de sujets est dessinée à la figure 8.6.

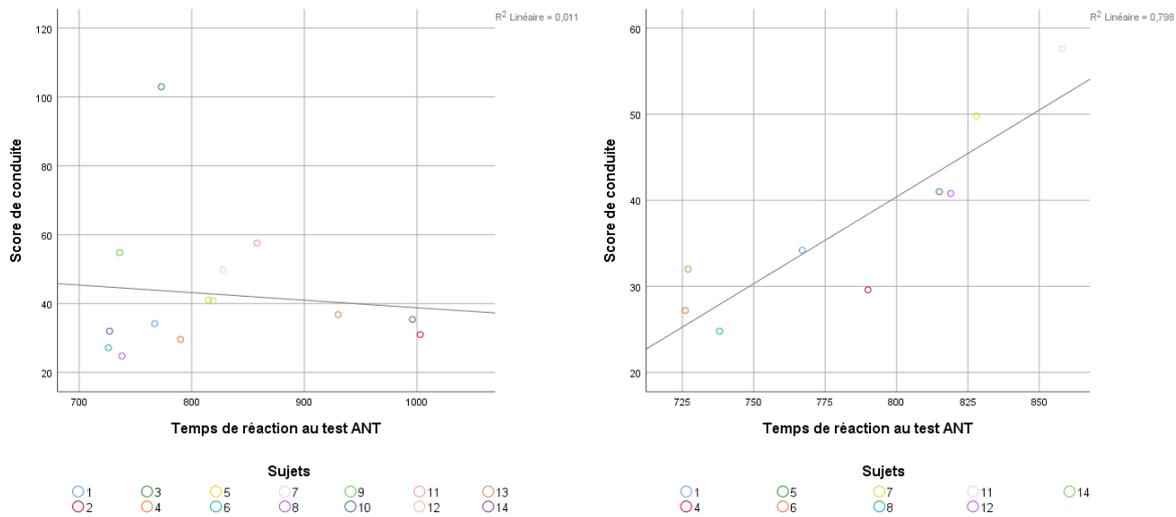


FIGURE 8.5 – Conduite et ANT (N=14) FIGURE 8.6 – Conduite et ANT (N=9)

Globalement, nos sujets obtiennent de très bons scores de réussite aux tests attentionnels, mais ceux-ci décroissent quelque peu lors de la 2e passation pour 7 d'entre-eux. Les temps de réaction s'allongent pour 7 sujets mais nous relevons des différences importantes de temps de réaction entre nos sujets : l'âge de ceux-ci explique la moitié de la variance observée. L'évolution des scores attentionnels suggère un effet des caractéristiques individuelles. Enfin, le temps moyen de réaction au test attentionnel est un bon prédicteur du score de conduite sur simulateur pour 9 de nos 14 sujets.

8.4 Evolution des performances aux tâches arithmétiques

L'analyse de variance à deux critères croisés pratiquée sur le temps de réaction indique la présence d'un effet des sujets, d'un effet des étapes et d'un effet d'interaction. Etant donné le non respect des conditions d'application, nous présentons ici les résultats de tests non paramétriques.

Un test de Kruskal-Wallis montre des différences significatives de temps de réaction entre les sujets ($H(13)=104.884$, $p < .001$). Il existe également des différences entre les étapes du dispositif expérimental prises globalement ($H(6)= 27.951$, $p < .001$). A l'aide d'une série de tests de Mann-Whitney, nous avons comparé toutes les étapes prises 2 à 2.

DT1	U= 2228.0 p< .001					
DT2	U= 2379.5 p< .001	U= 3284.0 p= .605				
DT3	U= 2792.0 p= .026	U= 2925.0 p= .056	U= 3047.0 p= .200			
DT4	U= 2775.0 p= .031	U= 2832.0 p= .036	U= 3003.5 p= .193	U= 3476.0 p= .974		
DT5	U= 2460.0 p= .001	U= 3176.0 p= .321	U= 3278.0 p= .684	U= 3135.5 p= .262	U= 3108.5 p= .278	
TS2	U= 2098.5 p< .001	U= 3367.5 p= .611	U= 3169.0 p= .374	U= 2780.0 p= .018	U= 2668.0 p= .009	U= 3045.5 p= .159
	TS1	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5

TABLE 8.3 – Comparaison 2 à 2 des temps de réaction aux opérations span

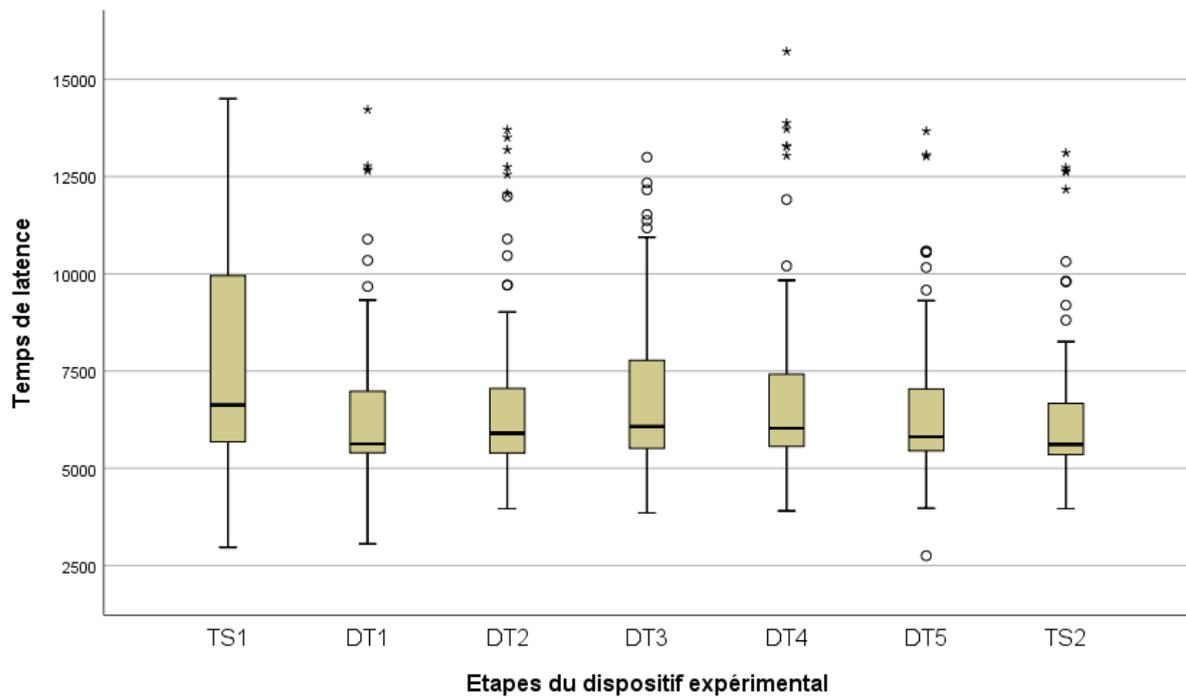


FIGURE 8.7 – Evolution des temps de réaction aux opérations span

Comme le montrent la table 8.3. et la figure 8.7, les temps de réaction de la première passation (TS1, $rm = 364.49$) sont plus longs que lors des 6 autres passations (DT1, $rm = 258.38$; DT2, $rm = 273.59$; DT3, $rm = 308.84$; DT4, $rm = 310.41$; DT5, $rm = 282.42$; TS2, $rm = 246.61$). Les temps de réaction des étapes 2 et 7 (DT1, TS2) sont statistiquement plus courts que ceux des étapes 1, 4 et 5 (TS1, DT3, DT4).

Au niveau du taux de réussite aux opérations span, le test de Kruskal-Wallis indique un effet significatif des sujets ($H(13) = 69.951$, $p < .001$). En effet, la figure 8.8 montre bien les écarts importants existant entre les sujets : le sujet 4 est peu performant alors que le sujet 13 atteint systématiquement un score maximum.

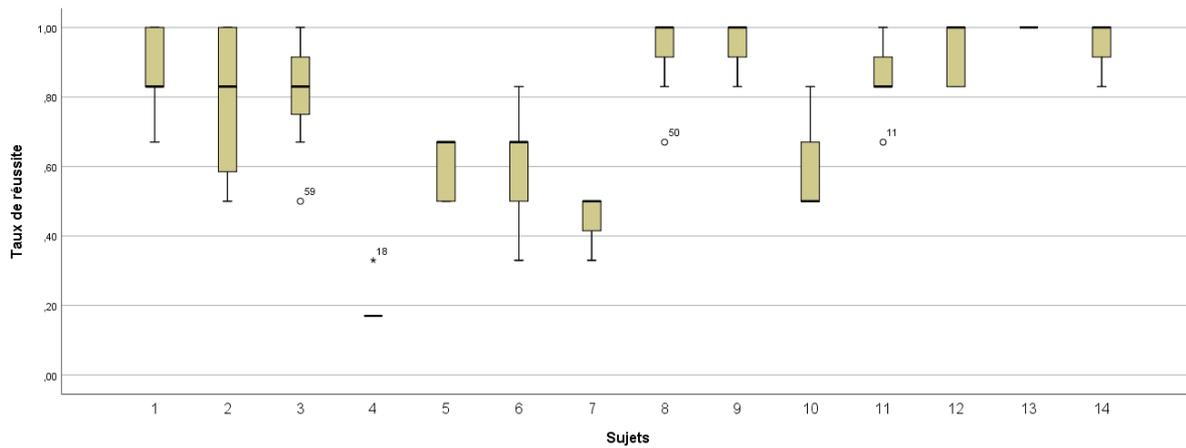


FIGURE 8.8 – Distribution du taux de réussite aux opérations span par sujet

En revanche, aucun effet des étapes n'est à signaler en ce qui concerne le taux de réussite des opérations span ($H(6) = 6.916$, $p = .329$).

Nous relevons ici des temps de réaction différents en fonction des sujets et des étapes. Ceux-ci s'avèrent plus longs lors de la première passation et en situation de double tâche avec la conduite complexe. Par ailleurs, tous les sujets n'avaient clairement pas la même aisance face à cette tâche.

8.5 Evolution de la fréquence fondamentale

L'analyse de variance à trois critères croisés appliquée sur la fréquence fondamentale exprimée en valeur harmonique montre de nombreux effets : effet des étapes, effet du sens d'énonciation des litanies, effet des sujets, effet d'interaction entre les étapes et les sujets, effet d'interaction entre les sujets et le sens d'énonciation, effet d'interaction entre les sujets, les étapes et le sens d'énonciation des litanies. En nous référant à notre cadre théorique, nous nous attendions à retrouver ces effets. Nous devons toutefois faire preuve de prudence quant à ces résultats : les conditions d'application de l'analyse de variance ne sont pas respectées. Nous présentons donc ici quelques résultats issus de tests non paramétriques.

L'effet des sujets est confirmé par le test de Kruskal-Wallis ($H(13) = 57802.433$, $p < .001$). Il est illustré graphiquement à la figure 8.9.

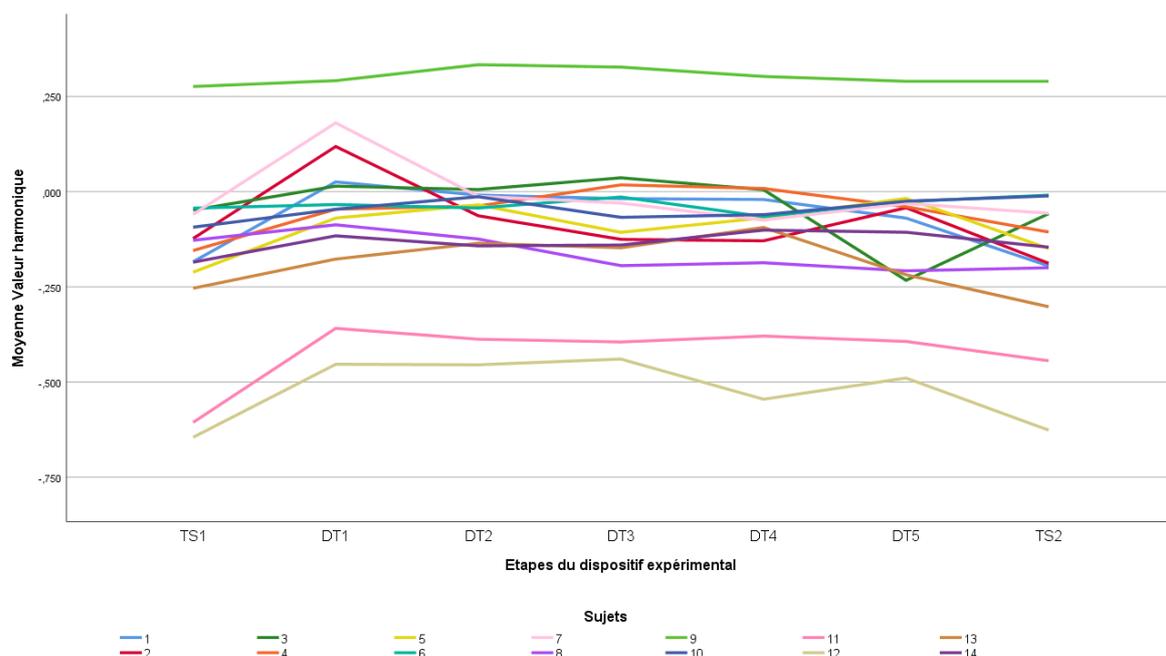


FIGURE 8.9 – Evolution de la fréquence fondamentale moyenne au cours des étapes

Grâce à la figure 8.9, nous relevons des valeurs moyennes de F0 propres à certains individus, ce qui justifie le recours à la transformation en valeur harmonique. Par exemple, le sujet 12 a une F0 bien plus basse que le sujet 9. De manière générale, nous remarquons aussi une élévation de F0 entre les étapes 1 et 2 (TS1, DT1). Cette tendance s’observe chez tous nos sujets. De fait, il existe des différences globales de F0 entre les étapes du dispositif expérimental ($H(6) = 3472.126$, $p < .001$). Celles-ci sont aussi observables à la figure 8.10.

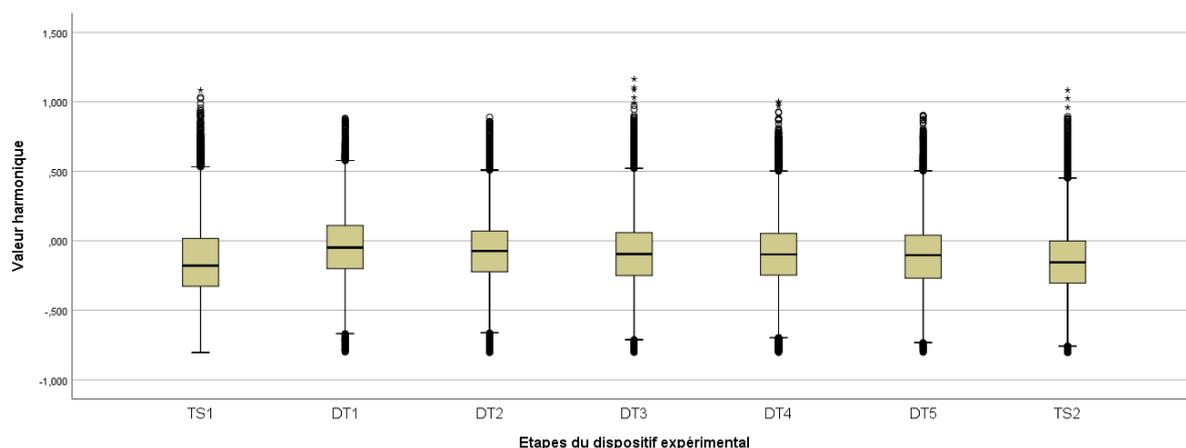


FIGURE 8.10 – Distribution de la fréquence fondamentale en fonction des étapes

Enfin, le sens d’énonciation des litanies se répercute également sur F0 ($U = 2549952213.0$, $p < .001$). L’énonciation envers se traduit par une F0 plus élevée. De plus, grâce à la figure 8.11, nous pouvons observer un effet d’interaction entre les étapes et le sens d’énonciation : il semble que F0 soit plus élevée pour les 6 premières étapes lors de l’énonciation

à rebours tandis que cette différence de F0 entre les sens d'énonciation disparaît lors de la dernière étape.

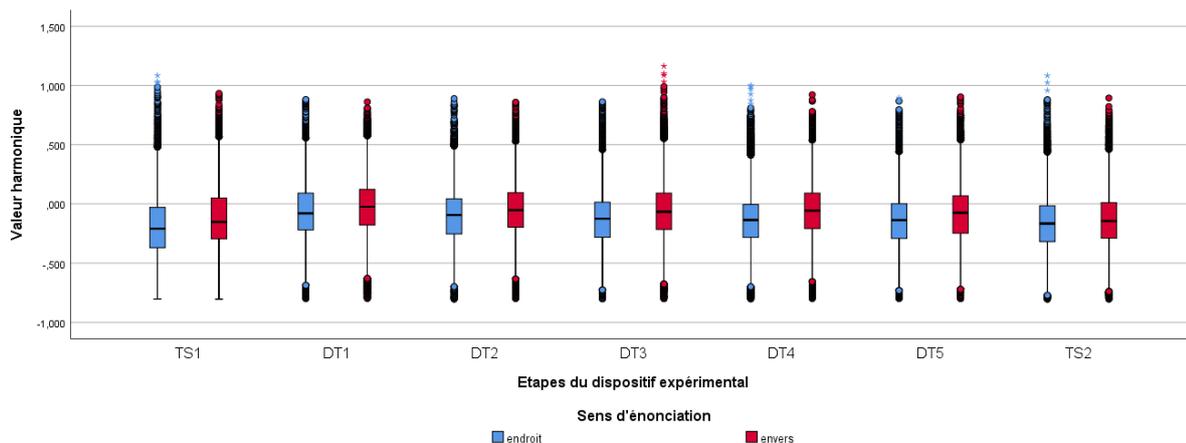


FIGURE 8.11 – Distribution de la F0 en fonction des étapes et du sens d'énonciation

La fréquence fondamentale s'avère être très influencée par les sujets, les étapes, le sens d'énonciation ainsi que par leurs interactions. Notre dispositif expérimental complexe et les nombreuses sources de variation rendent difficile l'interprétation de l'évolution de la fréquence fondamentale à ce stade. Nous y reviendrons plus loin dans la suite de ce travail. Néanmoins, rien qu'en observant l'augmentation de F0 entre les étapes 1 et 2, nous pouvons déjà affirmer que la fréquence fondamentale reflète le stress induit par la charge de travail. Nous interprétons et discutons ce constat dans la suite de ce chapitre.

8.6 Discussion des résultats

A l'issue de ce chapitre rassemblant des résultats globaux, nous sommes déjà en mesure de dresser quelques constats et de les confronter à ceux issus d'autres travaux.

Premièrement, notre manipulation de la difficulté de la tâche de conduite consistant à faire varier la densité du trafic et des piétons a bien eu un effet sur la performance de conduite des sujets : le nombre d'infractions s'accroît sous l'effet de la difficulté. La phase de conduite complexe est donc plus propice à l'émergence du stress induit par la charge de travail. Les sujets ont déclaré, au travers des questionnaires du NASA-TLX, avoir ressenti une charge de travail plus forte dans les phases de conduite modérées et complexe. Néanmoins, contrairement aux résultats de Rubio et al. (2004), le NASA-TLX ne nous permet pas de différencier les phases de conduite. Nous pensons que cela s'explique en partie par la variabilité individuelle : certains sujets, par exemple le sujet 3, ont tout de suite ressenti une charge importante, d'autres très peu tout au long de l'expérience, c'est notamment le cas du sujet 6.

Une forte variabilité individuelle est d'ailleurs présente dans l'ensemble de nos mesures, qu'il s'agisse des scores aux tests attentionnels, des scores aux opérations span ou encore au niveau de la voix. Cette variabilité individuelle ne nous surprend pas, elle est documentée dans d'autres travaux comme ceux de Ruiz et al. (1996) ; Fernandez et Picard (2003) ; Huttunen et al. (2011) ; Giddens et al. (2013) ; Stavaux et al. (2016). Par ailleurs, notre

échantillon, bien qu'occasionnel, se compose d'individus aux profils très divers en terme d'âge et d'expertise. Nous y reviendrons dans le prochain chapitre.

Comme Weaver et al. (2009), nous avons relevé une corrélation forte entre l'âge des sujets et leur temps de réaction au test attentionnel. En revanche, nous ne sommes pas parvenus à répliquer totalement leurs résultats quant à la capacité de prédiction des scores de conduite sur base des temps de réaction au test attentionnel. En fait, la corrélation est forte pour 9 de nos 14 sujets. Plusieurs d'explications sont envisageables : tout d'abord, nos phases de conduite, tout au moins les phases modérées et complexe, étaient sans doute plus demandeuses que celle utilisée par (Weaver et al., 2009). Ensuite, il est probable que certains sujets aient adopté des stratégies compensatoires durant la simulation pour pallier leurs temps de réaction supérieurs : le sujet 2 a mis en œuvre une conduite très défensive, n'hésitant pas à décélérer pour conserver d'amples distances avec les autres véhicules. D'autres, au contraire, ont adopté des comportements plutôt agressifs, impactant négativement leur score de conduite, sachant qu'ils évoluaient dans un environnement virtuel, sans danger réel.

Enfin, au niveau de la voix, les nombreux effets constatés vont dans le même que les études détaillées dans notre cadre conceptuel et sont compatibles avec notre schéma de synthèse, proposé à la figure 3.3, illustrant l'appréciation cognitive subjective des facteurs liés à la tâche et à l'environnement. Ainsi, l'augmentation de la charge de travail, plus précisément de la charge cognitive, liée à l'énonciation à rebours d'une litanie est aussi rapportée par Mendoza et al. (1999). Nous mettons en avant que cette hausse de la charge cognitive se traduit par une élévation de la fréquence fondamentale. Ruiz et al. (1996); Huttunen et al. (2011); Giddens et al. (2013); Yu et al. (2014) rapportent les mêmes tendances. Toutefois, il semble que cet effet disparaisse lors de la dernière étape : nous suggérons que cela s'explique par une diminution de la charge de travail : au cours de cette ultime énonciation, les sujets récitent les litanies en condition isolée, sans tâche de conduite donc, et nous pensons que les itérations à rebours bénéficient progressivement d'un effet apprentissage. Nous tenterons de vérifier cette hypothèse dans la suite de ce travail. Un autre effet robuste de la fréquence fondamentale est son élévation systématique lors de l'étape 2 : il s'agit de la première situation dans laquelle les sujets sont amenés à énoncer les litanies tout en conduisant. Nous pensons que cette double tâche a induit une charge de travail accrue. Signalons toutefois que cette supposition n'est pas étayée par les performances obtenues aux opérations span : bien qu'effectué aussi en condition de double tâche pour la première fois à l'étape 2, les temps de réaction se sont réduits et les taux de réussite se sont pas maintenus.

A ce stade, force est de constater qu'il est indispensable d'adopter un regard centré sur chaque sujet. Outre la fréquence fondamentale, la fluence et les particularités phonétiques des productions orales devraient nous apporter des éléments supplémentaires. C'est précisément ce que nous faisons dans les deux chapitres suivants de ce document.

Chapitre 9

Analyse des profils de conduite

Comme évoqué auparavant, nos sujets disposent de caractéristiques individuelles très variées. Etant donné nos contraintes temporelles et rédactionnelles, nous devons choisir quelques sujets pour effectuer des analyses de cas. Se pose alors la question du choix des individus à étudier. Plutôt que procéder à un tirage aléatoire, nous nous sommes interrogés sur l'existence de profils spécifiques pour guider notre sélection.

Grâce à notre questionnaire de profilage, nous sommes en mesure de les analyser. Cependant, plutôt que de tenter de construire des groupes sur base des déclarations de nos sujets, nous nous sommes appuyés sur leurs performances de conduite pour établir une classification. En effet, ces mesures ont l'avantage d'être plus objectives et sont moins dépendantes de la désirabilité sociale.

9.1 Nouveau regard sur les performances de conduite

Autant le score de conduite construit basé sur le modèle du permis de conduire à points français nous paraît pertinent pour précipiter les infractions routières en un seul score, autant nous pensons que ce score ne reflète pas correctement les comportements de conduite de nos sujets. Ainsi, dans le score de conduite, un excès de vitesse est considéré comme plus ou moins grave selon l'importance du dépassement du seuil autorisé alors qu'il s'agit en fait du même comportement. A l'inverse, une collision avec un piéton est pénalisée de la même façon que le non respect d'un sens interdit, or il s'agit de comportements très différents, le second ne portant pas nécessairement à conséquences. Par ailleurs, nous recensons de nombreuses infractions liées à l'utilisation des indicateurs de changement de file, indicateurs communément appelés "clignotants". Nous pensons que ce type d'infractions peut s'expliquer par la configuration de notre simulateur : ces commandes étaient actionnables par le biais de palettes en lieu et place d'un levier à déplacement vertical.

Partant de ces constats et des travaux de Ibeas et al. (2014), nous avons revu notre évaluation des performances de conduite de nos sujets en établissant une catégorisation davantage axée sur les comportements, elle comprend 9 catégories :

1. manipulation du simulateur ;
2. sortie de route ;
3. respect des règles de priorité aux intersections ;
4. respect de la vitesse autorisée ;

5. circulation sur le côté droit de la chaussée ;
6. respect des feux tricolores et des passages pour piétons ;
7. obstruction à la circulation des autres usagers ;
8. accident avec d'autres usagers ;
9. autres.

La répartition des infractions dans ces 9 catégories est illustrée à la table 9.1.

Catégories	Description de l'infraction
1	Le clignotant droit n'était pas embrayé au basculement.
1	Le clignotant gauche n'était pas embrayé au basculement.
1	Le clignotant droit n'était pas embrayé à l'entrée sur le mouvement circulaire.
1	Le clignotant droit n'était pas embrayé à la sortie du mouvement circulaire.
1	Le clignotant n'était pas embrayé.
1	Direction du virage ne coïncide pas avec le clignotant allumé.
1	Entrée sur la ligne du mouvement sans le signofile gauche allumé.
2	Aller aux fraises sans mettre de clignotant à gauche.
2	Aller aux fraises sans mettre de clignotant à droite.
2	Vous avez passé les limites de la route en chaussée.
2	Franchissement de la ligne continue.
3	La descente du mouvement circulaire est permis seulement à la ligne droite extrême.
3	Infraction de la priorité du passage du carrefour.
4	Excès de limitation de vitesse pour plus de 20 km/h.
4	Excès de limitation de vitesse pour plus de 40 km/h.
4	Excès de limitation de vitesse pour plus de 60 km/h.
5	Descente sur la circulation venant en sens inverse avec la croisée des marquages de la route.
5	Conduite sur la circulation venant en sens inverse.
5	Conduite dans la direction interdite.
6	Vous n'avez pas livré passage au piéton.
6	Brûlage d'un feu rouge.
6	Arrêt sur un passage piéton.
7	Création des obstacles au véhicule chemin faisant.
7	Création des obstacles au véhicule de rencontre.
8	Vous avez un accident.
8	Collision avec un piéton.
9	Lors de l'arrêt on n'a pas mis de clignotant de droite.
9	L'arrêt sur l'autoroute.
9	Violation des règles de l'arrêt.
9	Les règles de l'exécution du retournement sont violées.
9	Lors de l'arrêt on n'a pas mis de clignotant de gauche.

TABLE 9.1 – Catégorisation des comportements en fonction des types d'infraction

Concrètement, nous avons compté le nombre d'occurrences pour chaque catégorie par sujet, toutes phases de conduite confondues. Enfin, en raison de son très faible nombre d'occurrences, nous avons écarté la 9 e catégorie. Nous disposons donc de 8 scores, un pour chaque catégorie, plus ils sont faibles, meilleure est la conduite.

9.2 Profilage des conducteurs

Nous avons transformé chacun des 8 scores obtenus pour chaque sujet en notes centrées réduites : pour ce faire, nous avons, pour chaque score, soustrait sa moyenne de chaque valeur et l'avons rapportée sur son écart-type. Grâce à cette manipulation, nous obtenons des données indépendantes de toute unité ou de toute échelle.

Pour créer nos profils, nous avons entré ces 8 scores centrés réduits comme des variables indépendantes dans une analyse en clusters hiérarchiques. Nous avons choisi la méthode

d'agrégation dite « méthode de Ward » car, selon Beaulieu-Prévost, Ouellette, et Achille (2005), elle semble être la plus adéquate en sciences humaines, elle a en effet tendance à créer des classes relativement égales et présentant une faible variance entre les sujets d'une même classe. Cette méthode d'agrégation a été combinée au carré de la distance euclidienne comme mesure de similarité pour former les groupes puisque cette association présente, toujours selon Beaulieu-Prévost et al. (2005), une bonne performance.

Etant donné la très petite taille de notre échantillon, nous avons retenu 4 classes. Nous les avons représentées graphiquement sous la forme d'un dendrogramme visible à la figure 9.1.

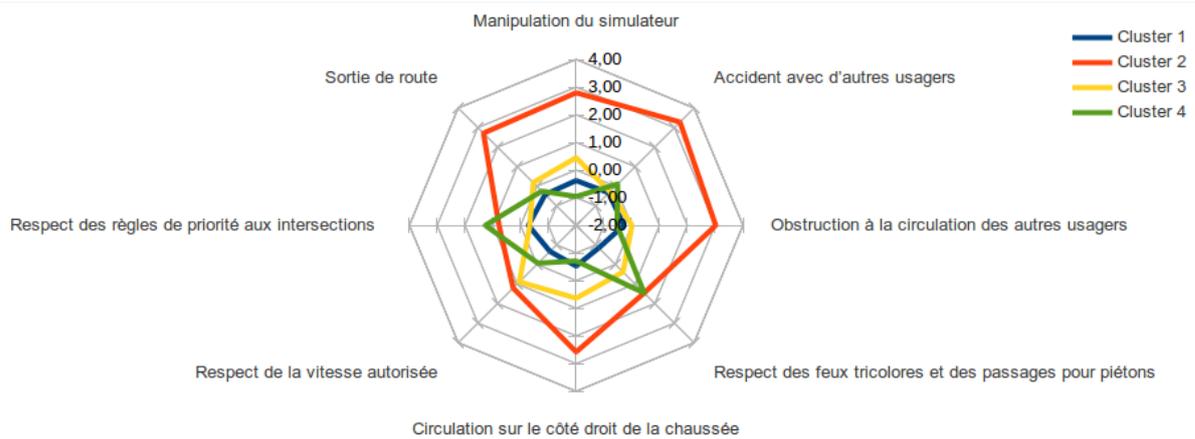


FIGURE 9.1 – Représentation graphique des profils de conducteur

Comme l'illustrent le dendrogramme et la table 9.2, le premier groupe comprend 7 individus qui se caractérisent par des scores compris entre 0 et moins d'un écart-type de la moyenne pour les 8 catégories de comportements. Globalement, il s'agit donc de sujets ayant adopté des comportements de conduite prudents et respectueux du code de la route.

Le deuxième groupe comporte un seul individu : ce cluster apparaît dès la première hiérarchisation : ce sujet se distingue de tous les autres de par 5 scores supérieurs à trois écarts types. Il s'agit en fait d'un conducteur novice qui a effectivement commis de nombreuses infractions de tout type.

Le troisième groupe rassemble 4 individus qui se distinguent par leur score d'excès de vitesse supérieur de près d'un écart-type.

Enfin, le quatrième cluster regroupe 2 individus : ceux-ci obtiennent un score de manipulation du simulateur inférieur de près d'un écart-type, en revanche, leurs scores de respect des feux tricolores et de respect des règles de priorité aux intersections sont supérieurs de plus d'un écart-type.

Clusters	Sujets	Cat. 1	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Cat. 5	Cat. 6	Cat. 7	Cat. 8
Cluster 1	1, 2, 4, 8, 10, 13, 14	-.38	-.42	-.28	-.66	-.53	-.85	-.29	-.34
Cluster 2	3	2.79	2.72	.78	1.21	2.58	1.46	3.02	3.28
Cluster 3	5, 7, 9, 11	.44	0.19	-.33	.89	.63	.38	.01	-.28
Cluster 4	6, 12	-.96	-.25	1.27	-.06	-.71	1.46	-.53	.11

TABLE 9.2 – Catégorisation des comportements en fonction des types d'infraction

9.3 Evaluation des profils

Nous avons mis à l'épreuve la pertinence de notre classification en évaluant sa capacité à correctement reclasser les individus sur base des informations qu'ils nous ont fournies au travers du questionnaire de profilage.

Plus précisément, nous avons extrait plusieurs informations de type métrique afin d'obtenir des variables discriminantes, il s'agit du nombre :

- d'années de détention du permis de conduire ;
- de kilomètres parcourus depuis l'obtention du permis de conduire ;
- de kilomètres parcourus au cours de l'année précédent l'expérience ;
- de kilomètres parcourus au cours d'une journée type ;
- d'amendes reçues depuis l'obtention du permis de conduire.

Nous avons introduit ces variables dans une analyse discriminante, de celle-ci ressortent 3 fonctions discriminantes canoniques dont les caractéristiques sont synthétisées à la table 9.3.

Fonctions	Valeurs propres	% de variance	% cumulé de variance	Corrélation
1	5.000	77.6 %	77.6 %	.913
2	1.395	21.7 %	99.2 %	.763
3	.049	.8 %	100.0 %	.215

TABLE 9.3 – Description des fonctions discriminantes canoniques

Les deux premières fonctions permettent d'expliquer plus de 99 % de la variance. Nous conservons donc ces deux fonctions pour la suite de l'analyse. Il apparaît que la première fonction est corrélée au nombre d'années depuis l'obtention du permis de conduire tandis la seconde est corrélée au nombre de kilomètres parcourus au quotidien. L'ensemble des résultats de cette analyse ainsi que la carte territoriale sont disponibles à l'annexe xxx.

Comme le montre la figure 9.2, les deux premières fonctions discriminantes supportent à 87,5 % notre répartition des sujets dans les clusters établis avec notre analyse hiérarchisée. En effet, seuls deux sujets ne sont pas reclassés dans leur groupe d'origine : un sujet du groupe 1 (symbolisé par le rond bleu le plus haut sur la fonction 2) est plus proche du centroïde du groupe 3 et un sujet du groupe 3 (symbolisé par le rond vert le plus bas sur la fonction 2) est plus proche du centroïde du groupe 1.

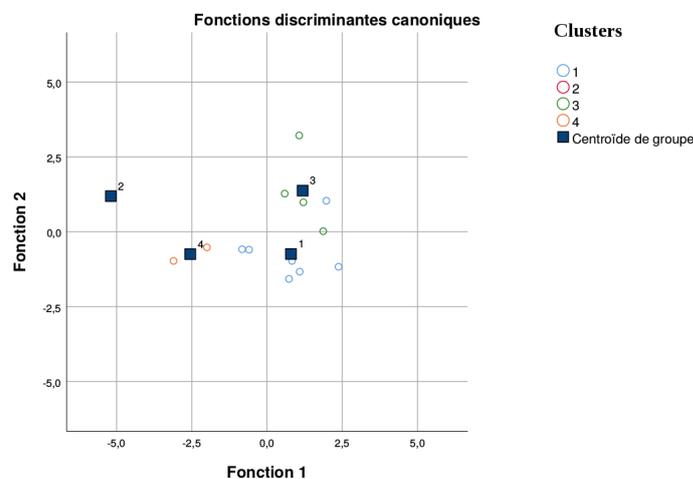


FIGURE 9.2 – Représentation des clusters à l'aide des deux fonctions discriminantes

En conclusion, bien qu'il faille rester très prudent sur les analyses menées dans ce chapitre, nous sommes parvenus à faire émerger 4 profils contrastés de conducteurs. Il semble que le nombre d'années de détention du permis ainsi que le nombre de kilomètres parcourus au quotidien soient des bons prédicteurs de l'appartenance d'un sujet à un profil de conducteur. Nous ne poussons pas plus loin nos investigations de classification car notre objectif est de disposer d'un outil d'aide à la sélection des individus à conserver pour réaliser des études de cas.

Chapitre 10

Analyses individuelles

Nos premières analyses ont montré l'importance de la variabilité individuelle. Grâce à notre catégorisation des profils de conduite, nous sommes en mesure de choisir quelques sujets pour réaliser des études de cas plus approfondies, notamment en ce qui concerne l'analyse des litanies.

Finalement, nous avons retenu 5 sujets : le sujet 1 appartenant au groupe 1, le sujet 3, unique représentant du groupe 2, le sujet 5 issu du groupe 3 et le sujet 6 relevant du groupe 4. En plus de ces 4 individus, nous avons identifié un 5e sujet qui a usé d'une stratégie singulière de régulation lors de l'énonciation des litanies. Il s'agit du sujet 11, il appartient au groupe 3. Ce cinquième sujet nous permettra d'ailleurs de comparer deux individus présentant le même profil de conduite.

Pour chacun de ces 5 individus, nous analysons les performances mesurées à la conduite, aux tests attentionnels et aux opérations span. Nous confrontons ces résultats avec la charge de travail perçue et la fatigue ressentie. Ensuite, en ce qui concerne les litanies, nous recourons à de nouvelles analyses pour objectiver les effets du stress induit par la charge de travail sur la fréquence fondamentale et sur la fluence. Nous complétons cette approche quantitative par une exploration des programmes tracés et par l'intégration d'informations provenant du visionnage des vidéos.

Enfin, nous concluons ce chapitre par une synthèse et une discussion des constats observés.

10.1 Analyse des résultats du sujet 1

10.1.1 Anamnèse du sujet

Le premier sujet était âgé de 46 ans lors de l'expérience qui s'est déroulée le 22/03/2016 de 13h15 à 17h15. Il s'agit d'un conducteur expert qui possède son permis depuis près de 30 ans, il a accumulé plus 350000 km parcourus en voiture et déclare adopter une conduite défensive : au cours de l'année précédent l'expérience, il n'a été impliqué dans aucun accident et n'a reçu aucune amende de roulage. Ses trajets quotidiens ont une longueur moyenne de 20 km et sont essentiellement urbains, cet individu est habitué à évoluer dans un trafic dense. Informaticien, il peut également être considéré comme un expert dans l'interaction avec des environnements virtuels : il joue à divers jeux vidéos depuis plus de 5 ans, totalise plus de 10 heures de pratique sur des jeux de type simulateur automobile et est familier avec la manipulation de périphériques de jeu comme un volant à

retour de force. Ce sujet appartient au groupe 1 de notre profilage, soit celui qui rassemble conducteurs prudents.

10.1.2 Evolution des performances et du ressenti

Au niveau de la conduite, nous observons une légère croissance du nombre d'infractions du code de la route avec la hausse de la densité du trafic. Cet accroissement, illustré à la figure 10.1, s'explique principalement par une augmentation des erreurs de type "clignotant non embrayé lors des changements de direction" et "infraction de la priorité aux intersections". Ces fautes de conduite sont cohérentes : la densité du trafic influe sur le nombre de changement de files. En effet, un nombre plus élevé de véhicules engendre davantage de files et de ralentissements requérant parfois des changements de files subits (manœuvre d'évitement). Les embouteillages dans les carrefours ont entraîné une élévation de la violation des règles de priorité : le sujet a jugé bon de se dégager des intersections engorgées en "forçant" quelque peu le passage. Globalement, ce conducteur a commis peu d'infractions et nous avons observé qu'il a adopté des stratégies défensives pour réduire sa charge de travail : lors de l'énonciation des litanies et de la passation des opérations arithmétiques, il a réduit la vitesse de sa voiture afin d'augmenter la distance le séparant des autres véhicules. Cette stratégie lui a permis de réguler l'effet de la densité du trafic sur sa charge de travail. D'ailleurs, celui-ci déclare, au travers du NASA-TLX (voir figure 10.2), ne pas avoir ressenti une forte variation de la charge de travail : son score global pondéré varie entre 50% (DT2) et 71% (DT4) avec une valeur de 64% pour la phase de conduite complexe (DT3).

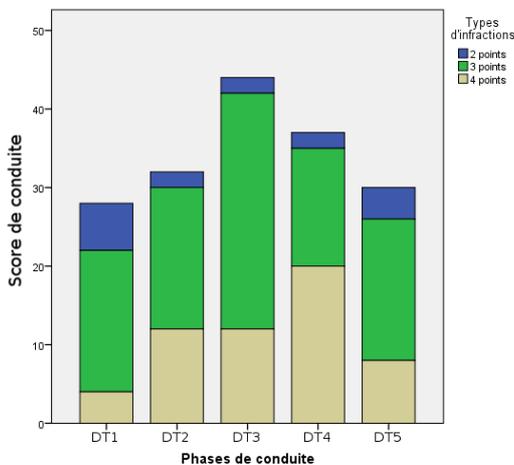


FIGURE 10.1 – Score de conduite

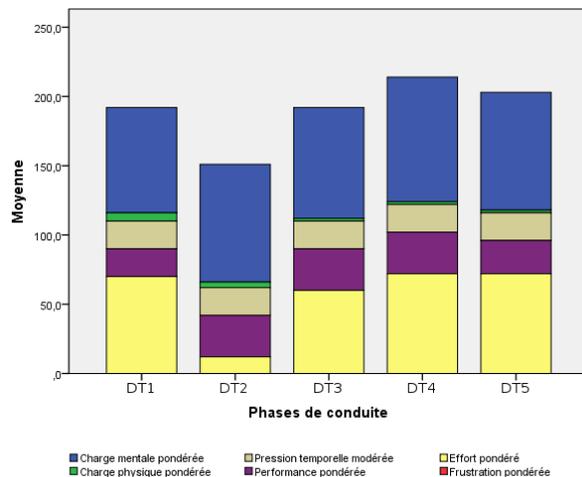


FIGURE 10.2 – Charge de travail

En ce qui concerne la tâche d'operation span, nous remarquons de légères variations au niveau des temps de réaction : ceux-ci ont une médiane comprise entre 5330 ms et 5846 ms selon les étapes de l'expérience (voir figure 10.3). Un test de Kruskal-Wallis rapporte que les différences observées ne sont néanmoins pas significatives ($H(6) = 5.253, p = .512$). Au niveau du taux de réussite aux operations span, représenté dans les diagrammes circulaires sur la figure 10.3, le sujet a correctement répondu à tous les énoncés lorsque la tâche était effectuée seule (TS1, TS2) et lors de la phase de conduite complexe (DT3). Il a passé ou s'est trompé à au moins un calcul dans toutes les autres phases de conduite. Il est intéressant de noter que, dans la phase de conduite complexe, les temps de réaction se sont réduits et la qualité des réponses a été maximale : nous pensons que le sujet, ayant

réduit la quantité de ressources nécessaires à la conduite en adoptant la stratégie décrite au paragraphe précédent, a ainsi optimisé ses performances sur cette tâche de calcul.

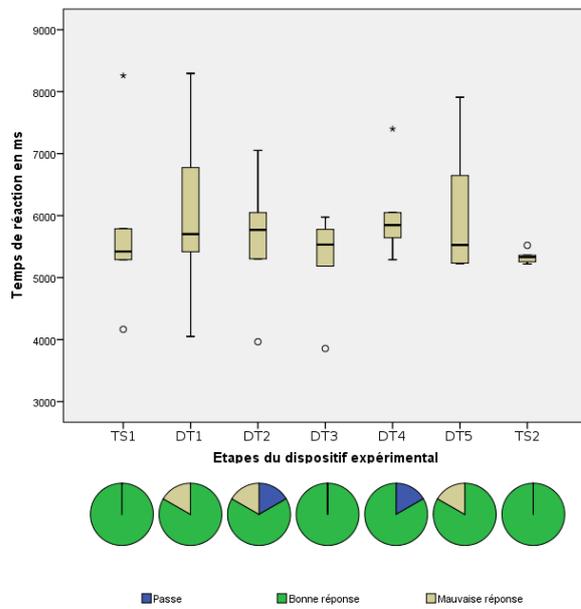


FIGURE 10.3 – Operations span

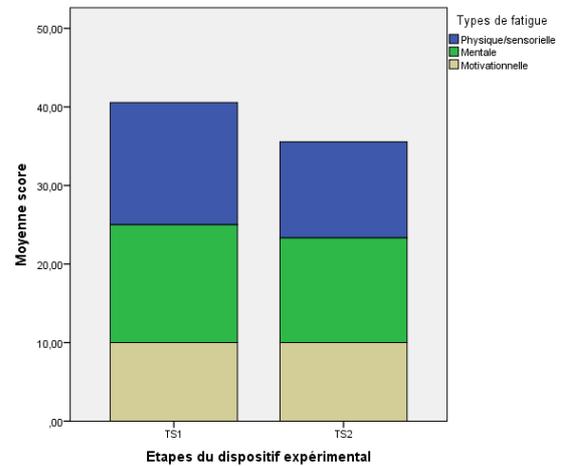


FIGURE 10.4 – Fatigue ressentie

Les résultats aux tests attentionnels pratiqués avant et après les phases de conduite montrent une diminution significative ($U = 32755.0$, $p < .001$) du temps de réaction médian (-90 ms), le taux de réussite restant stable (99%). Cette baisse du temps de réaction démontre que le sujet était plus attentif lors de la deuxième passation. Pourtant, son score d'alerte passe de +57 ms à -20 ms. Pour interpréter ce score, nous avons repris les temps médians par condition (voir table 10.1) : cette apparente diminution de l'efficacité de l'alerte n'en est en fait pas une : les temps de réaction dans les deux conditions (pas d'indice ; double indice) ont fortement baissé et l'inversion du signe du score s'explique par la chute plus forte des temps de réaction de la condition sans indice. Le score d'orientation a pratiquement doublé entre les deux passations, il passe de 55 ms à 103 ms, cette hausse de l'orientation est d'autant plus remarquable que les temps de réaction se sont aussi réduits en condition d'indigage central (contrôle). Enfin, le score du contrôle exécutif s'est quelque peu accru, passant de 104 ms à 128 ms : cette apparente dégradation est à relativiser : les temps de réaction des deux conditions (convergente, divergente) se sont réduits lors de la deuxième passation mais l'augmentation du score du contrôle exécutif s'explique par une plus forte diminution des temps de réaction en condition convergente.

Scores	Conditions	Passation TS1	Passation TS2
Alerte	Pas d'indice	801 ms	698 ms
	Double indice	744 ms	718 ms
	Score	+57 ms	-20 ms
Orientation	Indice central	789 ms	726 ms
	Indice spatial	734 ms	623 ms
	Score	+55 ms	+103 ms
Contrôle exécutif	Divergent	853 ms	796 ms
	Convergent	749 ms	668 ms
	Score	+104 ms	+128 ms

TABLE 10.1 – Evolution des scores attentionnels

Ce sujet déclare se sentir moins fatigué (voir figure 10.4) à la fin de l'expérience : son indice de fatigue global diminue de 2%, sa fatigue physique est moins élevée (-4%), tout comme sa fatigue mentale (-3%) alors que sa motivation reste constante.

En conclusion, nos manipulations de la charge de travail réalisées au travers de la variation de la densité du trafic et des piétons s'est répercutée sur les performances. Le ressenti du sujet ne conforte cependant pas totalement ces constatations. Assez étrangement, ce sujet déclare être moins fatigué à la fin de l'expérience, ce ressenti semble d'ailleurs être confirmé par la baisse de ses temps de réaction au second test attentionnel et par ses performances aux opérations span. Une piste d'explication a été avancée par le sujet lui-même : il a déclaré avoir l'habitude de se coucher tard et éprouver régulièrement un regain d'énergie en fin d'après-midi.

10.1.3 Evolution des paramètres physiologiques

Comme le montre la figure 10.5, nous constatons une diminution significative de la durée séparant deux clignements des yeux ($U=241349.5$, $p<.001$) en condition de double tâche.

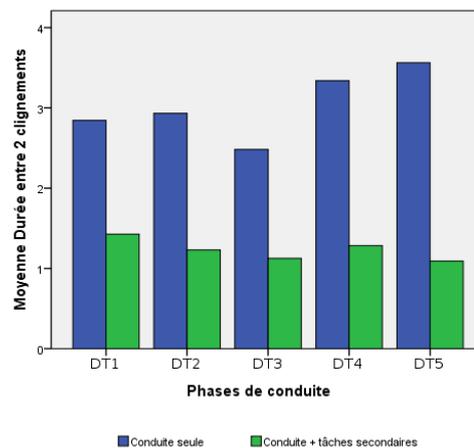


FIGURE 10.5 – Fréquence de nictation

Ces mesures vont clairement dans le même sens que les résultats de Faure et al. (2016) : nous observons aussi une augmentation du taux de nictation en condition de double tâche.

10.1.4 Analyse des litanies

Evolution de la fréquence fondamentale

L'analyse de variance à deux critères croisés appliquée sur la fréquence fondamentale exprimée en valeur harmonique indique la présence d'un effet des étapes, d'un effet du sens d'énonciation et d'un effet d'interaction. Etant donné les non respect des conditions d'application, nous rapportons les résultats des tests non paramétriques.

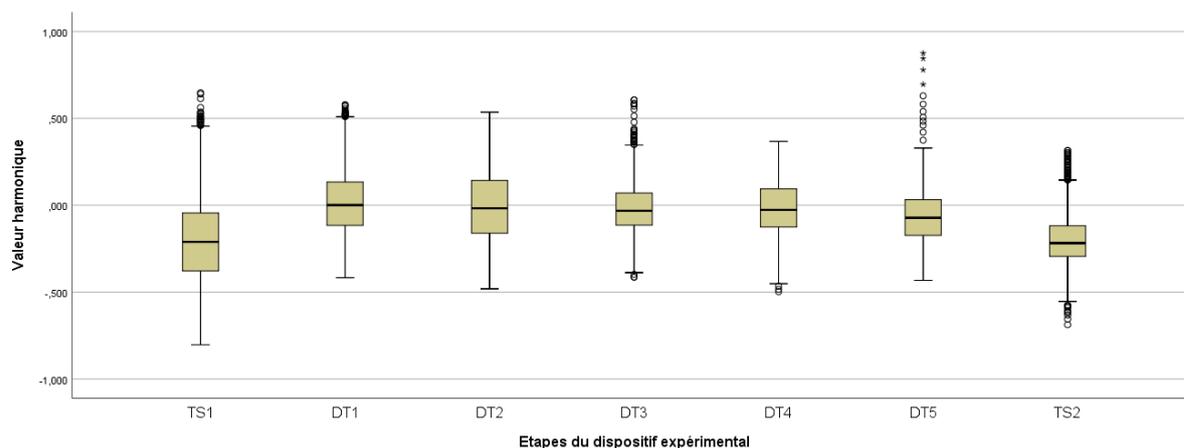


FIGURE 10.6 – Distribution de F0 exprimée en VH par étapes

Un test de Kruskal-Wallis confirme l'effet des étapes ($H(6) = 1953.539$, $p < .001$). La figure 10.6 et des tests de Mann-Whitney, dont les résultats sont synthétisés à la table 10.2, montrent que F0 est la plus élevée lors de l'étape 2 (DT1, $rm = 6866.59$), suivie des étapes 3, 4 et 5 (DT2, $rm = 6470.16$; DT3, $rm = 6403.96$; DT4, $rm = 6418.94$), lesquelles ne présentent pas de différences entre-elles. La fréquence fondamentale est inférieure aux précédentes durant l'étape 6 (DT5, $rm = 5533.57$). Enfin, F0 est statistiquement plus basse aux étapes 1 et 7 (TS1, $rm = 3722.43$; TS2, $rm = 3254.94$) qui ne se différencient pas entre-elles.

DT1	U= 716421.5 p< .001					
DT2	U= 809160.0 p< .001	U= 1348911.0 p< .001				
DT3	U= 713149.0 p< .001	U= 1173586.0 p< .001	U= 1298596.0 p= .138			
DT4	U= 671760.0 p< .001	U= 1103883.0 p< .001	U= 1205263.0 p= .134	U= 1122701.5 p= .614		
DT5	U= 818220.5 p< .001	U= 923312.0 p< .001	U= 1026400.5 p< .001	U= 955309.5 p< .001	U= 873762.5 p< .001	
TS2	U= 1209783.5 p= .150	U= 447556.0 p< .001	U= 539714.5 p< .001	U= 421313.5 p< .001	U= 409847.5 p< .001	U= 552882.5 p< .001
	TS1	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5

TABLE 10.2 – Comparaison de la VH pour les étapes prises 2 à 2

Un test de Mann-Whitney met en avant un effet du sens d'énonciation des litanies ($U = 8774616.5$, $p < .001$) : F0 est plus élevée lors de l'énonciation à rebours (endroit, $rm = 4221.58$; envers, $rm = 6528.36$).

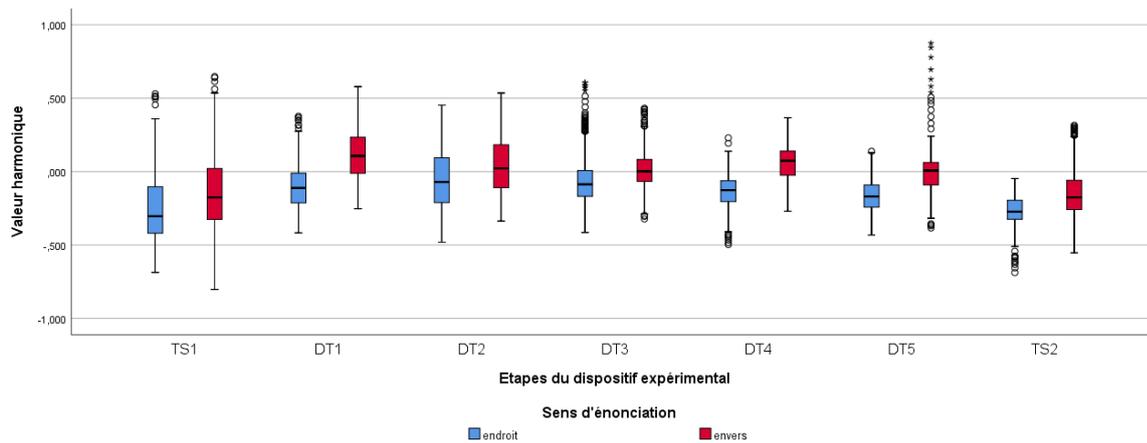


FIGURE 10.7 – Distribution de F0 par sens d'énonciation au sein de chaque étape

Par ailleurs, comme l'illustre la figure 10.7, nous observons que la fréquence fondamentale est systématiquement plus élevée lors de l'énonciation à l'envers de la litanie. Cet effet robuste est confirmé par les comparaisons effectuées au sein de chaque étape avec des tests de Mann-Whitney, les résultats de ces derniers sont reproduits à la table 10.3.

TS1	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	TS2
U= 255520.5	U= 112138.0	U= 257044.0	U= 193603.5	U= 61652.0	U= 89569.0	U= 134502.5
p< .001	p< .001	p< .001	p< .001	p< .001	p< .001	p< .001

TABLE 10.3 – Comparaison de F0 selon le sens d'énonciation au sein des étapes

Nous observons que la fréquence fondamentale est sensible au stress induit par la charge de travail : elle est plus élevée en condition de double tâche et en condition d'énonciation à rebours.

Evolution de la fluence

L'analyse de variance à deux critères croisés appliquée sur l'écart inter-syllabique nous informe de la présence d'un effet des étapes et du sens d'énonciation. Etant donné les non respect des conditions d'application, nous rapportons les résultats des tests non paramétriques.

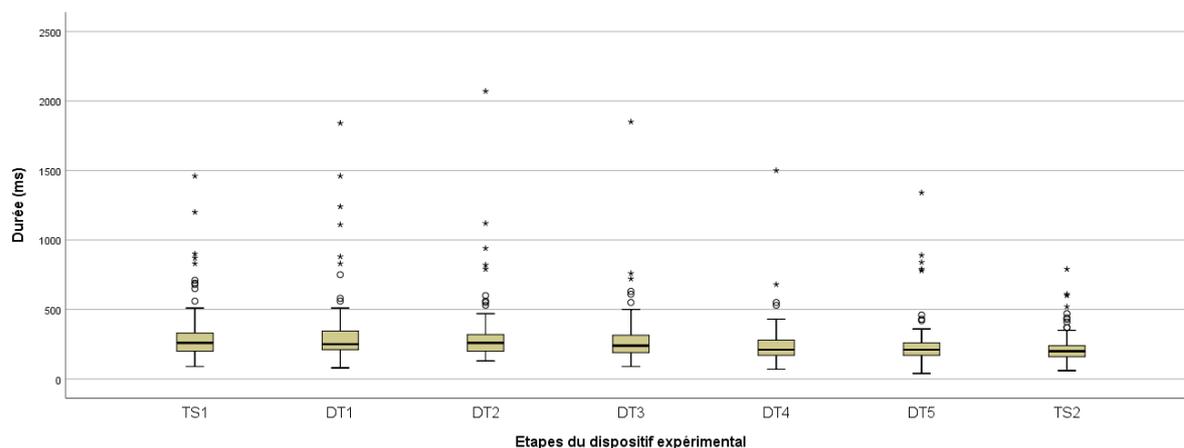


FIGURE 10.8 – Distribution des écarts inter-syllabiques par étapes

Un test de Kruskal-Wallis confirme l'effet des étapes ($H(6) = 33.378$, $p < .001$). La figure 10.8 et des tests de Mann-Whitney, dont les résultats sont synthétisés à la table 10.4, montrent que la fluence de ce sujet s'est progressivement renforcée au fil des étapes : les 4 premières étapes se distinguent des 3 dernières par des écarts inter-syllabiques supérieurs. De plus, des EIS supérieurs à 1500 ms sont observables aux étapes 2, 3 et 4. Ceux s'expliquent, comme l'illustrent les prosogrammes tracés aux figures 10.10 et 10.11, par la présence de pauses plus longues (DT1, max= 1209 ms ; DT2, max= 1441 ms ; DT3, max= 1323 ms).

DT1	U= 2863.5 p= .929					
DT2	U= 2685.5 p= .742	U= 2567.0 p= .606				
DT3	U= 2613.0 p= .253	U= 2492.0 p= .182	U= 2512.5 p= .391			
DT4	U= 2120.0 p= .005	U= 1952.5 p= .001	U= 2036.5 p= .010	U= 2377.0 p= .078		
DT5	U= 2034.5 p= .002	U= 1863.5 p= .001	U= 1932.0 p= .004	U= 2274.5 p= .043	U= 2682.0 p= .724	
TS2	U= 1856.0 p< .001	U= 1667.5 p< .001	U= 1760.0 p= .001	U= 2062.5 p= .007	U= 2459.5 p= .286	U= 2497.0 p= .429
	TS1	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5

TABLE 10.4 – Comparaison des EIS pour les étapes prises 2 à 2

Un test de Mann-Whitney met en avant un effet du sens d'énonciation des litanies ($U = 23913.5$, $p < .001$) : la parole est moins fluente lors de l'énonciation à rebours (endroit, $rm = 221.39$; envers, $rm = 298.93$). Par ailleurs, comme l'illustrent la figure 10.9 et la table 10.5, nous observons des EIS plus longs lors de l'énonciation à rebours aux étapes 1, 2, 3, 6 et 7. En revanche, les différences de fluence en fonction du sens d'énonciation s'expliquent par le hasard aux étapes 4 et 5. Nous constatons aussi sur la figure 10.9 que la variabilité de l'EIS semble être plus importante en condition d'énonciation à l'envers. Au niveau des pauses (voir figures 10.10 et 10.11), l'étape se 4 différencie des autres : c'est la seule qui comporte une pause dont la durée maximale est supérieure en condition d'énonciation endroit (endroit, $\max^1 = 1323$ ms ; envers, $\max = 405$ ms).

1. Durée de la plus longue pause

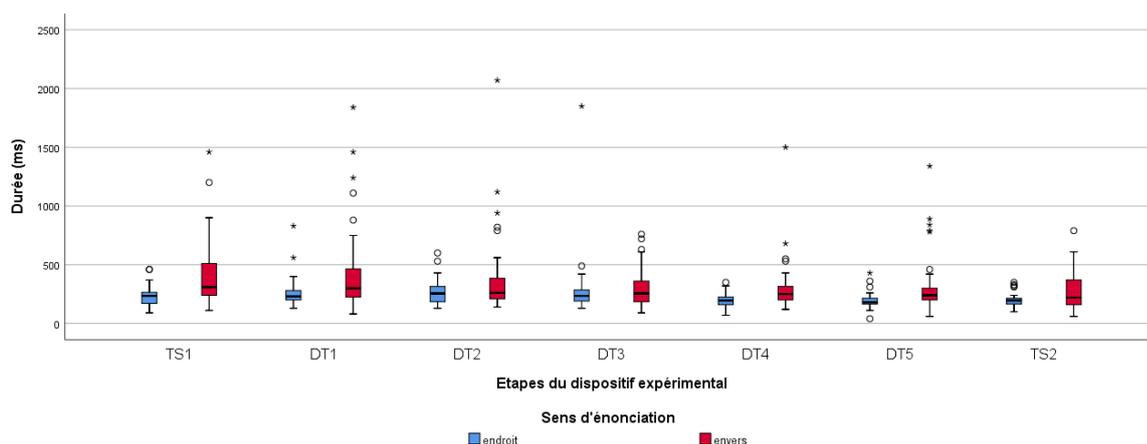


FIGURE 10.9 – Distribution des EIS par sens d’énonciation au sein de chaque étape

TS1	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	TS2
U= 400.5	U= 112138.0	U= 449.5	U= 551.5	U= 643.5	U= 403.5	U= 380.0
p= .001	p< .001	p= .007	p= .277	p= .426	p= .002	p= .001

TABLE 10.5 – Comparaison des EIS selon le sens d’énonciation au sein des étapes

L’effet de l’augmentation de charge de travail et du stress ainsi induit se traduit aussi sur la fluence, celle-ci se détériore lors de l’énonciation à rebours des litanies. Toutefois, la répétition de la tâche semble avoir entraîné une réduction du stress induit par la charge de travail : la fluence s’améliore lors des dernières étapes. La durée de certaines pauses pourrait être révélatrice d’événements critiques.

Exploration qualitative des prosogrammes

Nos prosogrammes, reproduits aux figures 10.10 et 10.11, sont riches d’informations.

Au niveau de la voix, un premier constat à tirer est que, hormis pour la litanie endroit de l’étape 4 et pour la litanie rebours de l’étape 6, la variabilité de la fréquence fondamentale s’est progressivement réduite au fur et à mesure de l’avancement de l’expérience. Nous pouvons par exemple remarquer que les envolées de F0 sur les /ã/ de /dimãʃ/ et sur les /i/ des jours de la semaine s’amoindrissent sur les dernières litanies.

Nous observons, sur toutes les litanies à rebours, un dévoisement systématique du /i/ de /lœdi/, cela s’explique par le fait que ce sujet terminait ses litanies à rebours en soufflant longuement. De nombreux dévoisements sont constatés, notamment sur les /ʒ/. Enfin, de fortes variations de F0 au sein d’un même phonème sont notables dans la quatrième litanie endroit.

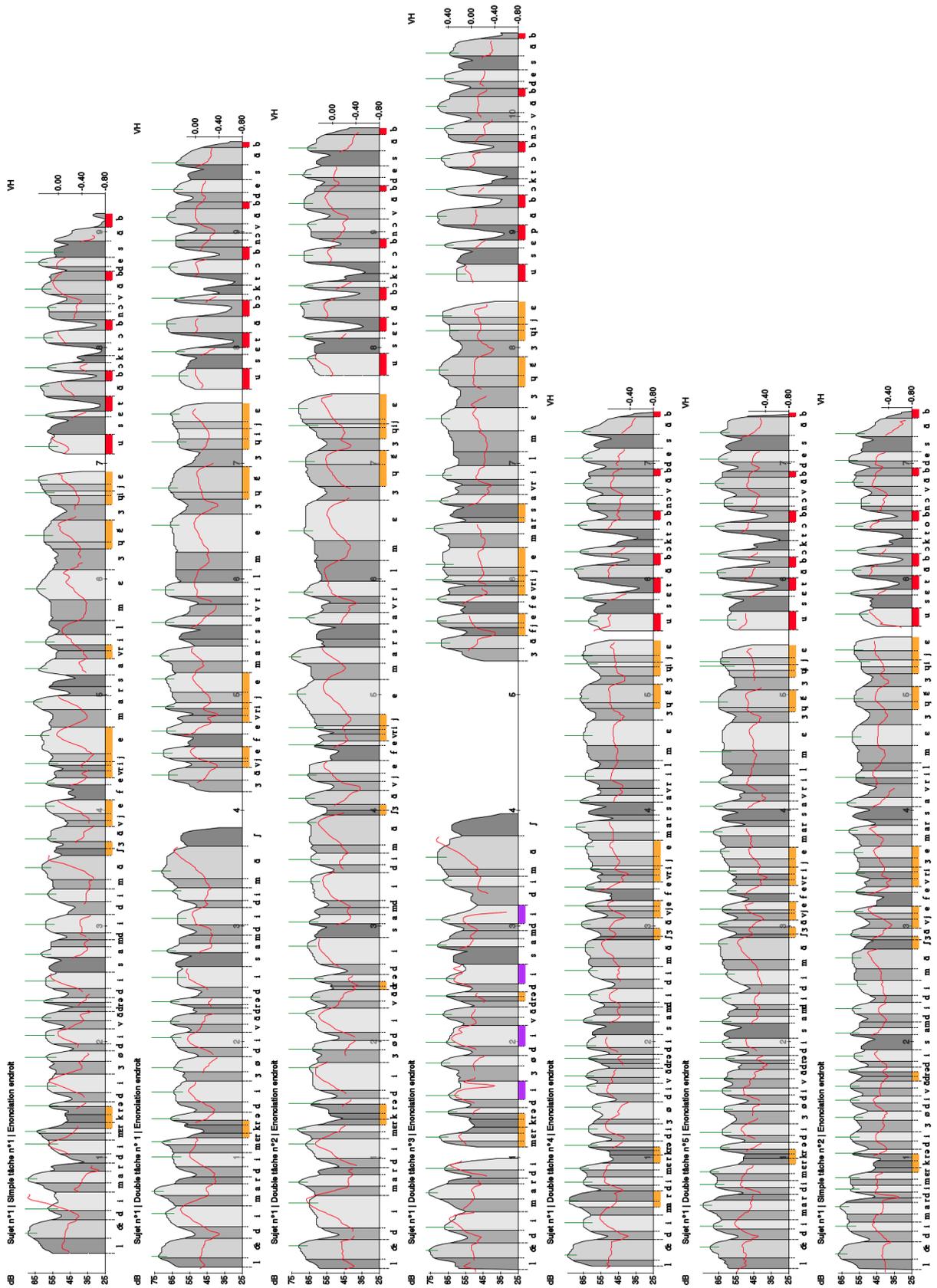


FIGURE 10.10 – Prosogrammes des litanies énoncées à l’endroit

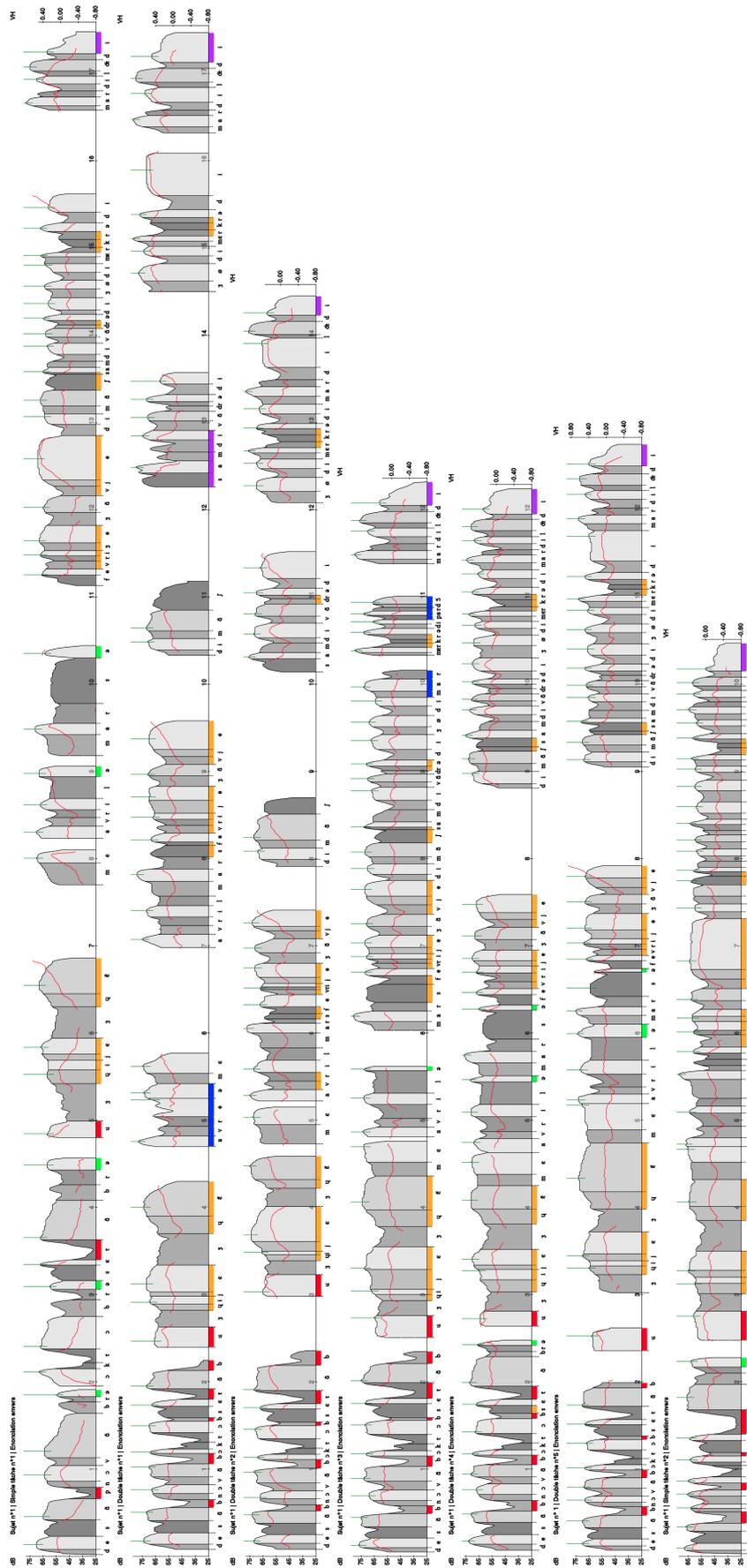


FIGURE 10.11 – Prosogrammes des litanies énoncées à l’envers

Au niveau de la parole, de nombreuses remarques peuvent aussi être formulées. Tout d'abord, la durée totale des litanies évolue différemment selon le sens d'énonciation : à l'endroit, elle augmente jusqu'à l'étape 4 pour ensuite se stabiliser tandis qu'elle se réduit progressivement dans les énonciations à rebours. La litanie endroit la plus longue est celle de l'étape 4, elle est particulière de par la présence d'une longue pause entre /dimãf/ et /ʒãvje/ : le visionnage de la vidéo capturée par le simulateur laisse penser que celle-ci s'explique par l'attention que le sujet a porté au véhicule le dépassant à vive allure à ce moment précis.

Comme nous l'avons vu, la fluence est plus faible lorsque les litanies sont énoncées à l'envers. De manière générale, les litanies à rebours se caractérisent par des pauses plus nombreuses et plus longues (10 pauses d'une durée moyenne de 267 ms pour l'ensemble des litanies endroits ; 31 pauses d'une durée moyenne de 507 ms pour l'ensemble des litanies à rebours). En outre, des phénomènes d'allongement vocalique sont présents, notamment sur les /i/ de jours de la semaine et sur certains /e/ de /ʒãvje/ ou /ẽ/ de /ʒɸẽ/. Enfin, ce sujet ajoute des /ə/ à la fin de certains mots comme /avril/.

Ce sujet se singularise par de nombreuses syncope : ainsi, les occlusives non voisées /p/ de /septãbr/ et /t/ de /ut/ ne sont jamais réalisées. Les /r/ en position finale dans le mot font souvent l'objet d'une syncope.

Au niveau langagier, ce sujet a commis deux erreurs de production : toutes deux sont des inversions apparues lors des énonciations à rebours : la première a eu lieu entre /mɛ/ et /avril/ à l'étape 2, la seconde entre /mɛrkrãdi/ et /mardi/ à l'étape 4. Le sujet les a corrigées et s'est excusé pour la deuxième erreur en ajoutant le mot /pardõ/.

Ces prosogrammes offrent des informations précieuses pour étoffer les constats mis en avant précédemment : outre des valeurs plus basses en fin d'expérience, sa variabilité semble aussi se réduire. En outre, au cours de la phase de conduite la plus complexe, des perturbations de F0 sont notables au sein même de certains phonèmes. Nous relevons aussi un dévoisement systématique sur la dernière voyelle des litanies énoncées à l'envers. Les différences de fluence observées en fonction du sens du récit des litanies s'explique une recrudescence des pauses caractérisées par des durées supérieures et ainsi que par des phénomènes d'allongement vocalique et d'ajout de phonèmes. La pause singulière survenue lors du récit de la litanie à l'endroit durant la phase de conduite complexe est, selon nous, porteuse d'informations : le sujet a été amené à réorienter son attention sur un fait de roulage. Nous pensons que cette pause constitue un événement critique susceptible de révéler un pic de stress induit par la charge de travail. Enfin, c'est également au cours de cette phase de conduite que le sujet a commis une de ses deux erreurs de production.

10.2 Analyse des résultats du sujet 3

10.2.1 Anamnèse du sujet

Le troisième sujet était âgé de 27 ans lors de l'expérience qui s'est déroulée le 25/03/2016 de 13h00 à 17h15. Il s'agit d'un conducteur novice qui ne possédait pas encore son permis de conduire définitif, il a parcouru seulement 1000 km depuis qu'il conduit seul en voiture et déclare adopter une conduite défensive : il a été impliqué dans un accident mais n'a

jamais reçu d'amende de roulage. Ses trajets quotidiens ont une longueur moyenne de 50 km et sont autoroutiers pour moitié, routiers pour un quart et urbains pour le quart restant. Cet individu évolue essentiellement dans un trafic peu chargé. Pédagogue universitaire, il peut également être considéré comme un novice dans la manipulation des environnements virtuels : bien qu'il ait déjà essayé divers jeux vidéo depuis plus de 5 ans, il ne joue pratiquement jamais, totalise moins de 5 heures de pratique sur des jeux de type simulateur automobile et n'est pas familier avec l'utilisation de périphériques de jeu comme un volant à retour de force. Ce sujet est le seul représentant du groupe 2 de notre profilage des conducteurs.

10.2.2 Evolution des performances

Au niveau de la conduite, nous observons une forte augmentation du nombre d'infractions du code de la route dans les phases de conduite 2 et 4 (DT2, DT4). Curieusement, il cumule moins de fautes de conduite lors de la phase caractérisée par la densité de trafic la plus élevée (DT3). Cet accroissement, illustré à la figure 10.12, s'explique principalement par une augmentation des erreurs de type "accidents" (DT2= 4 ; DT3= 2 ; DT4= 4), "refus de céder le passage à un piéton"(DT2= 1 ; DT3= 2 ; DT4= 2) ainsi que diverses infractions comme "circulation sur la voie inverse" et "circulation en sens interdit". Nous avons identifié plusieurs situations critiques au cours desquelles le stress induit par la charge de travail était manifeste : dans l'une d'entre elle, le sujet s'est même trompé d'itinéraire et à provoqué un accident en tentant de faire demi-tour.

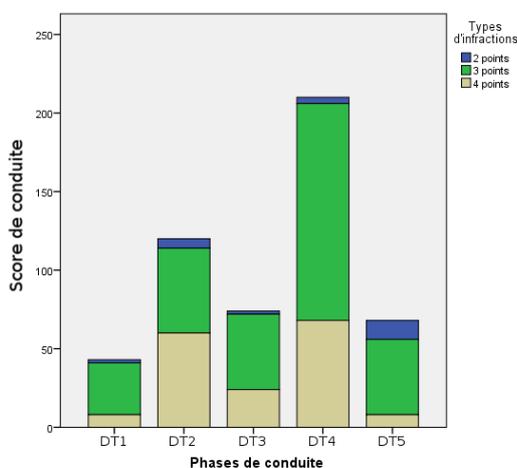


FIGURE 10.12 – Score de conduite

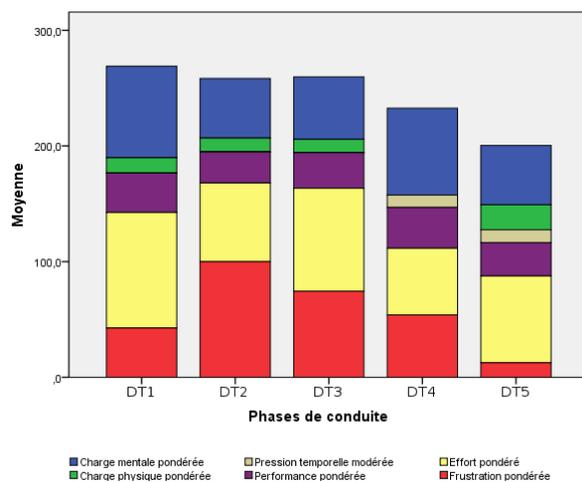


FIGURE 10.13 – Charge de travail

Globalement, ce conducteur a commis beaucoup d'infractions, ses trajets ont été émaillés de nombreux incidents techniques tels que le calage du moteur ou une mauvaise sélection des rapports de transmission, nous avons observé qu'il a adopté des stratégies susceptibles d'augmenter sa charge de travail : lors de l'exécution des tâches de production verbale, il a conservé, voire accru, la vitesse de sa voiture et a procédé à de nombreux dépassements ainsi qu'à plusieurs excès de vitesse. La faible distance le séparant des autres véhicules a contribué à l'avènement de deux accidents sur l'autoroute durant les opérations span, lesquels ont dû être brièvement interrompus. D'ailleurs, celui-ci déclare, au travers du NASA-TLX (voir figure 10.13, avoir ressenti une forte charge de travail : son score global pondéré varie entre 89% (DT1) et 66% (DT5) avec une valeur de 86% pour la

phase de conduite complexe (DT3). La charge de travail ressentie décroît progressivement, ce qui pourrait s'expliquer par une habitude au simulateur.

En ce qui concerne la tâche d'operation span, nous remarquons de fortes variations au niveau des temps de réaction : ceux-ci ont une médiane comprise entre 5595 ms et 12595 ms selon les étapes de l'expérience (voir figure 10.14). Les différences observées sont significatives ($H(6) = 13.970$, $p = .030$). Les temps de réaction de l'étape 1 sont significativement plus longs que ceux des étapes 3 ($U = 1.0$, $p = .006$), 4 ($U = .0$, $p = .006$), 6 ($U = .0$, $p = .006$) et 7 ($U = 1.0$, $p = .006$). Nous avons observé que cet individu a consacré davantage d'attention à la résolution des calculs qu'à la conduite, ce qui a d'ailleurs entraîné 2 accidents. Au niveau du taux de réussite (voir figure 10.14), le sujet a correctement répondu à tous les énoncés aux deux dernières étapes (DT5, TS2). C'est lors de la phase de conduite complexe (DT3) qu'il enregistre sa seule mauvaise réponse. Il a passé trois énoncés lors de 4e phase de conduite (DT4). Il est intéressant de noter que les temps de réaction sont moindres dans les étapes de double tâche que lors de la première étape (TS1). Nous postulons que ce sujet a fait le choix de traiter l'operation span le plus rapidement possible afin de limiter la durée des tâches secondaires et ainsi réduire sa charge de travail au plus vite. Nous pouvons également imaginer que les temps de réaction supérieurs à la première étape trouvent une explication par un effet de nouveauté qui aurait pénalisé les performances. Enfin, nous constatons à nouveau une amélioration progressive de la qualité des réponses au fur et à mesure du déroulement de l'expérience.

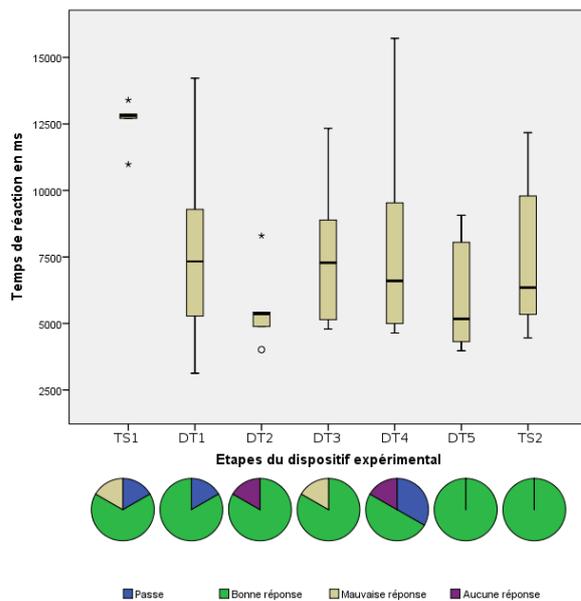


FIGURE 10.14 – Operations span

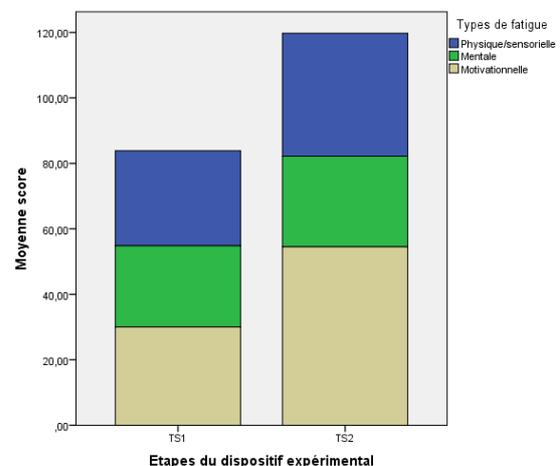


FIGURE 10.15 – Fatigue ressentie

Les résultats aux tests attentionnels pratiqués avant et après les phases de conduite montrent une diminution significative ($U = 27100.0$, $p < .001$) du temps de réaction médian (-134 ms), le taux de réussite diminuant un peu (de 98% à 97%). Pour interpréter l'évolution des scores d'alerte, d'orientation et du contrôle exécutif, nous avons synthétisé les temps moyens par condition à la table 10.6. Il apparaît que l'amélioration du score d'alerte est d'autant plus forte que les temps de réaction en condition de non indicage ont aussi progressé. L'amélioration remarquable du score d'orientation s'explique par une réduction de 239 ms en condition d'indicage spatial. Enfin, l'augmentation du score du contrôle exécutif, traduisant une apparente dégradation des performances, est à nouveau à relativiser : elle s'explique par une forte réduction du temps médian de réaction en

condition convergente (-185 ms).

Scores	Conditions	Passation TS1	Passation TS2
Alerte	Pas d'indice	768 ms	705 ms
	Double indice	726 ms	629 ms
	Score	+42 ms	+76 ms
Orientation	Indice central	778 ms	591 ms
	Indice spatial	821 ms	582 ms
	Score	-43 ms	+9 ms
Contrôle exécutif	Divergent	855 ms	738 ms
	Convergent	790 ms	605 ms
	Score	+65 ms	+133 ms

TABLE 10.6 – Evolution des scores attentionnels

Le sujet déclare se sentir plus fatigué à la fin de l'expérience (voir figure 10.15) : son indice de fatigue global augmente de 9%, sa fatigue physique est plus élevée (+9%), tout comme sa fatigue mentale (+3%) alors que sa motivation décroît (-25%).

Le faible niveau d'expertise en conduite de cet individu a clairement altéré les effets du niveau de difficulté défini a priori. En effet, la charge de travail ressentie par le sujet a souvent été très forte, induisant du stress à plusieurs moments, indépendamment de la densité du trafic et des piétons. Les performances aux tests attentionnels nous amènent à suggérer une plus forte concentration du sujet à la fin de l'expérience. Cette augmentation de l'implication du sujet explique vraisemblablement son sentiment de fatigue et de baisse de motivation à la fin de l'expérience. Enfin, nous avons constaté que ce sujet a testé plusieurs stratégies pour limiter sa charge de travail.

10.2.3 Analyse des litanies

Evolution de la fréquence fondamentale

L'analyse de variance à deux critères croisés appliquée sur la fréquence fondamentale exprimée en valeur harmonique indique la présence d'un effet des étapes, du sens d'énonciation et d'un effet d'interaction. Etant donné les non respect des conditions d'application, nous rapportons les résultats des tests non paramétriques.

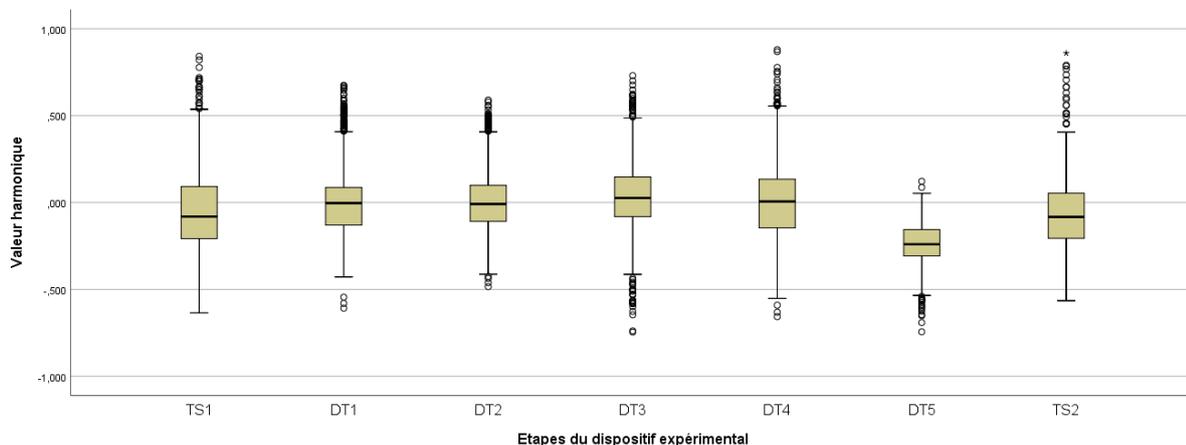


FIGURE 10.16 – Distribution de F0 exprimée en VH par étapes

Un test de Kruskal-Wallis confirme l'effet des étapes ($H(6) = 1914.081, p < .001$). La figure 10.16 et des tests de Mann-Whitney, dont les résultats sont synthétisés à la table 10.7, montrent que F0 est significativement la plus élevée à l'étape 4, soit durant la phase de conduite la plus complexe (DT3, $rm = 5904.13$). Les valeurs de la fréquence fondamentale, semblables entre les étapes 2, 3 et 5 (DT1, $rm = 5459.68$; DT2, $rm = 5440.28$; DT4 = 5362.15), sont supérieures à celles des étapes 1, 6 et 7 (TS1, $rm = 4537.54$; DT5, $rm = 1969.25$; TS2, $rm = 4454.43$). De façon surprenante, la fréquence fondamentale est significativement plus basse durant la dernière phase de conduite (DT5) qu'au cours des étapes 1 et 7, ces dernières ne présentant pas de différences de F0 entre elles.

DT1	U = 754801.5 p < .001					
DT2	U = 673939.5 p < .001	U = 900853.5 p = .982				
DT3	U = 676533.5 p < .001	U = 898805.0 p < .001	U = 799646.0 p < .001			
DT4	U = 816123.0 p < .001	U = 1059287.0 p = .869	U = 943121.5 p = .978	U = 955370.0 p < .001		
DT5	U = 427592.0 p < .001	U = 215305.5 p < .001	U = 206662.5 p < .001	U = 185639.5 p < .001	U = 323345.0 p < .001	
TS2	U = 797303.0 p = .577	U = 685572.5 p < .001	U = 612434.5 p < .001	U = 610026.0 p < .001	U = 747228.0 p < .001	U = 390490.5 p < .001
	TS1	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5

TABLE 10.7 – Comparaison de la VH pour les étapes prises 2 à 2

Un test de Mann-Whitney confirme que le sens d'énonciation des litanies a un effet sur la fréquence fondamentale ($U = 7087223.5, p < .001$) : F0 est plus élevée en condition d'énonciation à rebours (envers, $rm = 3801.30$; endroit, $rm = 5548.13$).

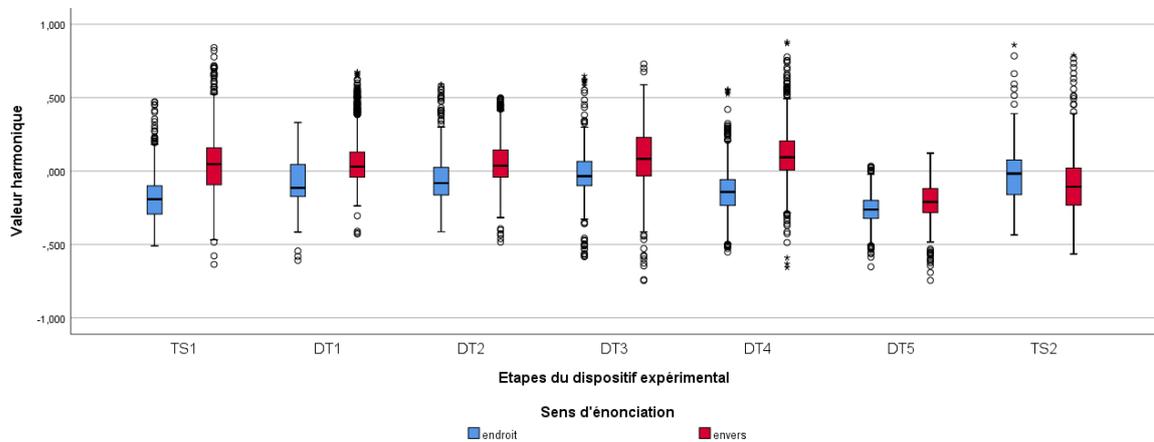


FIGURE 10.17 – Distribution de F0 par sens d'énonciation au sein de chaque étape

Par ailleurs, comme l'illustrent la figure 10.17 et la table 10.3, nous observons que la fréquence fondamentale est systématiquement plus élevée lors de l'énonciation à l'envers de la litanie durant les 6 premières étapes. Curieusement, c'est le cas inverse pour la dernière étape : F0 est plus élevée lors de l'énonciation endroit. Cette situation indique probablement un effet d'interaction entre les étapes et le sens d'énonciation des litanies.

TS1	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	TS2
U = 255520.5 p < .001	U = 79878.0 p < .001	U = 137099.0 p < .001	U = 110814.0 p < .001	U = 157553.5 p < .001	U = 80781.5 p < .001	U = 167506.0 p < .001

TABLE 10.8 – Comparaison de F0 selon le sens d'énonciation au sein des étapes

Nous relevons à nouveau de fortes variations de la fréquence fondamentale, elle paraît bien refléter le stress induit par la charge de travail générée lors des différentes étapes du dispositif expérimental. Un effet du sens d'énonciation des litanies est aussi présent : l'énonciation à l'envers se traduit par une F0 plus élevée, hormis à la dernière étape où elle est très élevée durant l'énonciation à l'endroit.

Evolution la fluence

L'analyse de variance à deux critères croisés appliquée sur l'écart inter-syllabique nous informe de la présence d'un effet du sens d'énonciation. Etant donné le non respect des conditions d'application, nous rapportons les résultats des tests non paramétriques.

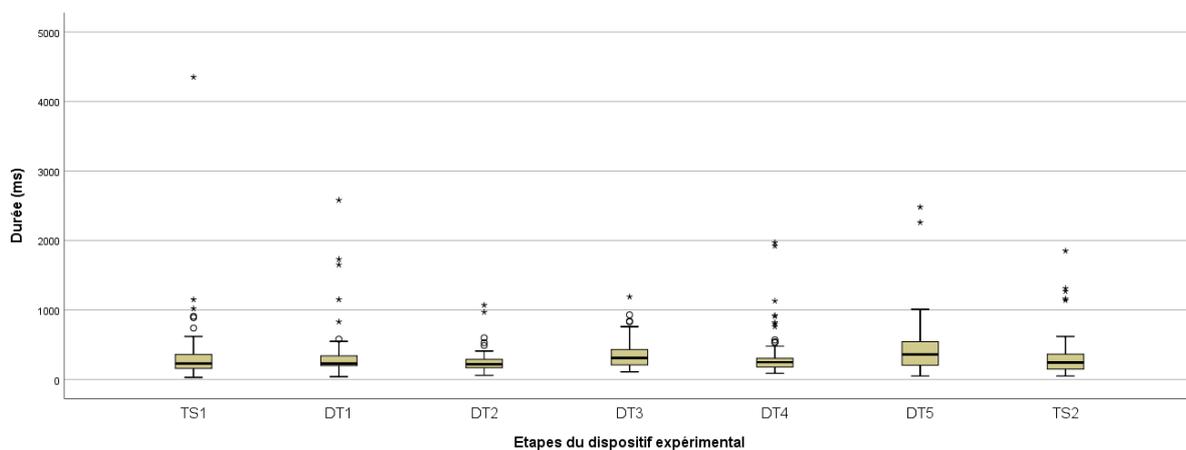


FIGURE 10.18 – Distribution des écarts inter-syllabiques par étapes

Contrairement à l'analyse de variance à 2 critères croisés, le test de Kruskal-Wallis met en avant l'effet des étapes ($H(6) = 28.693$, $p < .001$). La figure 10.18 et des tests de Mann-Whitney, dont les résultats sont synthétisés à la table 10.9, montrent que la fluence de ce sujet ne diffère pas entre les étapes 1, 2, 3, 5 et 7 (TS1, $rm = 236.01$; DT1, $rm = 250.28$; DT2, $rm = 213.05$; DT4, $rm = 247.61$; TS2, $rm = 236.24$). Par contre, les EIS sont significativement plus longs lors des étapes 4 et 6 (DT3, $rm = 304.55$; DT5, $rm = 315.78$). Certaines valeurs extrêmes d'EIS s'expliquent par la présence de pauses très longues : 4218 ms lors de l'étape 1, 2141 ms à l'étape 2, 1786 ms à l'étape 5, 2273 ms à l'étape 6.

DT1	U= 2526.0 p= .497					
DT2	U= 2543.0 p= .454	U= 2276.5 p= .100				
DT3	U= 2028.0 p= .006	U= 2081.0 p= .016	U= 1690.5 p< .001			
DT4	U= 2619.0 p= .553	U= 2692.5 p= .863	U= 2412.5 p= .168	U= 2103.0 p= .011		
DT5	U= 1917.5 p= .003	U= 1939.5 p= .006	U= 1621.5 p< .001	U= 2402.5 p= .306	U= 2032.0 p= .010	
TS2	U= 2662.0 p= .994	U= 2491.0 p= .588	U= 2447.0 p= .395	U= 1970.0 p= .007	U= 2575.0 p= .628	U= 1802.5 p= .002
	TS1	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5

TABLE 10.9 – Comparaison des EIS pour les étapes prises 2 à 2

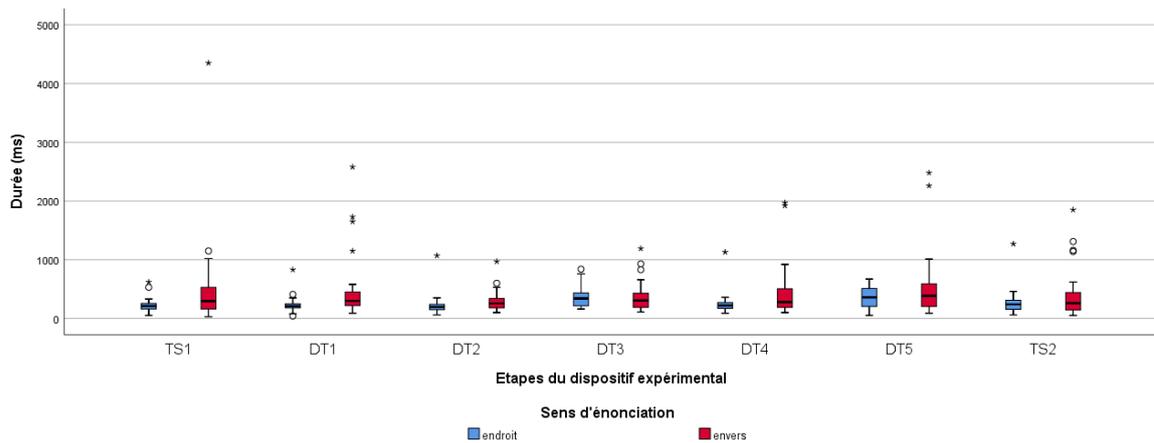


FIGURE 10.19 – Distribution des EIS par sens d'énonciation au sein de chaque étape

Un test de Mann-Whitney met en avant un effet du sens d'énonciation des litanies ($U=26229.0$, $p < .001$) : la parole est moins fluente lors de l'énonciation à rebours (endroit, $rm=230.58$; envers, $rm=283.39$). Par ailleurs, comme l'illustrent la figure 10.19 et la table 10.10, nous observons que cette différence n'est significative qu'aux étapes 1, 2, 3 et 5. Les pauses les longues se sont produites durant les énonciations à rebours.

TS1	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	TS2
$U=499.5$	$U=388.5$	$U=454.0$	$U=627.5$	$U=460.0$	$U=588.0$	$U=570.5$
$p=.046$	$p=.002$	$p=.013$	$p=.541$	$p=.010$	$p=.499$	$p=.382$

TABLE 10.10 – Comparaison des EIS selon le sens d'énonciation au sein des étapes

Le stress induit par la charge de travail impacte les écarts inter-syllabiques : de très longues pauses suggèrent l'apparition d'événements critiques. Les différences entre les étapes et le sens d'énonciation sont à nouveau significatives. Toutefois, nous sommes surpris par deux constats : la fluence se dégrade lors de la dernière phase de conduite alors que c'est durant cette dernière que la fréquence fondamentale est la plus basse, l'effet du sens d'énonciation des litanies disparaît progressivement avec l'avancement des étapes.

Exploration visuelle des litanies

Grâce aux prosogrammes, reproduits aux figures 10.20 et 10.21, nous pouvons affiner certaines observations et tenter d'y apporter quelques explications.

Au niveau de la voix, nous observons des variations de F_0 plus ou moins fortes selon les étapes : celles-ci sont faibles lors du récit des litanies dans les deux sens à l'étape 6, qui se caractérise par ailleurs par la F_0 la plus basse et par un EIS plus grand. De manière générale, en énonciation endroit, c'est lors de la production du / \tilde{a} / de / $dim\tilde{a}$ / que les élévations subites de F_0 sont notables (étapes 1,3, 4, 5, 7). Cette envolée de F_0 sur ce phonème n'est pas observable lors de l'énonciation envers : nous pensons que cela s'explique en grande partie par la position du phonème : en énonciation endroit, il s'agit du dernier phonème voisé avant une pause, ce qui n'est pas le cas dans l'énonciation envers.

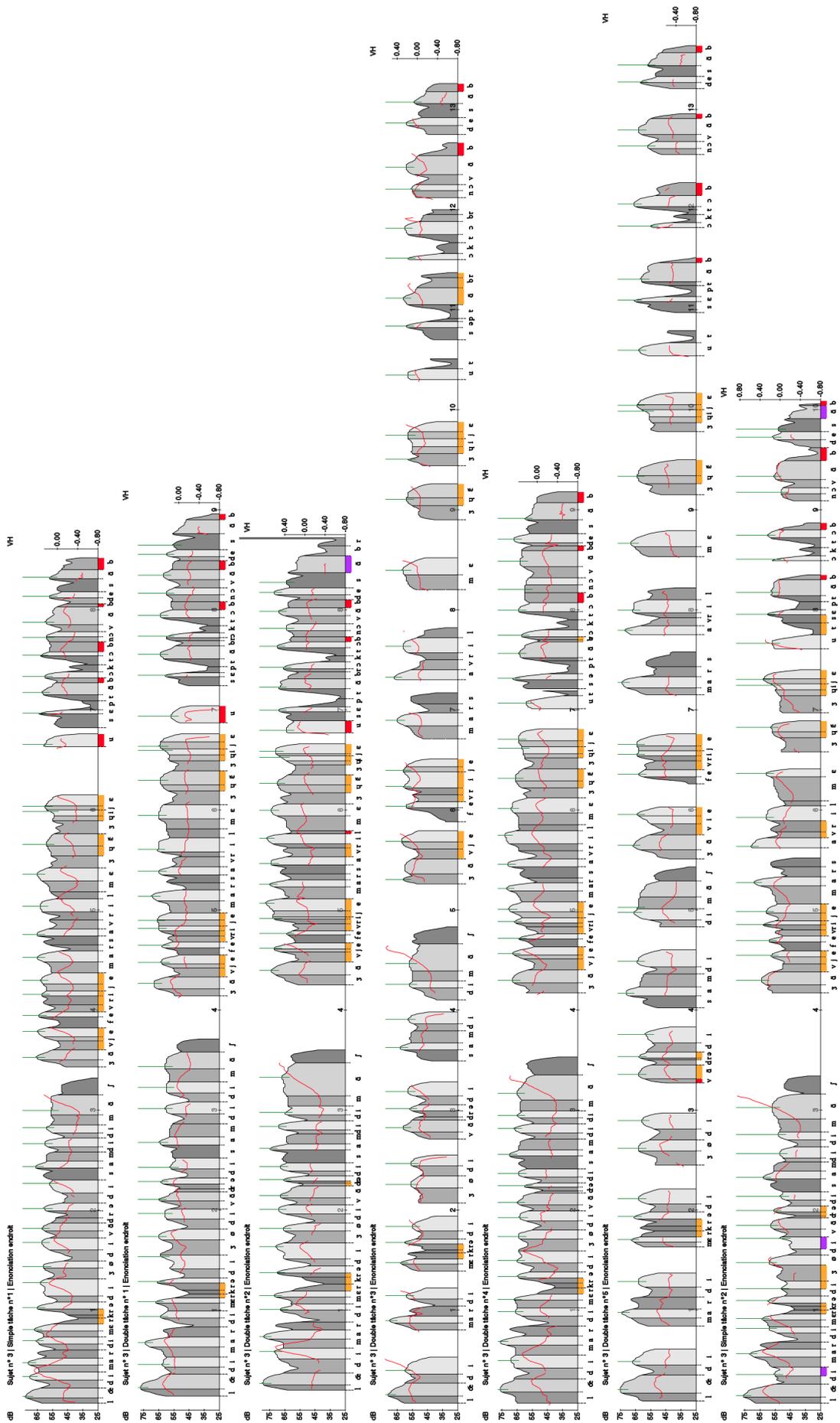


FIGURE 10.20 – Programmes des litanies énoncées à l’endroit

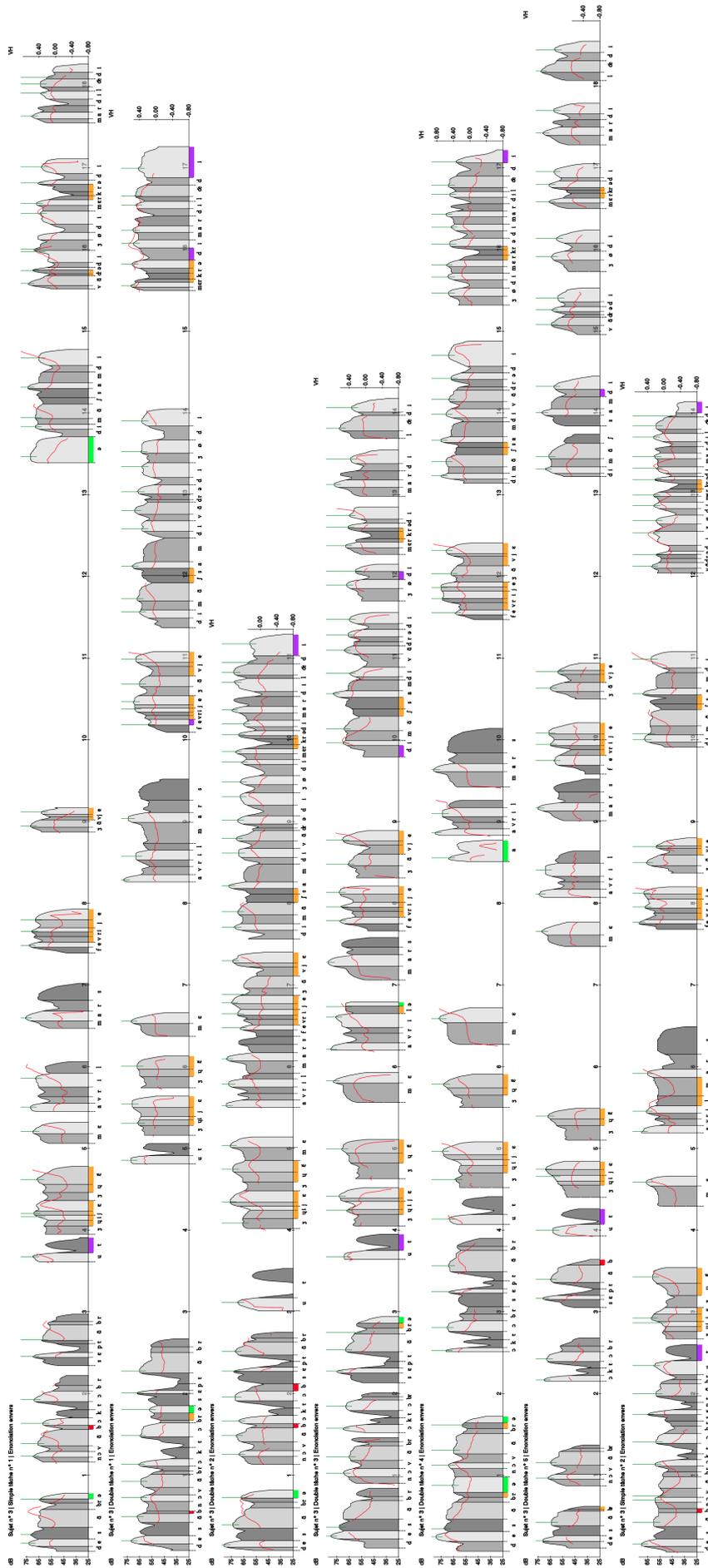


FIGURE 10.21 – Prosogrammes des litanies énoncées à l'envers

De nombreux dévoisements sont observables, principalement lors de énonciations à rebours : les /i/ de /lœdi/ sont souvent dévoisés, le sujet soupirant à la fin des litanies. Nous relevons également des micro-variations parfois importantes de F0 au sein de certains phonèmes : ce phénomène est assez présent sur les phonèmes de /avril/ et paraît plus fort lors des énonciations à rebours.

En terme de parole, nous relevons des durées totales d'énonciations variées : à l'endroit, les productions 4 et 6 se démarquent nettement de celles des autres étapes : elles se distinguent par l'adoption d'un rythme plus lent marqué par des pauses régulières disposées entre pratiquement chaque mot. Nous dénombrons 18 pauses lors des étapes 4 et 6 contre à peine 3 pour les étapes 1, 2, 3, 5. Cela se marque au travers de l'EIS mais cela indique également un changement de stratégie de récit chez ce sujet : les productions des litanies énoncées à l'endroit 4 et 6 sont régulées par l'ajout de pauses dont la durée est assez homogène. Le visionnage attentif des vidéos capturées nous a permis de voir que ce sujet a eu recours à des hochements de tête pour maintenir le rythme. Cette technique est très largement perceptible lors du récit de la sixième litanie.

La distribution des pauses est beaucoup plus disparate lors des énonciations à rebours. La longue pause de plus de 4000 ms observée lors de l'étape 1 s'explique par un arrêt volontaire du sujet, il a repris son énonciation suite à une relance de l'expérimentateur. Par contre, d'autres pauses semblent à nouveau être révélatrices d'événements critiques : grâce aux vidéos, nous avons par exemple remarqué que les 3 pauses supérieures à 1000 ms de la litanie envers de l'étape 2 s'expliquent par des corrections de trajectoire pour maintenir le véhicule dans sa bande de circulation. Notons que, dans ce cas précis, le sujet a artificiellement augmenté la difficulté de la tâche en circulant sur la voie la plus à gauche, soit celle qui est bordée par un muret en béton, tout écart à gauche risquant dès lors de se solder par un accident. Au fur et à mesure des phases de conduite, ce conducteur a testé plusieurs stratégies : conduite très lente sur la voie de droite lors l'étape 3 (70 km/h) avec une énonciation la plus rapide possible ; conduite à vitesse modérée (90 km/h) sur la deuxième bande avec énonciation régulée (nombreuses pauses) ; conduite rapide (120 km/h) et agressive avec de nombreux dépassements et changements de voie de circulation et énonciation aussi rapide que possible, cette étape se caractérise par l'apparition de plusieurs pauses d'une durée supérieure à 500 ms s'expliquant par les manœuvres effectuées. Signalons que, bien que nous n'ayons pas pu extraire de manière fiable les données de l'eye tracking, la vidéo nous permet de voir de nombreux clignements d'yeux durant cette énonciation ; conduite rapide (110 km/h) mais moins agressive avec énonciation régulée des litanies : il est intéressant de signaler que la stratégie a tout de même été perturbée : en témoignent les 2 pauses de plus de 2000 ms liées à un changement de file et à un dépassement.

Au niveau des phonèmes, ce sujet syncope la consonne occlusive non voisée /t/ de /ut/ lors des 4 premières énonciations endroits tandis qu'il la produit systématiquement dans toutes les énonciations à l'envers et qu'il en allonge fortement la durée de l'explosion pour tenter de combler la pause suivante. Des ajouts d'un /ə/ sont observés uniquement aux étapes 1 à 5 en condition d'énonciation à rebours. Il est pertinent de remarquer qu'à l'étape 5, c'est à dire lorsque le sujet a adopté la stratégie de conduite la plus agressive, l'apparition de 2 /ə/ ainsi qu'un faux départ sur le /a/ de /avril/.

Enfin, au niveau du langage, nous n'avons relevé aucune erreur de production des litanies.

Les prosogrammes illustrent clairement les différences de fluence influencées par les stratégies mises en œuvre par ce sujet peu expérimenté : certaines ont

contribué à réduire le stress induit par la charge de travail, comme la réduction de la vitesse autorisant une énonciation rapide, limitant ainsi la durée de la double tâche (Martin et al., 2013), au contraire, d'autres l'ont accru : la vitesse élevée et les dépassements ont engendré plus de pauses de longue durée, ce sujet a toutefois tenté de minimiser certaines pauses en procédant à des ajouts de phonèmes ou en allongeant la réalisation d'autres.

10.3 Analyses des résultats du sujet 5

10.3.1 Anamnèse du sujet

Le cinquième sujet était âgé de 27 ans lors de l'expérience qui s'est déroulée le 30/03/2016 de 13h00 à 17h15. Il s'agit d'un conducteur expert qui possède son permis depuis près de 10 ans, il a accumulé plus 200000 km parcourus en voiture et déclare adopter une conduite défensive : au cours de l'année précédent l'expérience, il n'a été impliqué dans aucun accident et mais a reçu trois amendes de roulage. Ses trajets quotidiens ont une longueur moyenne de 100 km et sont essentiellement routiers et autoroutiers, cet individu est habitué à évoluer dans un trafic fluide. Ce sujet présente une caractéristique singulière : il est pilote de rallye. En 2016, il a terminé 2 fois sur le podium dans le championnat allemand Citroën Racing Trophy. Professeur d'éducation physique et étudiant, il peut être considéré comme un novice dans la manipulation des environnements virtuels : il ne joue pratiquement jamais aux jeux vidéo mais a déjà eu l'opportunité d'essayer un simulateur automobile tout comme un volant à retour de force. Ce sujet appartient au 3e groupe de notre profilage, il s'agit de l'ensemble des conducteurs se distinguant par leurs excès de vitesse.

10.3.2 Evolution des performances et du ressenti

Au niveau de la conduite, nous observons une augmentation du nombre d'infractions du code de la route dans les phases de simulation 3 et 4 (DT3, DT4). Cet accroissement, illustré à la figure 10.22, s'explique principalement par une augmentation des erreurs de type "clignotant non embrayé lors des changements de direction", "infraction de la priorité du passage du carrefour", "création d'obstacles". Il a refusé la priorité aux passages pour piétons à 4 reprises (DT2 : 1, DT3 : 2, DT4 : 1). La recrudescence de ces fautes de conduite est cohérente : la densité de piétons est plus élevée dans les phases de conduite modérées et complexe (DT2, DT3, DT4), les intersections et les routes plus chargées ont contraint le sujet à s'imposer dans la circulation.

Globalement, ce conducteur a commis assez peu d'infractions et nous avons observé qu'il a adopté une stratégie défensive sur l'autoroute pour réduire sa charge de travail : lors de l'exécution des tâches secondaires, il a conservé, voire réduit, la vitesse de sa voiture afin de maintenir une distance de sécurité avec les autres véhicules ou a doublé les véhicules les plus lents (camion, bus). Celui-ci déclare, au travers du NASA-TLX (voir figure 10.23), avoir ressenti un accroissement de sa charge de travail lors des 4e et 5e phases de conduite (DT4, DT5) : son score global pondéré varie entre 23% (DT3) et 69% (DT4) avec une valeur de 47% pour la première phase de conduite simple (DT1). Soulignons que l'augmentation de la densité du trafic et des piétons lors de la phase de conduite complexe (DT3) n'a pas eu l'effet escompté sur la charge de travail ressentie : le sujet déclare ressentir une charge mentale quasi-nulle mais une forte frustration.

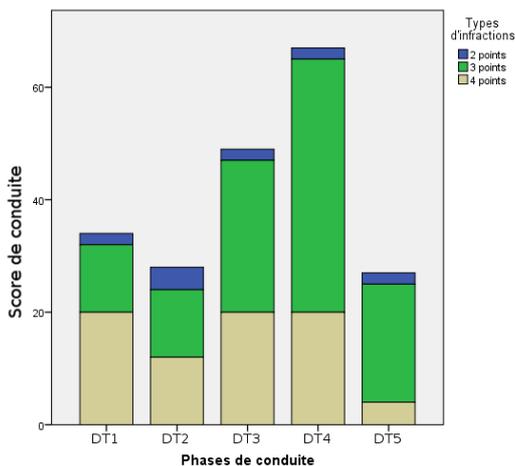


FIGURE 10.22 – Score de conduite

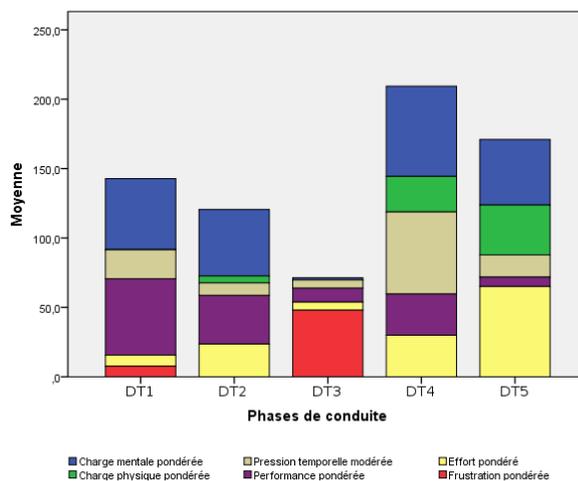


FIGURE 10.23 – Charge de travail

En ce qui concerne la tâche d'opération span, nous remarquons de légères variations au niveau des temps de réaction : ceux-ci ont une médiane comprise entre 5866 ms et 7111 ms selon les étapes de l'expérience (voir figure 10.24). Les différences observées ne sont néanmoins pas significatives ($H(6) = 5.340$, $p = .501$). Les résultats aux calculs sont intéressants (voir figure 10.24) : le sujet n'a jamais répondu correctement à tous les énoncés : il a commis 3 erreurs lors des 4e et 5e étapes (DT3, DT4) et 2 erreurs au cours des autres étapes. Celles-ci sont essentiellement dues à une inversion des opérandes dans les énoncés impliquant une soustraction : le sujet donnait une valeur correcte mais négative.

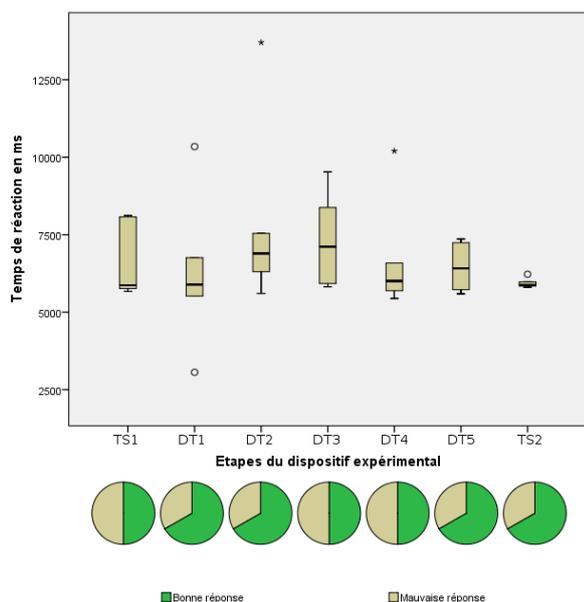


FIGURE 10.24 – Operations span

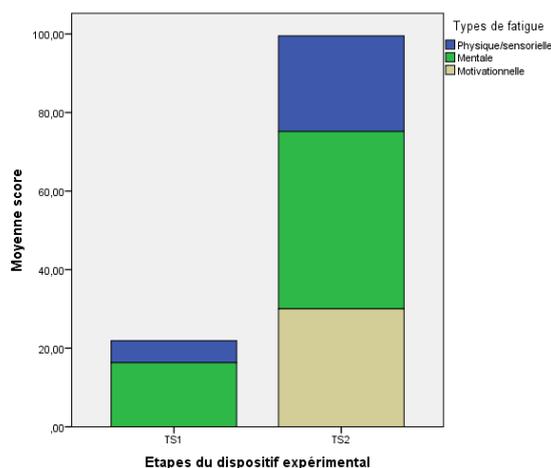


FIGURE 10.25 – Fatigue ressentie

Les résultats aux tests attentionnels pratiqués avant et après les phases de conduite montrent une augmentation significative ($U = 35683.0$, $p = .004$) du temps de réaction médian (+60 ms), le taux de réussite restant optimal (100 %). Comme le montre la table 10.11, l'effet délétère de l'indigence a disparu lors de la 2e passation. Cette amélioration du score d'alerte est à relativiser : elle s'explique par une augmentation du temps de

réaction sans indçage plus forte qu'avec indçage mais tous les temps de réaction ont augmenté. Le même constat peut être dressé pour l'orientation : l'effet négatif de l'indçage spatial disparaît en raison d'une hausse de tous les temps de réaction. Enfin, le score du contrôle exécutif a pratiquement triplé : une élévation des temps de réaction de plus de 170 ms dans la condition divergente explique cette dégradation.

Scores	Conditions	Passation TS1	Passation TS2
Alerte	Pas d'indice	756 ms	860 ms
	Double indice	853 ms	890 ms
	Score	-97 ms	+30 ms
Orientation	Indice central	778 ms	860 ms
	Indice spatial	821 ms	867 ms
	Score	-43 ms	-7 ms
Contrôle exécutif	Divergent	855 ms	1026 ms
	Convergent	790 ms	830 ms
	Score	+65 ms	+196 ms

TABLE 10.11 – Evolution des scores attentionnels

Cette hausse du temps de réaction démontre que le sujet était moins attentif lors de la deuxième passation, celui-ci déclare d'ailleurs se sentir beaucoup plus fatigué à la fin de l'expérience (voir figure 10.25) : son indice de fatigue global augmente de 24%, sa fatigue physique est plus élevée (+18%), tout comme sa fatigue mentale (+29%) et sa motivation décroît (-30%).

Les performances et le ressenti de celles-ci nous laissent penser que le dispositif a bien engendré du stress induit par la charge de travail chez ce sujet. Par ailleurs, nous postulons que ce stress s'est accumulé progressivement sous la forme de fatigue, cela pourrait expliquer l'augmentation de la charge de travail ressentie lors des dernières phases de conduite : bien que la difficulté de la tâche se réduisait, le sujet disposait de moins en moins de ressources pour faire face à la tâche. L'évolution des scores au test attentionnel va dans ce sens.

10.3.3 Evolution des paramètres physiologiques

Comme le montre la figure 10.26, nous constatons une diminution non significative de la durée séparant deux clignements des yeux ($U=64131.0$, $p=.715$) en condition de double tâche.

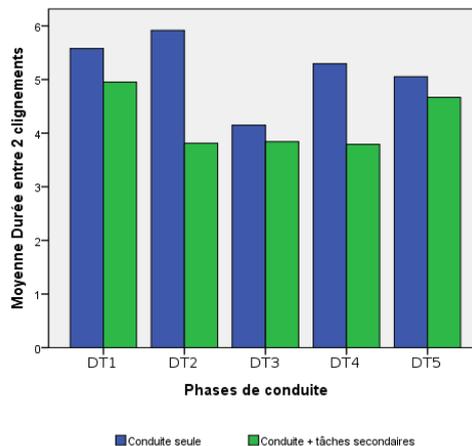


FIGURE 10.26 – Fréquence de nictation

Lors des 5 phases de conduite, la fréquence de nictation est plus basse lors de l'exécution simultanée de la conduite et des tâches secondaires mais ces différences ne sont pas significatives. Nous pouvons tout de même remarquer que les différences les plus fortes entre les deux conditions se produisent durant les phases de conduite modérées.

10.3.4 Analyse des litanies

Evolution de la fréquence fondamentale

L'analyse de variance à deux critères croisés appliquée sur la fréquence fondamentale exprimée en valeur harmonique indique la présence d'un effet des étapes, du sens d'énonciation et d'un effet d'interaction. Etant donné les non respect des conditions d'application, nous rapportons les résultats des tests non paramétriques.

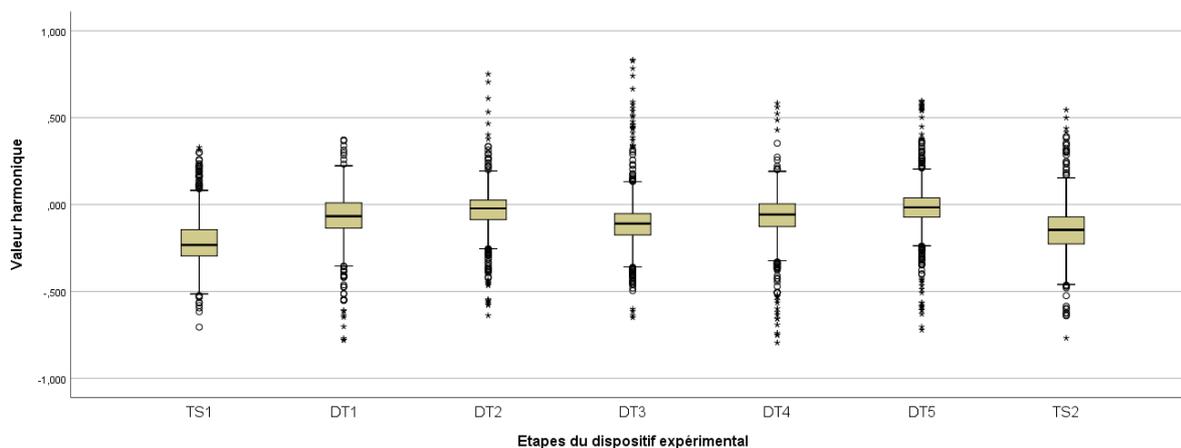


FIGURE 10.27 – Distribution de F0 exprimée en VH par étapes

L'effet des étapes sur la fréquence fondamentale est confirmé par un test de Kruskal Wallis ($H(6) = 2848.38, p < .001$). Comme l'illustrent la figure 10.27 et la table 10.12, hormis pour la paire formée par les étapes 2 et 5 (DT1, $rm = 6378.31$; DT4, $rm = 6512.55$), F0 est statistiquement différente dans toutes les étapes : elle est la plus basse lors de la première étape (TS1, $rm = 2855.74$), puis, par ordre d'élévation, étape 7 (TS2, $rm = 4153.54$), étape 4 (DT3, $rm = 5095.72$), étapes 2 et 5, étape 3 (DT2, $rm = 6378.31$) et enfin étape 6 (DT5, $rm = 7818.32$).

DT1	U = 604140.0 p < .001					
DT2	U = 364673.0 p < .001	U = 1214590.0 p < .001				
DT3	U = 674499.5 p < .001	U = 1185591.0 p < .001	U = 717347.0 p < .001			
DT4	U = 476547.5 p < .001	U = 1471442.5 p = .248	U = 1025660.0 p < .001	U = 938164.0 p < .001		
DT5	U = 340449.0 p < .001	U = 1153760.0 p < .001	U = 1222200.0 p < .001	U = 668760.5 p < .001	U = 971404.5 p < .001	
TS2	U = 850509.5 p < .001	U = 887846.5 p < .001	U = 506833.5 p < .001	U = 1028530.0 p < .001	U = 691089.0 p < .001	U = 470157.0 p < .001
	TS1	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5

TABLE 10.12 – Comparaison de la VH pour les étapes prises 2 à 2

Un effet du sens d'énonciation est mis en avant par un test de Mann-Whitney ($U=13902112.0$, $p < .001$), l'énonciation à rebours se caractérise par une fréquence fondamentale plus élevée (endroit, $rm= 5273.76$; envers, $rm= 6212.02$).

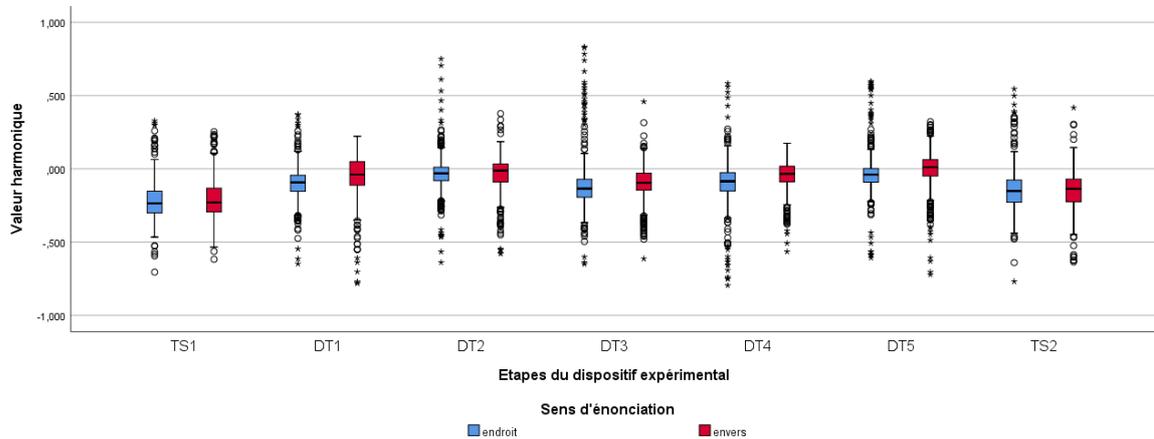


FIGURE 10.28 – Distribution de F0 par sens d'énonciation au sein de chaque étape

La figure 10.28 semble indiquer que l'effet du sens d'énonciation des litanies se marque surtout lorsque celles-ci sont récitées en même temps que la conduite. Une série de tests de Mann-Whitney (voir table 10.13) calculés au sein de chaque étape nous confirme de la présence de différences significatives uniquement dans les condition de double tâche (DT1, DT2, DT3, DT4, DT5).

TS1	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	TS2
U= 311309.0	U= 302765.0	U= 287350.0	U= 252785.0	U= 223803.0	U= 233050.5	U= 295073.5
p= .115	p< .001	p= .001	p< .001	p< .001	p< .001	p= .432

TABLE 10.13 – Comparaison de F0 selon le sens d'énonciation au sein des étapes

La fréquence fondamentale est à nouveau influencée par les étapes du dispositif expérimental ainsi que par le sens d'énonciation des litanies. Nous soupçonnons la présence d'un effet d'interaction car l'effet du sens d'énonciation des litanies est seulement présent en condition de double tâche. En outre, nous observons que la phase de conduite complexe se caractérise par une fréquence fondamentale relativement basse, ce qui confirmerait l'absence d'effet de la densité élevée du trafic sur le stress induit par la charge de travail suggéré par les performances et le ressenti du sujet. De plus, l'augmentation de la fréquence fondamentale aux cours des étapes 5 et 6 correspond au ressenti et aux performances du sujet, lesquelles se sont dégradées sous un probable effet de la fatigue.

Evolution de la fluence

L'analyse de variance à deux critères croisés appliquée sur l'écart inter-syllabique nous informe de la présence d'un effet du sens d'énonciation. Etant donné les non respect des conditions d'application, nous rapportons les résultats des tests non paramétriques.

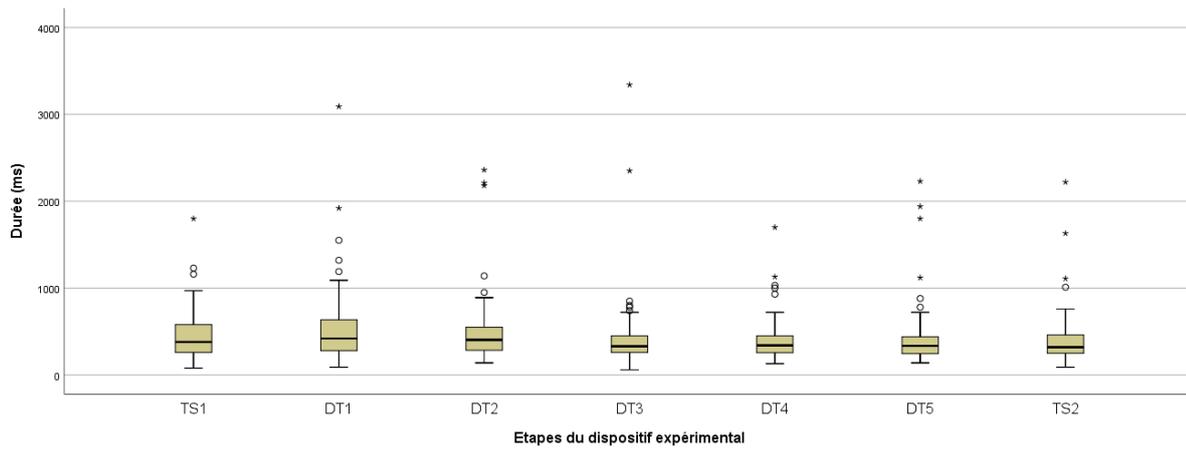


FIGURE 10.29 – Distribution des écarts inter-syllabiques par étapes

Le test de Kruskal-Wallis est à la limite de la significativité ($H(6) = 12.384, p = .054$). La figure 10.29 et des tests de Mann-Whitney, dont les résultats sont synthétisés à la table 10.14, montrent que seules les étapes 2 et 3 présentent un écart inter-syllabique plus élevé. Aucune différence significative d'EIS n'est notable entre les autres étapes.

DT1	U= 2522.5 p= .338					
DT2	U= 2605.0 p= .817	U= 2538.0 p= .530				
DT3	U= 2459.5 p= .285	U= 2255.5 p= .049	U= 2303.0 p= .158			
DT4	U= 2332.5 p= .194	U= 2165.0 p= .038	U= 2186.0 p= .105	U= 2634.5 p= .908		
DT5	U= 2435.5 p= .157	U= 2242.0 p= .024	U= 2260.5 p= .068	U= 2731.0 p= .761	U= 2708.0 p= .914	
TS2	U= 2252.5 p= .063	U= 2101.0 p= .010	U= 2121.0 p= .033	U= 2554.0 p= .480	U= 2528.0 p= .594	U= 2687.0 p= .638
	TS1	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5

TABLE 10.14 – Comparaison des EIS pour les étapes prises 2 à 2

Un test de Mann-Whitney ($U = 27019.0, p < .001$) met en évidence que la fluence est moins élevée lorsque les litanies sont énoncées à rebours (endroit, $rm = 234.13$; envers, $rm = 283.58$). La figure 10.30 permet de visualiser la présence de davantage de valeurs extrêmes d'EIS lors des énonciations à rebours. Ces valeurs extrêmes s'expliquent par la durée de certaines pauses, parfois supérieures à 2500 ms. Comme le montrent les prosogrammes tracés aux figures 10.31 et 10.32, la localisation de ces pauses diffère en fonction du sens d'énonciation. Nous revenons sur ce point dans la section suivante de ce document.

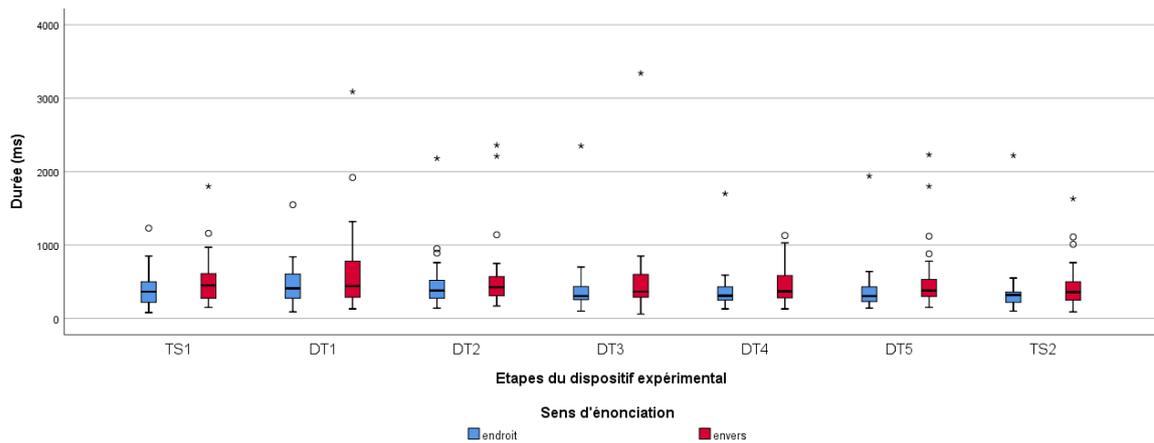


FIGURE 10.30 – Distribution des EIS par sens d’énonciation au sein de chaque étape

Enfin, il apparaît que les différences d’EIS ne sont pas significatives lors des étapes 2 et 3 alors qu’elles sont au seuil de la significativité pour les autres étapes.

TS1	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	TS2
U= 517.5	U= 641.0	U= 563.0	U= 523.0	U= 501.0	U= 558.0	U= 515.0
p< .072	p= .518	p= .338	p= .081	p= .098	p= .088	p= .067

TABLE 10.15 – Comparaison des EIS selon le sens d’énonciation au sein des étapes

Le sens d’énonciation impacte globalement la fluence de ce sujet. De plus, elle apparaît comme moins élevée lors des étapes 2 et 3 en raison de pauses plus longues. Nous pouvons postuler que cela s’explique soit par un effet nouveauté lors des premières étapes incluant la conduite, soit par la présence d’événements critiques. Nous allons tenter de vérifier cette hypothèse dans la section suivante.

Exploration visuelle des prosogrammes

Avant de passer en revue les informations apportées par les prosogrammes, il convient de signaler que nous avons procédé à beaucoup plus de corrections manuelles d’erreurs de détection de F0 pour ce sujet. Lorsque les valeurs étaient incohérentes et ne correspondaient pas avec l’évolution du spectrogramme, nous les avons supprimées.

Au niveau de la voix, nous retrouvons, pour les litanies énoncées à l’endroit, des envolées de F0 sur les /ã/ de /dimãf/ et de /desãbr/. Nous pensons que celles-ci s’expliquent par le fait qu’il s’agit des derniers phonèmes voisés d’un groupe de mots produits consécutivement au cours d’une seule expiration. A l’inverse, la fréquence fondamentale semble chuter sur le dernier phonème voisé des autres mots. Cela s’observe très bien, par exemple, sur la séquence /avril/, /mε/, /ʒɥẽ/, /ʒɥijε/ de la 4e litanie endroit. Ces tendances ont l’air moins marquées sur les litanies récitées à l’envers.

Des micro-variations de la F0 sont observables sur de nombreux phonèmes : c’est par exemple le cas de la voyelle /e/ de /ʒãvje/ lors des deux premières litanies envers ou des voyelles /a/ de /avril/ sur pratiquement toutes les litanies.

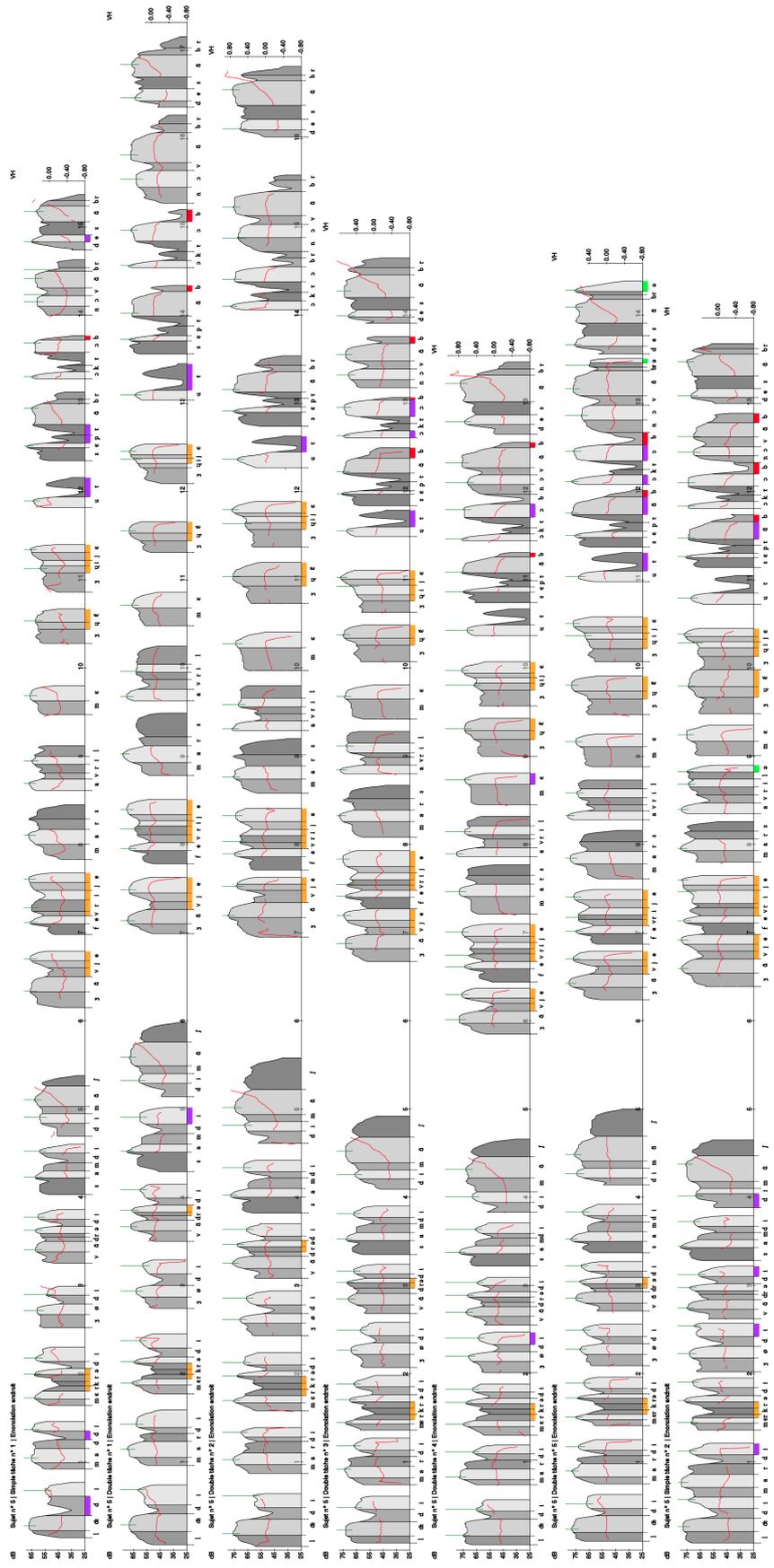


FIGURE 10.31 – Prosogrammes des litanies énoncées à l’endroit

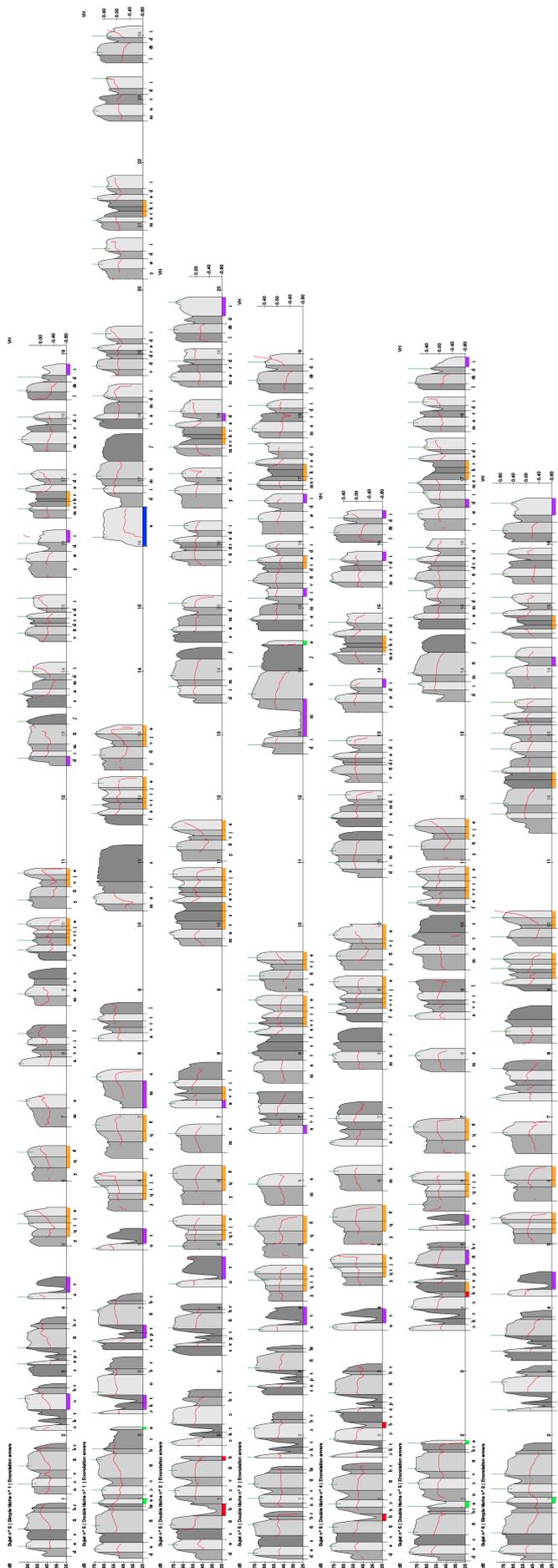


FIGURE 10.32 – Prosogrammes des litanies énoncées à l’envers

Au niveau de la parole, nous notons des durées totales de production assez proches et suivant le même profil indépendamment du sens d'énonciation : un allongement durant les étapes 2 et 3 suivi d'une réduction aux étapes 4 et 5 pour ensuite augmenter à l'étape 6. Ce sujet a rythmé ses énonciations endroits à l'aide de nombreuses pauses (entre 15 et 18 par litanie), la pause la plus longue étant systématiquement placée entre /dimãʃ/ et /ʒãvje/.

Cette régularité est mise à mal lors des énonciations à rebours : la visualisation des vidéos nous permet de documenter certaines pauses. Ainsi, les pauses entre /avril/ et /mars/, /mardi/ et /mækrædi/ de la deuxième litanie sont dues à l'activation du clignotant et aux changements de voie de circulation. Nous remarquons aussi que la pause la plus longue a lieu entre /ʒãvje/ et /dimãʃ/ et que le sujet l'a artificiellement écourtée en la remplissant avec un /e/, soit une pause pleine.

Les deux pauses de plus 1000 ms de la troisième litanie à rebours s'expliquent par le dépassement d'un bus tandis que la pause entre /nɔvãbr/ et /ɔktɔbr/ de la 6e litanie est due à un changement de file pour effectuer un dépassement. Nous retrouvons des pauses plus longues entre /ʒãvje/ et /dimãʃ/.

La consonne occlusive non voisée /t/ du /ut/ est systématiquement produite, quelque soit le sens d'énonciation, et se caractérise par une explosion longue toujours suivie d'une pause. Quelques /ə/ sont produits mais la majorité d'entre-eux sont ajoutés lors des 6e litanies aux mois de /nɔvãbr/ et /desãbr/. Les /r/ sont plus fréquemment syncopés dans les énonciations endroits.

Enfin, au niveau du langage, nous n'avons relevé aucune erreur de production lors du récit des litanies.

Globalement, les litanies, représentées au travers des prosogrammes, s'avèrent assez semblables lorsqu'elles sont énoncées à l'endroit, la pause la plus longue se situant toujours entre le dernier jour de la semaine et le premier mois de l'année. Cette régularité est bouleversée en énonciation inverse lors des phases de double tâche : plusieurs événements liés au trafic ont engendré des pauses plus longues. Ce sujet est parvenu à modérer le stress induit par la charge de travail en adoptant une attitude de conduite défensive sur autoroute alors qu'il se caractérise par un taux d'infractions plus élevé aux intersections. Le profil des sixièmes litanies laisse à nouveau penser que les ressources du sujet étaient moindres à la fin de l'expérience.

10.4 Analyse des résultats du sujet 6

10.4.1 Anamnèse du sujet

Le sixième sujet était âgé de 22 ans lors de l'expérience qui s'est déroulée le 13/04/2016 de 12h30 à 16h45. Il s'agit d'un conducteur qui possède son permis depuis 3 ans, il totalise plus 25000 km parcourus en voiture et déclare adopter une conduite plutôt défensive : au cours de l'année précédent l'expérience, il n'a été impliqué dans aucun accident mais a reçu une amende de roulage. Ses trajets quotidiens ont une longueur moyenne de 40 km et sont équitablement répartis entre environnements urbain, routier et autoroutier, cet individu évolue habituellement dans un trafic chargé. Etudiant en informatique, il doit

néanmoins être considéré comme un novice dans l'interaction avec les environnements virtuels : il ne joue pratiquement jamais à des jeux vidéos bien qu'il ait déjà eu l'opportunité d'essayer un simulateur automobile et un volant à retour de force. Ce sujet fait partie du 4e groupe de notre profilage, ce dernier se distingue des autres par une meilleur maîtrise des commandes du simulateur mais aussi par davantage d'infractions aux feux tricolores et aux intersections.

10.4.2 Evolution des performances

Au niveau de la conduite, nous observons une variation du nombre d'infractions du code de la route avec la densité du trafic. Cet accroissement, illustré à la figure 10.33, s'explique principalement par une augmentation des erreurs de type "infraction de la priorité du passage du carrefour", "création d'obstacles". Il a refusé la priorité aux passages pour piétons à 6 reprises (DT2 : 2, DT3 : 2, DT4 : 2). Ces fautes de conduite ne sont pas surprenantes : un nombre plus élevé de véhicules dans les carrefours entraîne une hausse des infractions de priorité, le sujet préférant se dégager rapidement des intersections pour poursuivre sa route. En ce qui concerne la hausse des erreurs "création d'obstacles", elle trouve sans doute une explication dans l'utilisation peu naturelle des rétroviseurs dans le simulateur : en effet, cette manipulation requérait l'activation d'un bouton alors qu'il suffit de tourner la tête en conditions réelles. Ce sujet étant peu familier avec les manipulations d'un environnement virtuel, il a eu peu recours aux rétroviseurs et n'a donc pas pu voir tous les véhicules l'entourant.

Globalement, ce conducteur est un de ceux qui a commis le moins d'infractions, surtout dans les phases de conduite simples et, bien qu'il ne soit pas habitué aux environnements virtuels, il a été très à l'aise lors des différentes phases de conduite. Ce conducteur a adopté la même stratégie de conduite durant toutes les phases autoroutières : il se plaçait sur la bande de circulation la plus à gauche et adoptait une allure modérée (110 km/h) qu'il modulait en fonction de la densité du trafic.

Nous pensons que la tâche de conduite n'a engendré que peu de charge de travail chez lui. Celui-ci déclare d'ailleurs, au travers du NASA-TLX (voir figure 10.34), ne pas avoir ressenti une forte charge de travail lors des phases de conduite : son score global pondéré varie entre 5% (DT5) et 16% (DT4) avec une valeur de 6% pour la phase de conduite complexe (DT3).

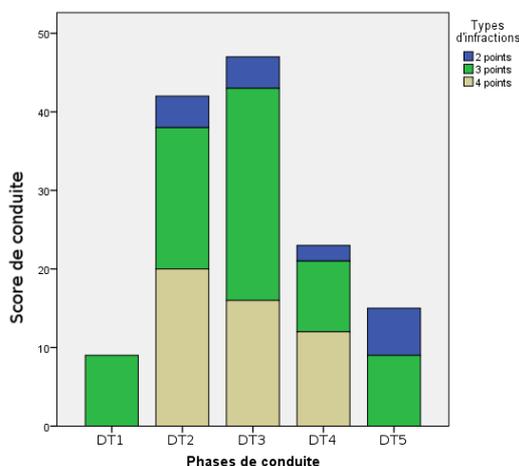


FIGURE 10.33 – Score de conduite

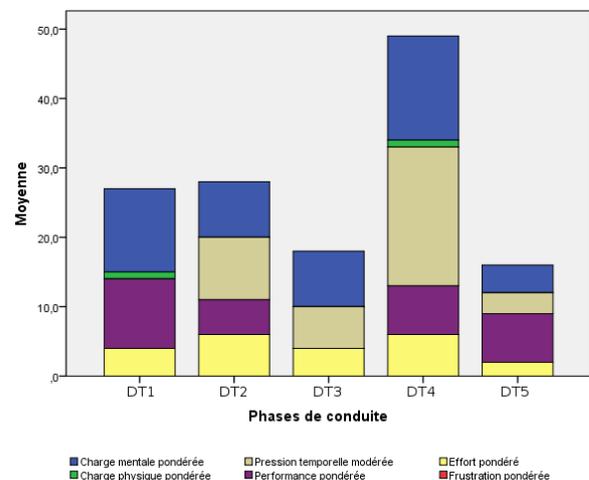


FIGURE 10.34 – Charge de travail

En ce qui concerne la tâche d'opération span, nous remarquons des fluctuations au niveau des temps de réaction : ceux-ci ont une médiane comprise entre 5758 ms et 9802 ms selon les étapes de l'expérience (voir figure 10.35). Toutefois, les différences observées ne sont pas significatives ($H(6) = 6.186, p = .403$). Au niveau du taux de réussite (voir figure 10.35), le sujet n'a jamais répondu correctement à tous les énoncés, même lorsque la tâche était effectuée seule. Il enregistre ses moins bons résultats aux étapes 4 et 6 (DT3 : 3 erreurs, DT5 : 2 erreurs, 1 passe) et, tout comme le sujet 5, il a inversé les opérands dans les énoncés impliquant une soustraction : ses réponses ayant dès lors une valeur correcte mais négative. Il a passé ou s'est trompé à au moins un calcul dans toutes les autres phases de conduite. Il est intéressant de noter que s'il répond un peu plus rapidement lors de la 7e étape, la qualité de ses réponses ne s'améliore pas.

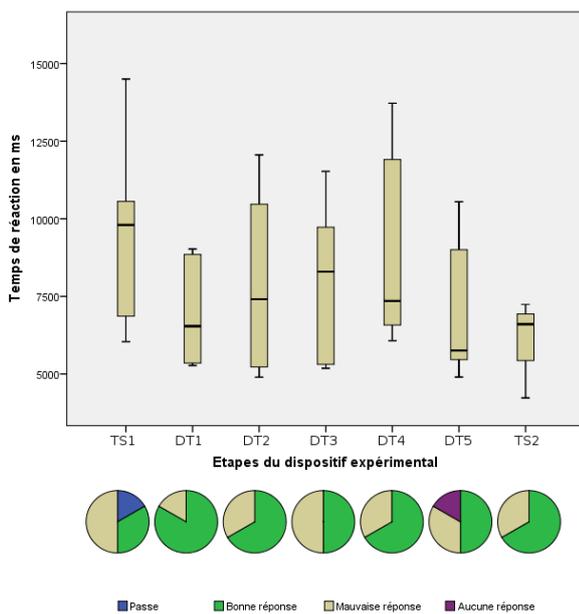


FIGURE 10.35 – Operations span

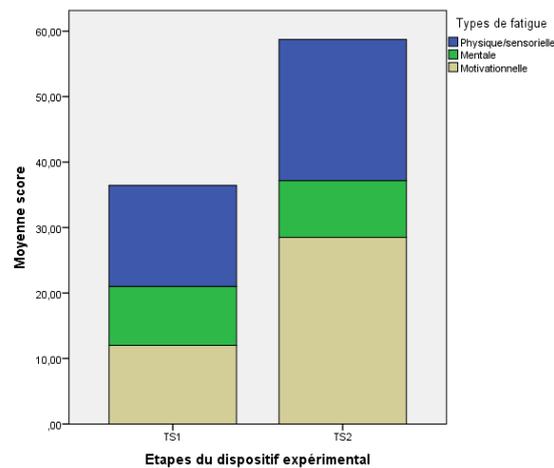


FIGURE 10.36 – Fatigue ressentie

Les résultats aux tests attentionnels pratiqués avant et après les phases de conduite montrent une augmentation non significative ($U = 39416.0, p = .303$) du temps de réaction médian (+ 18 ms), le taux de réussite diminuant un peu (de 97% à 96%). Les détails des temps de réaction aux tests attentionnels sont synthétisés à la table 10.16. Le score d'alerte paraît progresser, néanmoins, les temps de réaction dans les deux conditions (sans indice, avec indice) ont augmenté, et ce de manière plus forte sans indice, ce qui explique l'amélioration. Le score d'orientation s'est lui effondré : l'indicage spatial devenant pénalisant : les temps de réaction de l'indicage central ont diminué tandis que ceux avec l'indicage spatial ont augmenté, ce qui se marque dans le signe du score d'orientation. Enfin, le score du contrôle exécutif augmente, ce qui souligne une dégradation du contrôle attentionnel : les temps de réaction en condition convergence diminuent quelque peu tandis que les temps de réaction en condition divergente augmentent, c'est cela qui provoque l'augmentation du score du contrôle exécutif.

Scores	Conditions	Passation TS1	Passation TS2
Alerte	Pas d'indice	742 ms	814 ms
	Double indice	710 ms	766 ms
	Score	+32 ms	+48 ms
Orientation	Indice central	734 ms	701 ms
	Indice spatial	719 ms	745 ms
	Score	+15 ms	-44 ms
Contrôle exécutif	Divergent	815 ms	879 ms
	Convergent	692 ms	680 ms
	Score	+123 ms	+199 ms

TABLE 10.16 – Evolution des scores attentionnels

Ce sujet déclare se sentir plus fatigué à la fin de l'expérience (voir figure 10.36) : son indice de fatigue global augmente de 5%, sa fatigue physique est plus élevée (+7%), alors que sa fatigue mentale reste stable mais sa motivation décroît (-17%).

Globalement, la densité du trafic et des piétons se répercute sur les performances de conduite du sujet qui a par ailleurs commis très peu d'infractions dans les phases de conduite simples. Néanmoins, celui-ci déclare ne pas ressentir une forte hausse de sa charge de travail. Pourtant, à la fin de l'expérience, il se déclare plus fatigué, surtout physiquement. Il apparaît que ses performances au test attentionnel décroissent quelque peu mais cette diminution n'est pas significative. Enfin, si ce sujet est à l'aise dans la tâche de conduite, le même constat ne peut pas être dressé pour les tâches secondaires.

10.4.3 Analyse des litanies

Evolution de la fréquence fondamentale

L'analyse de variance à deux critères croisés appliquée sur la fréquence fondamentale exprimée en valeur harmonique indique la présence d'un effet des étapes, du sens d'énonciation et d'un effet d'interaction. Etant donné le non respect des conditions d'application, nous rapportons les résultats des tests non paramétriques.

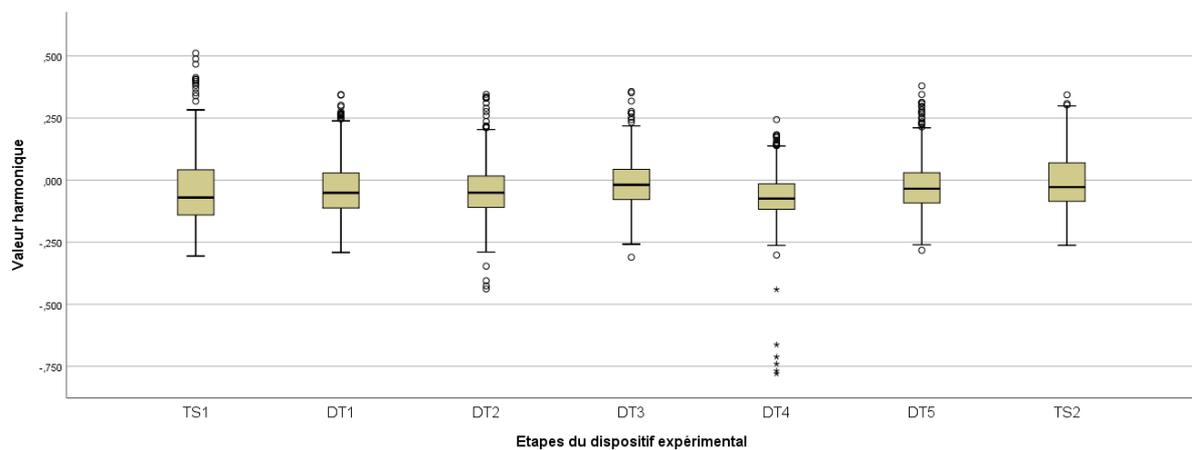


FIGURE 10.37 – Distribution de F0 exprimée en VH par étapes

Un test de Kruskal-Wallis confirme l'effet des étapes ($H(6) = 280.421$, $p < .001$). La figure 10.37 et des tests de Mann-Whitney, dont les résultats sont synthétisés à la table 10.17, montrent que la fréquence fondamentale est significativement plus élevée aux étapes 4 et

7 (DT3, $rm= 4704.25$; TS2, $rm= 4370.29$) et la plus basse aux étapes 1 et 5 (TS1, $rm= 3722.37$; DT4, $rm= 3460.25$). Entre ces extrêmes, il existe une différence significative de F0 entre l'étape 6 (DT5, $rm= 4370.29$)et les étapes 2 et 3 (DT1, $rm = 4053.36$; DT2, $rm= 3962.68$).

DT1	U= 637640.5 p< .001					
DT2	U= 690463.5 p= .004	U= 688403.0 p= .432				
DT3	U= 600552.5 p< .001	U= 611695.0 p< .001	U= 624929.5 p< .001			
DT4	U= 698618.5 p= .296	U= 588001.0 p< .001	U= 629746.5 p< .001	U= 502430.0 p< .001		
DT5	U= 582526.0 p< .001	U= 599543.0 p= .001	U= 618447.0 p< .001	U= 650840.5 p< .001	U= 509906.5 p< .001	
TS2	U= 533831.5 p< .001	U= 546246.5 p< .001	U= 557410.0 p< .001	U= 696926.5 p= .769	U= 459880.0 p< .001	U= 575678.0 p< .001
	TS1	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5

TABLE 10.17 – Comparaison de la VH pour les étapes prises 2 à 2

L'effet du sens d'énonciation de la litanie sur la fréquence fondamentale se vérifie une nouvelle fois ($U = 7138319.0$, $p < .001$) : le récit à rebours se marque par une fréquence fondamentale plus élevée (endroit, $rm= 3779.01$; envers, $rm= 4436.85$).

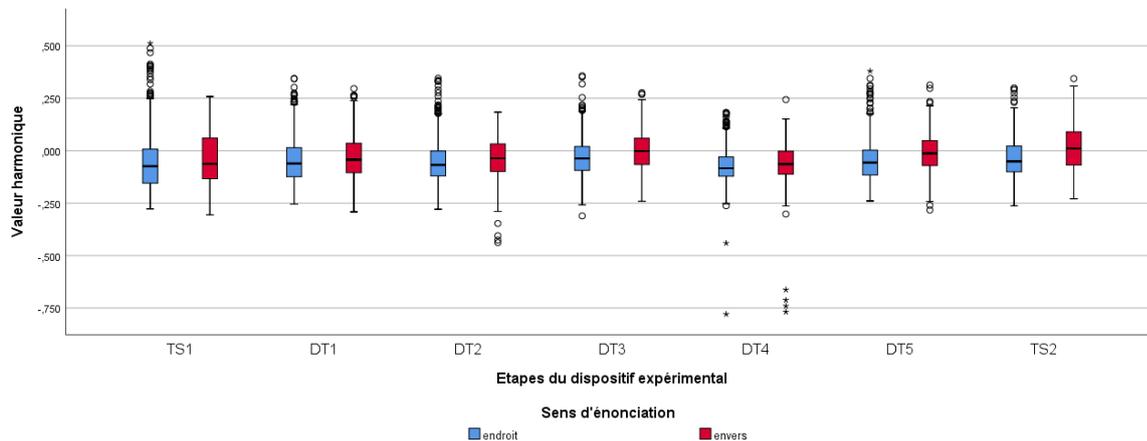


FIGURE 10.38 – Distribution de F0 par sens d'énonciation au sein de chaque étape

L'effet du sens d'énonciation de la litanie sur la fréquence fondamentale est constant durant toutes les étapes, comme le montrent les comparaisons deux à deux effectuées à l'aide d'une série de tests de Mann-Whitney (voir table 10.18) ainsi que la figure 10.38.

TS1	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	TS2
U= 169114.5 p= .021	U= 148320.0 p= .003	U= 153599.0 p< .001	U= 160051.0 p< .001	U= 153927.5 p= .001	U= 114760.0 p< .001	U= 116345.5 p< .001

TABLE 10.18 – Comparaison de F0 selon le sens d'énonciation au sein des étapes

La fréquence fondamentale est statistiquement plus haute lorsque les litanies sont récitées à l'envers. Un effet des étapes existe également : un élément est interpellant : c'est lors de la dernière énonciation que F0 est la plus élevée alors qu'elle était la plus basse lors du premier récit, ces deux étapes se déroulant en tant que tâches simples, sans conduite, cette forte différence est surprenante. Signalons toutefois que des valeurs de F0 équivalentes à celles des litanies de la dernière étape ont été trouvées lors de la phase de conduite complexe.

Evolution de la fluence

L'analyse de variance à deux critères croisés appliquée sur l'écart inter-syllabique nous informe de la présence d'un effet du sens d'énonciation. Etant donné le non respect des conditions d'application, nous rapportons les résultats des tests non paramétriques.

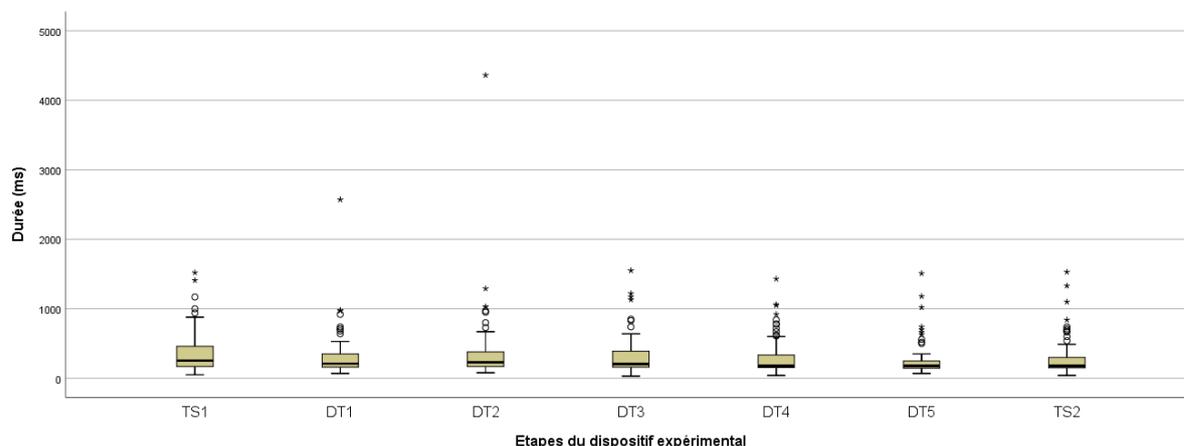


FIGURE 10.39 – Distribution des écarts inter-syllabiques par étapes

Bien que la figure 10.39 ne le laisse pas deviner, un test de Kruskal-Wallis indique qu'il existe des différences significatives d'EIS entre les étapes du dispositif expérimental ($H(6, N= 535)= 13.572, p= .035$). Celles-ci, évaluées à l'aide des comparaisons synthétisées à la table 10.19 se situent entre les étapes 1 et 3 d'une part (TS1, $rm= 304.64$; DT2, $rm= 298.27$) et les étapes 6 et 7 d'autre part (DT4, $rm= 232.13$; TS2, $rm= 247.56$) : la fluence, déjà bonne, s'améliore encore au fur et à mesure de l'avancement de l'expérience. Nous pensons que la fluence est globalement bonne car nous ne retrouvons que deux valeurs extrêmes supérieures à 1500 ms. Ces deux valeurs, comme le montrent les prosogrammes aux figures 10.41 et 10.42, s'expliquent par une pause de 2267 ms à l'étape 2 et de 4150 ms à l'étape 3, toutes deux survenues lors de l'énonciation à rebours.

DT1	U= 2566.5 p= .239					
DT2	U= 2600.0 p= .596	U= 2661.0 p= .406				
DT3	U= 2604.5 p= .127	U= 3044.0 p= .599	U= 2654.5 p= .178			
DT4	U= 2301.5 p= .055	U= 2678.0 p= .301	U= 2306.0 p= .057	U= 2972.0 p= .616		
DT5	U= 2064.0 p= .005	U= 2428.5 p= .053	U= 2086.5 p= .006	U= 2756.0 p= .210	U= 2680.0 p= .443	
TS2	U= 2209.0 p= .032	U= 2583.5 p= .212	U= 2233.0 p= .039	U= 2878.5 p= .489	U= 2813.5 p= .892	U= 2700.5 p= .577
	TS1	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5

TABLE 10.19 – Comparaison des EIS pour les étapes prises 2 à 2

A nouveau, il y a un effet du sens d'énonciation des litanies ($U= 27118.5, p< .001$) sur la fluence, l'EIS est supérieur en condition de récit à rebours (endroit, $rm= 234.52$; envers, $rm= 298.95$).

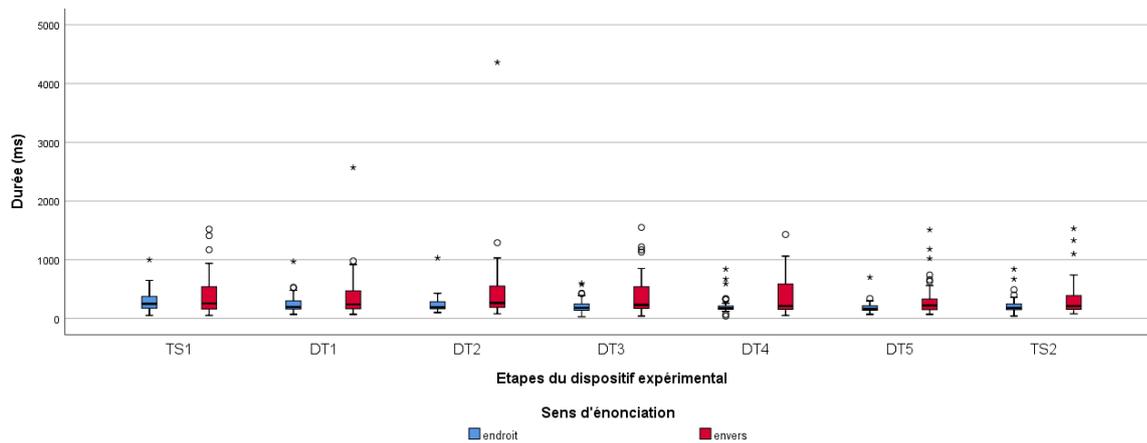


FIGURE 10.40 – Distribution des EIS par sens d'énonciation au sein de chaque étape

Afin de vérifier s'il existe des différences significatives en fonction du sens d'énonciation au sein de chaque étape, nous avons opéré une série de comparaisons à l'aide de tests de Mann-Whitney, leurs résultats sont consignés dans la table 10.20. Ils concluent à l'absence de différences entre le sens d'énonciation aux étapes 1 et 2 mais celles-ci sont significatives aux étapes 3 et 4. Les différences en fonction du sens du récit des litanies sont au seuil de la significativité pour les 3 dernières étapes. Un examen attentif de la figure 10.40 révèle que, pour les étapes 3 et 4, ce sont à la fois la réduction de l'EIS en condition de litanie endroit et l'augmentation de l'EIS en condition de litanie envers qui expliquent la présence de différences significatives.

TS1	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	TS2
U= 617.0	U= 617.5	U= 437.5	U= 532.5	U= 562.5	U= 540.0	U= 541.0
p= .469	p= .154	p= .008	p= .004	p= .101	p= .060	p= .087

TABLE 10.20 – Comparaison des EIS selon le sens d'énonciation au sein des étapes

La fluence est impactée par les étapes du dispositif expérimental et par le sens d'énonciation des litanies. Certaines pauses, dont la durée est largement supérieure aux autres, attirent notre attention, elles sont potentiellement la trace des effets du stress induit par la charge de travail. Nous observons que la fluence s'améliore au fur et à mesure de l'avancement de l'expérience mais de façon à des étapes différentes en fonction du sens d'énonciation. Cela pourrait s'expliquer par un effet d'apprentissage plus lent pour les récits à rebours. Enfin, à l'inverse du sujet 3, nous remarquons que la fluence s'améliore tandis que la fréquence fondamentale s'élève lors de l'énonciation des litanies au cours de la dernière étape.

Exploration visuelle des prosogrammes

L'observation attentive des prosogrammes tracés aux figures 10.41 et 10.42 met en avant plusieurs éléments.

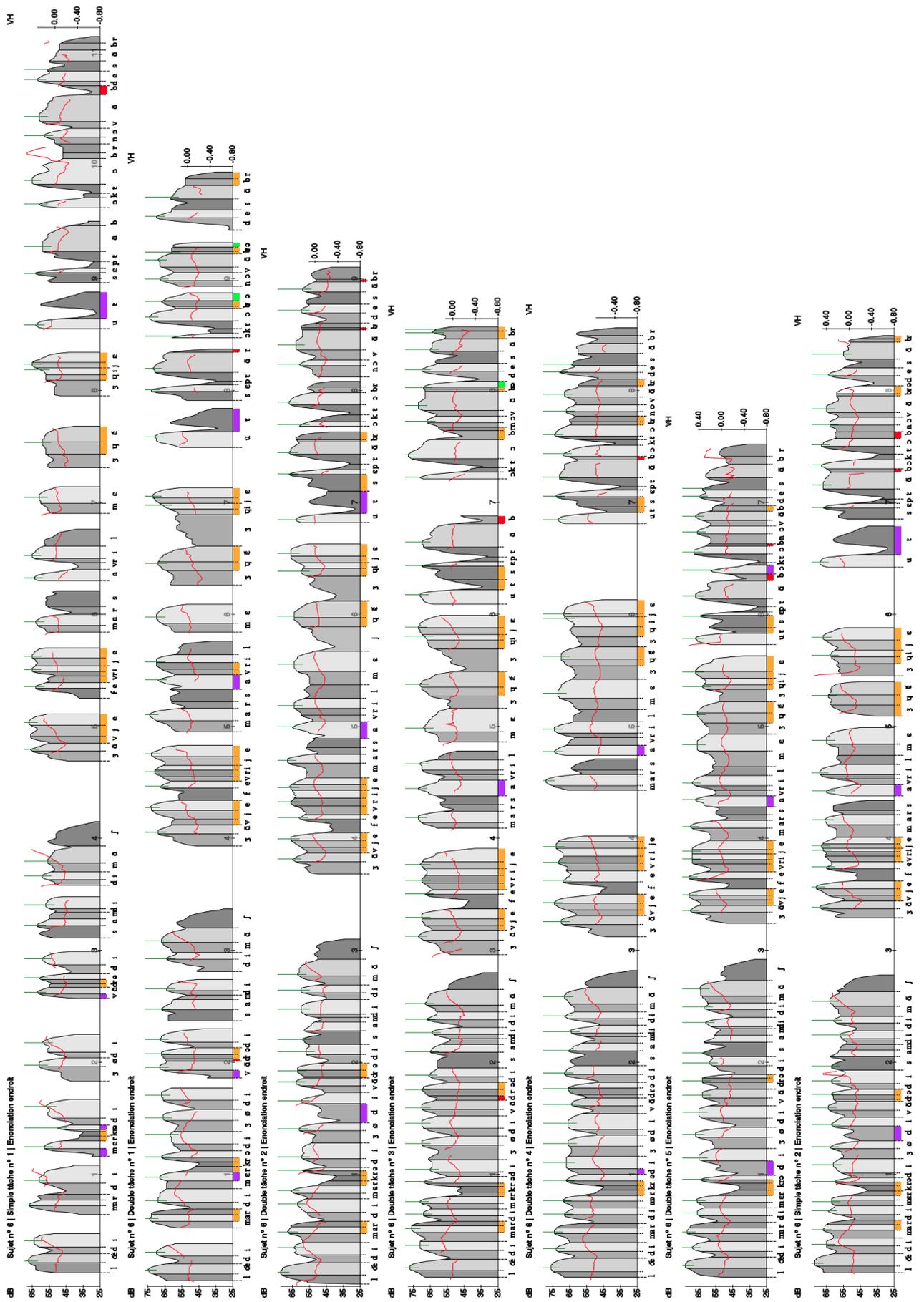


FIGURE 10.41 – Prosogrammes des litanies énoncées à l’endroit

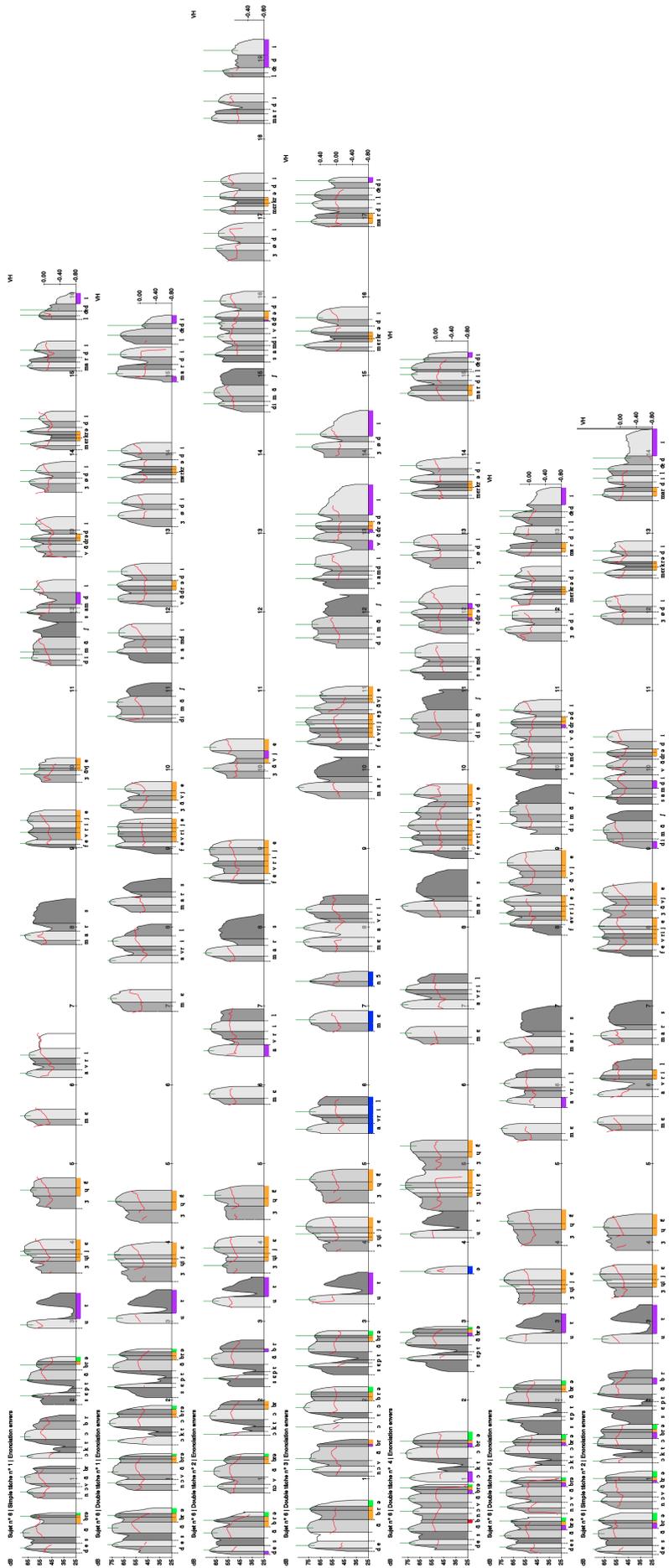


FIGURE 10.42 – Prosogrammes des litanies énoncées à l’envers

Tout d'abord, au niveau de la voix, nous observons de nombreux dévoisements : c'est le cas de tous les /i/ de /lœ̃di/ lors des énonciations à rebours ; plus étonnant, nous relevons une apparition tardive du voisement sur d'autres voyelles telles que certains /a/ de /avril/ ou le /ɛ/ du /mæ̃kræ̃di/ de la 2e litanie endroit ou sur certains /ɔ/ de /ɔ̃ktɔ̃br/. Ce retard de l'apparition du voisement est également observable sur des consonnes nasales telles que le /m/ du /mæ̃kræ̃di/ de la 1e litanie endroit.

Le phénomène de dévoisement se produit aussi sur des consonnes occlusives comme les /d/, comme par exemple dans le /zœ̃di/ de la 3e litanie endroit. Il est apparaît aussi sur certaines consonnes fricatives telles que le /v/ de /vã̃dræ̃di/.

En terme de parole, les productions de ce sujet se caractérisent par une syncope des /r/ finaux plus forte lors des énonciations à l'endroit tandis qu'ils sont suivis d'un /ə/ ajoutés lors des énonciations envers. De manière générale, la majorité des /r/ de ce sujet sont fusionnés avec les phonèmes suivant ou précédent. Il arrive même que le premier /d/ de /vã̃dræ̃di/ soit syncopé : aucune occlusion n'est observable dans le signal.

En terme de durée totale, les litanies endroits sont plus courtes et leur longueur tend à se réduire au fur et à mesure des énonciations. Il en va tout autrement pour les énonciations à rebours : les litanies des étapes 3 et 4 sont plus longues que les autres. Pour la 3e litanie envers, cela s'explique par la présence d'une pause de plus de 4000 ms. Cette dernière est potentiellement synonyme de l'émergence d'un événement critique susceptible de générer du stress lié à la charge de travail. Le visionnage des vidéos capturées montre qu'il s'agit effectivement d'un événement critique : le sujet, circulant à 110 km/h a dû freiner à plusieurs reprises en arrivant sur un important ralentissement dont la vue était masquée par le relief de la route. Durant cette pause de plus de 4000 ms, le sujet a rétrogradé et a réduit sa vitesse de 90 km/h à 40 km/h et a seulement repris son récit lorsque le véhicule le précédant a accéléré.

Nous relevons également un nombre trois fois plus élevé de pauses inférieures à 1000 ms lors de l'énonciation à rebours des litanies à partir de l'étape 2. Ces dernières ont d'ailleurs une durée assez variable, comprise entre 100 ms et 1000 ms.

Au niveau du langage, nous constatons une erreur de production : il s'agit d'une inversion entre /mɛ/ et /avril/ qui s'est produite lors de la 4e litanie à rebours. Le sujet s'est aperçu de son erreur, la signal en ajoutant le mot /nɔ̃/ et puis la corrige en reprenant à /mɛ/. Le visionnage de la vidéo permet d'exclure un effet de la tâche de conduite : aucun événement particulier n'est à signaler.

Parmi l'ensemble de nos sujets, cet individu est celui qui a tenté de réciter les litanies le plus rapidement possible. Nous relevons que cela se manifeste par des écarts inter-syllabiques faibles, surtout en énonciation à l'endroit, mais cela n'est pas sans conséquence sur la qualité phonétique de la production : nous avons relevé plus de phénomènes de dévoisement et de fusion ou de coarticulation. La fréquence de ces phénomènes semble peu liée aux étapes du dispositif expérimental. Certaines pauses correspondent avec l'apparition de situations durant lesquelles l'émergence d'un stress induit par la charge de travail est très probable.

10.5 Analyse des résultats du sujet 11

10.5.1 Anamnèse du sujet

Le onzième sujet était âgé de 62 ans lors de l'expérience qui s'est déroulée le 21/04/2016 de 13h15 à 17h45. Il s'agit d'un conducteur expert qui possède son permis depuis plus de 40 ans, il totalise 700000 km parcourus en voiture et déclare adopter une conduite plutôt agressive : au cours de l'année précédent l'expérience, il n'a été impliqué dans aucun accident et n'a reçu aucune amende de roulage. Ses trajets quotidiens ont une longueur moyenne de 100 km et sont essentiellement autoroutiers, cet individu est habitué à évoluer dans un trafic moyennement chargé. Informaticien, il s'agit pourtant d'un néophyte dans l'interaction avec des environnements virtuels : il n'a jamais joué à aucun jeu vidéo et n'a jamais manipulé le moindre périphérique de jeu comme un volant à retour de force. Comme le sujet 5, il est classé dans le groupe 3 de notre profilage, celui qui se démarque par les excès de vitesse.

10.5.2 Evolution des performances

Au niveau de la conduite, nous observons une légère augmentation du nombre d'infractions durant les phases de conduite 2 et 3 (DT2, DT3) mais surtout un changement de leur nature en fonction de l'avancement dans les phases de conduite (voir figure 10.43). La prise en main du simulateur par cet individu inexpérimenté en manipulation des environnements virtuels a été complexe mais il s'est senti de plus en plus à l'aise au fur et à mesure qu'il l'employait. Le nombre de changements de file et d'excès de vitesse illustrent ce constat : 9 infractions relatives à l'usage des clignotants et 1 excès de vitesse ont été comptabilisés pour la 1e phase de conduite (DT1) contre 6 oublis liés à l'usage des clignotants et 8 excès de vitesse dans la dernière phase de conduite (DT5). Le niveau de charge de travail, recueilli grâce au NASA-TLX (voir figure 10.44), va dans ce sens : le sujet déclare avoir ressenti une diminution progressive de sa charge de travail : son score global pondéré passe de 56% lors de la première phase de conduite (DT1) à 44% au cours de la dernière phase de conduite (DT5) et a une valeur intermédiaire de 50% pour la phase de conduite complexe (DT3). En outre, nous remarquons que la frustration du sujet diminue progressivement et disparaît totalement aux étapes 5 et 6.

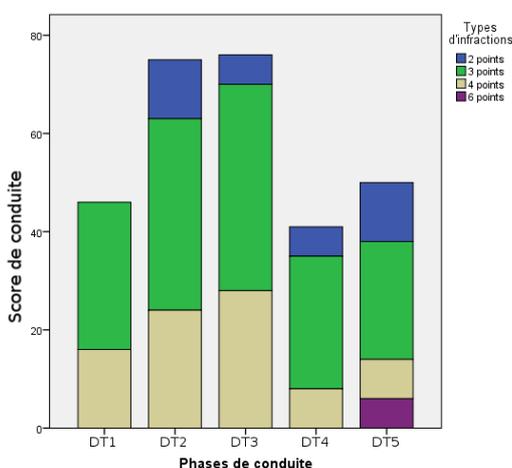


FIGURE 10.43 – Score de conduite

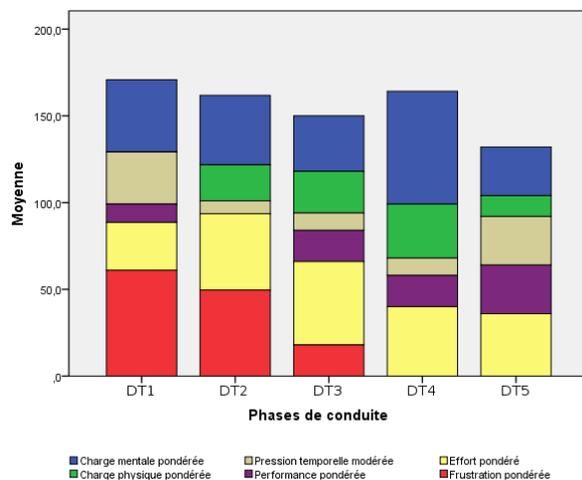


FIGURE 10.44 – Charge de travail

En ce qui concerne la tâche d'opération span, nous remarquons, hormis pour l'étape 3 (DT2), une diminution progressive des temps de réaction : ceux-ci ont une médiane comprise entre 5394 ms et 6637 ms selon les étapes de l'expérience (voir figure 10.45). Les différences observées ne sont néanmoins pas significatives ($H(6, N=42) = 9.205, p = .162$). Au niveau du taux de réussite (voir figure 10.45), le sujet a correctement répondu à tous les énoncés lors des deux dernières étapes (DT5, TS2) et a passé ou s'est trompé au moins une fois dans toutes les autres étapes.

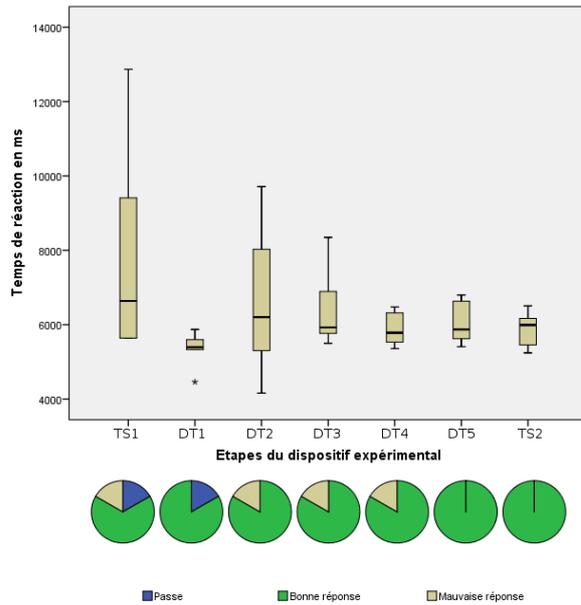


FIGURE 10.45 – Operations span

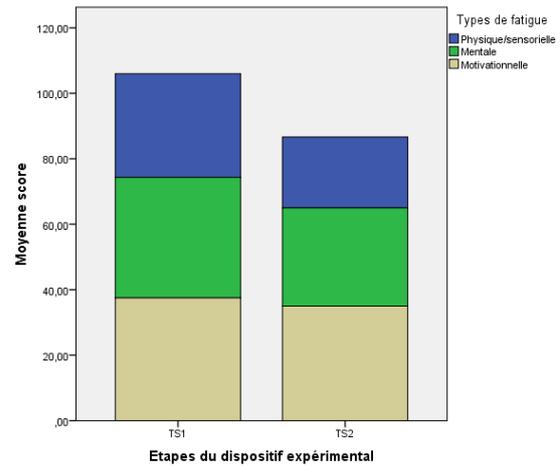


FIGURE 10.46 – Fatigue ressentie

Les résultats aux tests attentionnels pratiqués avant et après les phases de conduite montrent une diminution non significative ($U = 38723.0, p = .169$) du temps de réaction médian (-30 ms), le taux de réussite diminuant un peu également (de 97% à 96%). Grâce à l'analyse approfondie de l'évolution des 3 scores attentionnels, dont les résultats sont synthétisés à la table 10.21, nous observons une dégradation du score d'alerte : de nouveau, celle-ci doit être relativisée : elle s'explique par une réduction des temps de réaction en condition sans indicage. Nous pouvons toutefois remarquer que ce sujet est pénalisé par le double indicage. Le score d'orientation varie peu mais les temps de réaction dans les deux conditions d'indicage ont diminué d'environ 40 ms. Enfin, le score du contrôle exécutif diminue pratiquement de moitié : cette amélioration est due à la chute des temps de réaction en condition divergente, nous sommes donc vraiment en mesure d'affirmer que le contrôle exécutif de l'attention était plus performant à la fin de l'expérience qu'au début.

Scores	Conditions	Passation TS1	Passation TS2
Alerte	Pas d'indice	846 ms	824 ms
	Double indice	888 ms	892 ms
	Score	-42 ms	-68 ms
Orientation	Indice central	851 ms	815 ms
	Indice spatial	846 ms	817 ms
	Score	+5 ms	-2 ms
Contrôle exécutif	Divergent	996 ms	919 ms
	Convergent	825 ms	830 ms
	Score	+171 ms	+89 ms

TABLE 10.21 – Evolution des scores attentionnels

Ce sujet déclare d'ailleurs se sentir moins fatigué à la fin de l'expérience (voir figure 10.46) : son indice de fatigue global diminue de 8%, sa fatigue physique est un peu

plus faible (-10%), tout comme sa fatigue mentale (-7%) et sa motivation s'accroît (+3%).

Ce sujet est un cas d'étude intéressant car, contrairement aux autres, ses performances de conduite ont augmenté au fur et à mesure qu'il s'habitue au simulateur, sa frustration a diminué et il a progressivement adopté une conduite de plus proche de ses pratiques réelles, ce qui s'est traduit par un changement de la nature des infractions commises. Il déclare se sentir moins fatigué à la fin de l'expérience : bien que cela paraisse peu probable, force est de constater que ses performances au second test attentionnel témoignent d'une légère progression, ce qui donne du crédit aux déclarations du sujet.

10.5.3 Analyse des litanies

Evolution de la fréquence fondamentale

L'analyse de variance à deux critères croisés appliquée sur la fréquence fondamentale exprimée en valeur harmonique indique la présence d'un effet des étapes, du sens d'énonciation et d'un effet d'interaction. Etant donné le non respect des conditions d'application, nous rapportons les résultats des tests non paramétriques.

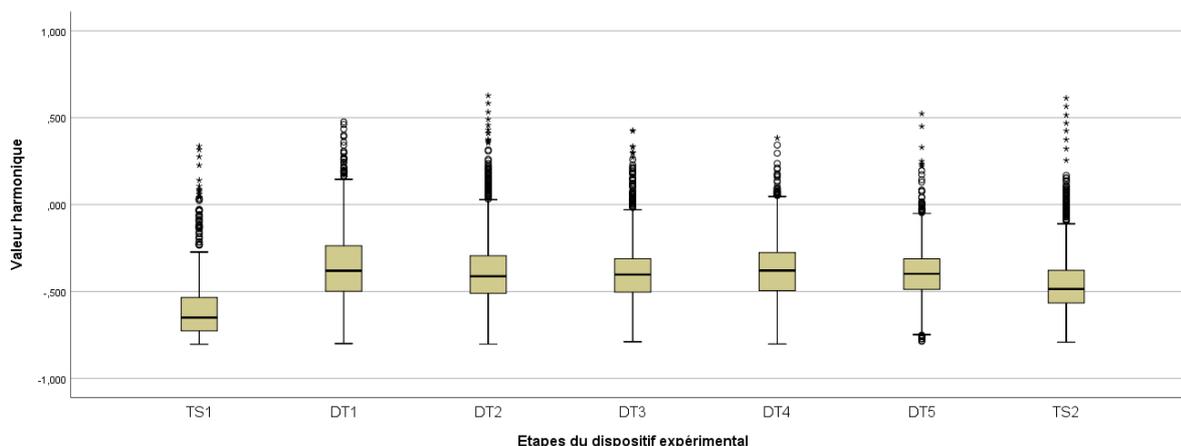


FIGURE 10.47 – Distribution de F0 exprimée en VH par étapes

Un test de Kruskal-Wallis confirme l'effet des étapes ($H(6) = 1383.971$, $p < .001$). La figure 10.47 et des tests de Mann-Whitney, dont les résultats sont synthétisés à la table 10.22, montrent que F0 est la plus élevée lors des étapes 2 et 5 (DT1, $rm = 5302.70$; DT4, $rm = 5227.37$). Il n'existe pas de différences significatives de fréquence fondamentale entre les étapes 3, 4 et 6 (DT2, $rm = 4898.10$; DT3, $rm = 4955.16$; DT5, $rm = 5056.57$). F0 est statistiquement plus basse lorsque les litanies ont été énoncées de façon isolée aux étapes 1 et 7 (TS1, $rm = 1888.14$; TS2, $rm = 3997.83$). Signalons que la fréquence fondamentale est statistiquement inférieure lors de première énonciation (TS1).

DT1	U= 228875.5 p< .001					
DT2	U= 241601.5 p< .001	U= 829443.5 p< .001				
DT3	U= 245080.5 p< .001	U= 940146.0 p< .001	U= 1016577.5 p= .611			
DT4	U= 228598.0 p< .001	U= 922104.5 p= .194	U= 870866.5 p= .001	U= 987230.5 p= .001		
DT5	U= 215498.5 p< .001	U= 897033.5 p= .001	U= 929419.0 p= .125	U= 1062286.0 p= .265	U= 942025.0 p= .011	
TS2	U= 247274.5 p< .001	U= 546732.5 p< .001	U= 594663.0 p< .001	U= 652631.5 p< .001	U= 565147.0 p< .001	U= 587136.5 p< .001
	TS1	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5

TABLE 10.22 – Comparaison de la VH pour les étapes prises 2 à 2

Cette fois, l'effet du sens d'énonciation de la litanie sur la fréquence fondamentale est à la limite de la significativité ($U= 10303441$, $p= .054$) : F_0 est à peine supérieure lors de l'énonciation à rebours (endroit, $rm= 4542.32$; envers, $rm= 4649.00$).

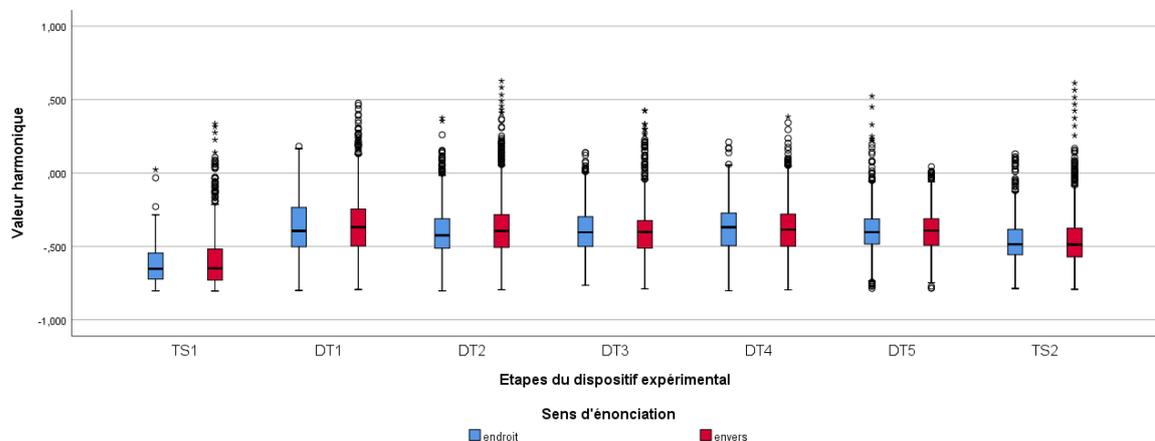


FIGURE 10.48 – Distribution de F_0 par sens d'énonciation au sein de chaque étape

Comme l'illustrent la figure 10.48 et la table 10.23, la fréquence fondamentale diffère uniquement en fonction du sens d'énonciation des litanies au sein de l'étape 3 (DT2) : elle est plus élevée lorsque l'énonciation a lieu à rebours.

TS1	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	TS2
U= 125341.0 p= .285	U= 220359.0 p= .172	U= 209003.5 p= .011	U= 277463.5 p= .135	U= 237178.5 p= .456	U= 250263.5 p= .636	U= 153184.0 p= .685

TABLE 10.23 – Comparaison de F_0 selon le sens d'énonciation au sein des étapes

Si l'effet des étapes sur l'évolution de la fréquence fondamentale est net, F_0 étant plus élevée en condition de double tâche, il en va autrement pour l'effet du sens d'énonciation des litanies. Cet effet, très robuste chez les autres individus est bien plus faible chez ce sujet : la fréquence fondamentale est plus élevée au sein de seulement une étape. Ce constat est interpellant mais nous pouvons avancer une piste d'explication en lien avec l'expertise du sujet : ce dernier, se déplaçant beaucoup pour son travail, a pour habitude de tenir des conversations téléphoniques lors de ses trajets en voiture.

Evolution de la fluence

L'analyse de variance à deux critères croisés appliquée sur l'écart inter-syllabique nous informe de l'absence de tout effet. Etant donné les non respect des conditions d'application, nous rapportons les résultats des tests non paramétriques.

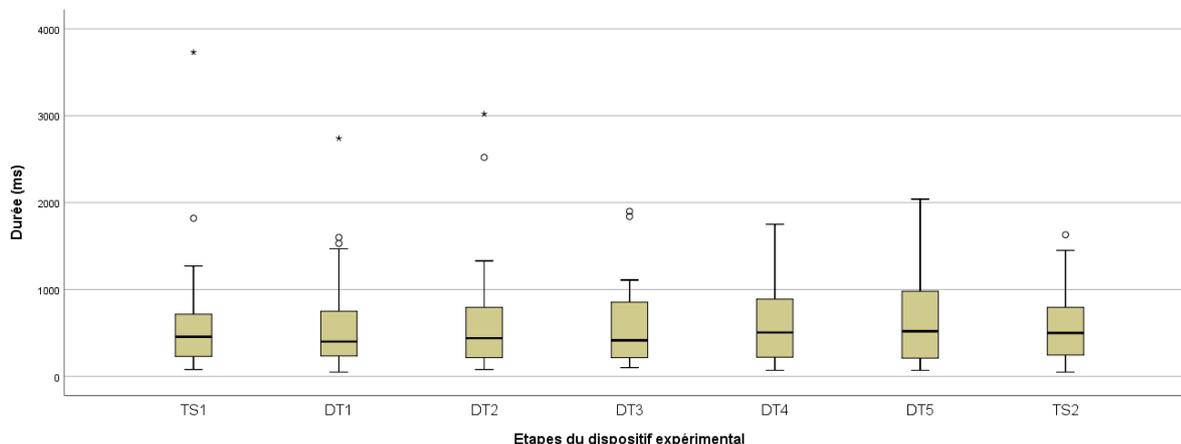


FIGURE 10.49 – Distribution des écarts inter-syllabiques par étapes

L'absence d'effet des étapes sur l'écart inter-syllabique suggérée par la figure 10.49, est confirmée par un test de Kruskal-Wallis ($H(6) = 3.266$, $p < .775$).

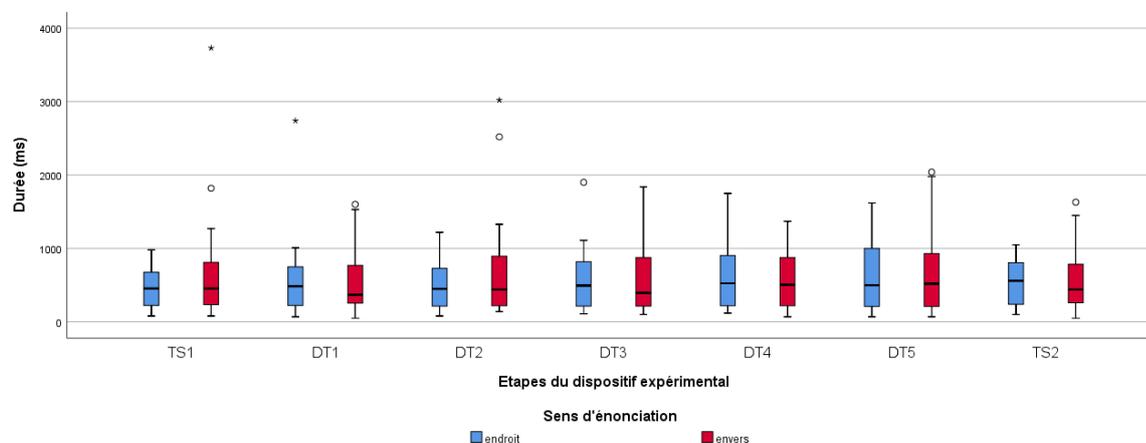


FIGURE 10.50 – Distribution des EIS par sens d'énonciation au sein de chaque étape

De même, aucun effet global du sens d'énonciation des litanies n'est observé ($U = 30017.0$, $p = .288$). Cette absence d'effet du sens d'énonciation des litanies est confirmée au sein de chacune des étapes, comme nous pouvons le voir à la figure 10.50 et à la table 10.24.

TS1	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	TS2
U= 587.5	U= 640.0	U= 579.0	U= 611.0	U= 641.5	U= 606.0	U= 647.5
p= .495	p= .928	p= .437	p= .677	p= .942	p= .636	p= .996

TABLE 10.24 – Comparaison des EIS selon le sens d'énonciation au sein des étapes

De manière générale, nous constatons une réduction progressive des données extrêmes d'EIS : en fait, la distribution des écarts inter-syllabiques tend à se normaliser au fur et à mesure de l'avancement de l'expérience, traduisant une fluence de plus en plus stable. Un premier regard aux prosogrammes tracés aux figures 10.51 et 10.52 souligne cette tendance.

La production des litanies par ce sujet est bien singulière : aucun effet n'est observé sur les écarts inter-syllabiques. La fluence est très régulière tout au long des énonciations, indépendamment du sens dans lequel elles sont récitées. Nous suspectons l'adoption d'une stratégie de régulation du débit lors du récit des litanies.

Exploration visuelle des prosogrammes

Au niveau de la voix, nous notons quelques envolées de la fréquence fondamentale sur le /e/ de /ʒãvje/ sur la majorité des litanies récitées à rebours. Cette tendance ne se vérifie pas sur les énonciations endroits.

Nous observons de nombreux dévoisements : principalement sur les /i/ finissant les jours de la semaine et ce dans les deux sens d'énonciation. Nous relevons également des apparitions tardives du voisement sur certains /a/ de /avril/, à nouveau dans les deux sens. Des variations de F0 importantes sont observables au sein de la voyelle /u/ de certains /ut/ lors des énonciation à l'endroit.

Au niveau de la parole, plusieurs éléments sont remarquables : d'abord, la durée totale des litanies endroits et envers diffère peu. Cela s'explique largement par la stratégie de régulation adoptée par ce sujet lors des énonciations : ce dernier maîtrise son rythme d'élocution en recourant à de nombreuses pauses d'une durée proche de 500 ms. Cette régularité des pauses est très visible sur les prosogrammes reproduits aux figures 10.51 et 10.52.

Il est néanmoins intéressant de relever la présence de certaines pauses plus longues sur les litanies à rebours. Ainsi, lors du premier récit de la litanie envers, deux pauses supérieures à 1000 ms sont observables, elles correspondent à un temps de réflexion du sujet.

En outre, Le visionnage des vidéos offre un éclairage supplémentaire : la pause de plus de 2500 ms apparue entre /ʒyẽ/ et /mɛ/ s'explique par un mauvaise manipulation de la boîte de vitesse : le sujet a raté le passage du 4e au 5e rapport, la boîte étant restée en position neutre. Rapidement, le sujet s'aperçoit qu'il accélère dans le vide et enclenche correctement la 5e vitesse. Cette pause correspond au temps que le sujet a accordé au diagnostic du comportement de la voiture. Cet événement critique met à mal la régulation du rythme dans la suite de l'énonciation de la litanie. Nous retrouvons une perturbation similaire du rythme de la litanie lors de la 6e énonciation à rebours : cette fois, c'est le fait que le sujet ait dû freiner entre /ɔktɔbr/ et /ut/ qui va ébranler sa régulation du rythme durant la suite de la litanie.

Remarquons enfin que ce sujet syncope systématiquement toutes les consonnes occlusives /p/ de /septãbr/. Plus intéressant, il réalise la consonne occlusive /t/ de /ut/ uniquement en condition de double tâche lors de litanies à l'envers. Ces productions du /t/ sont d'ailleurs remarquables par la durée de leur explosion.

Enfin, au niveau du langage, nous n'avons relevé aucune erreur chez ce sujet.

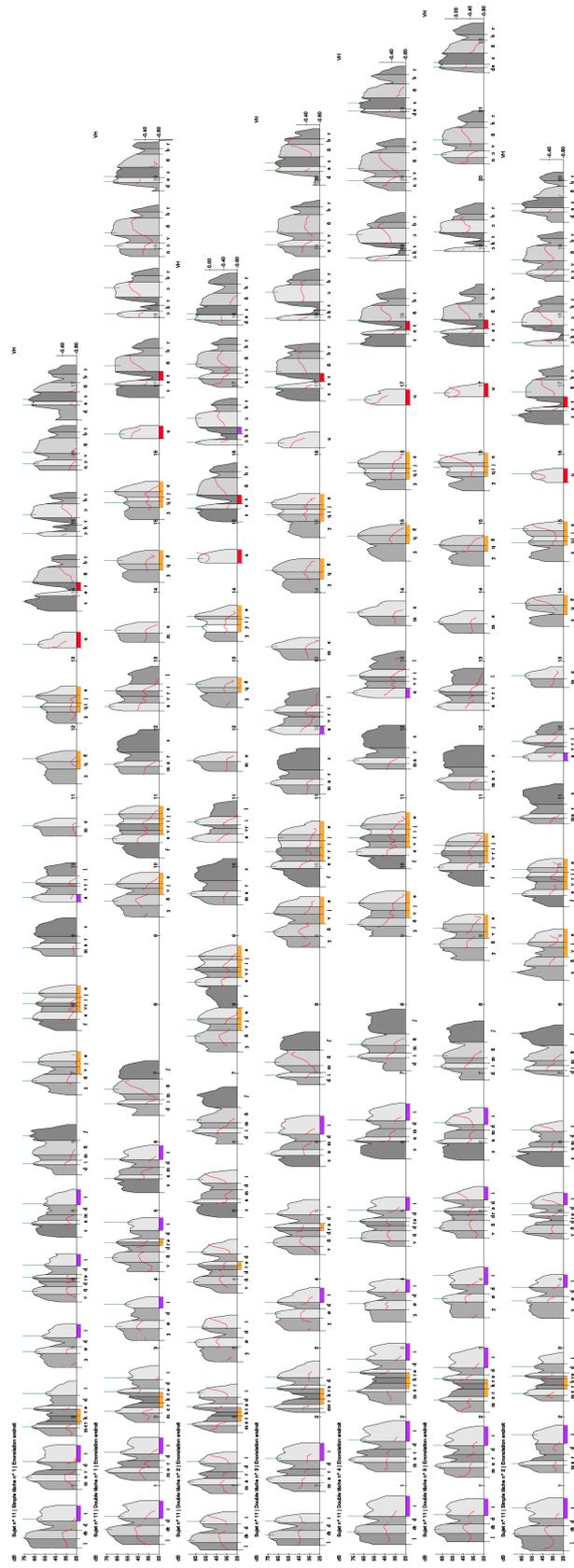


FIGURE 10.51 – Prosogrammes des litanies énoncées à l'endroit

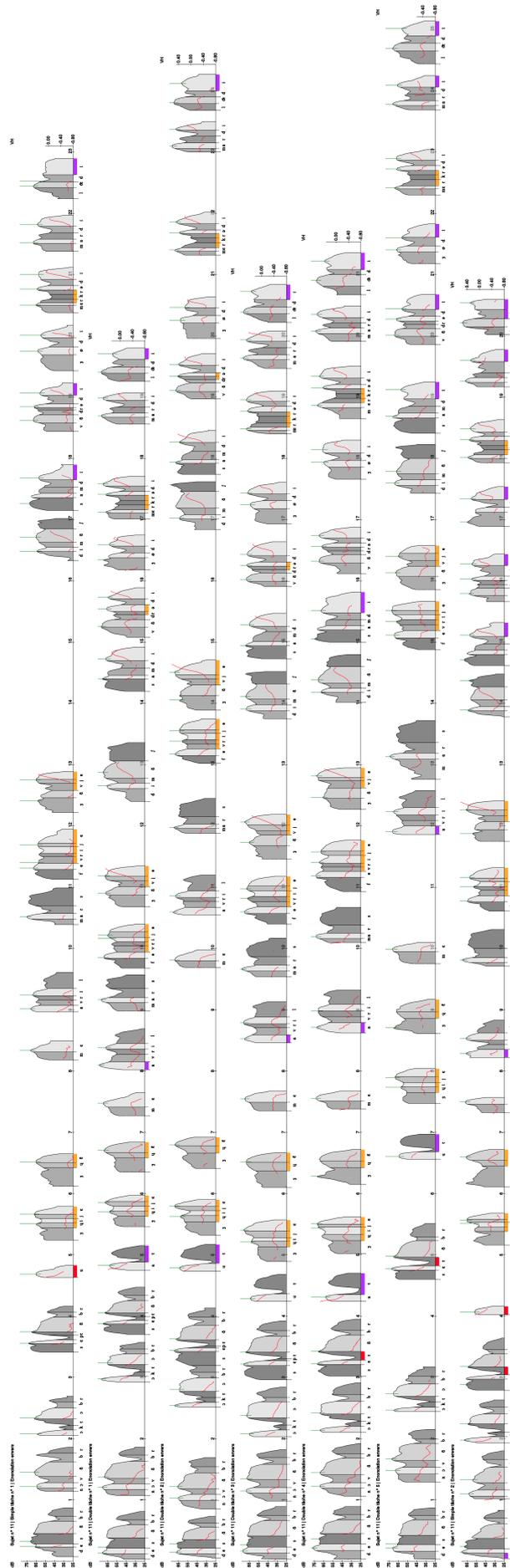


FIGURE 10.52 – Prosogrammes des litanies énoncées à l’envers

En conclusion, nous pouvons affirmer que ce sujet fait preuve d'une grande maîtrise de sa fluence durant le récit des litanies, indépendamment de leur sens d'énonciation. La régulation de son rythme nous fait penser à celle d'un métronome. Signalons néanmoins qu cette stratégie de régulation du débit est perturbée par le stress induit par la charge de travail, plus précisément par la focalisation de l'attention sur un événement critique.

10.6 Synthèse et discussion des résultats

L'étude de cas des 5 sujets retenus nous apporte un éclairage neuf sur les constats relevés à l'issue des analyses globales.

Ces analyses individuelles confirment les constats des analyses globales : la fréquence fondamentale s'avère être un bon indicateur du stress induit par la charge de travail : chez chacun des 5 sujets, nous relevons des valeurs de F0 supérieures en condition de double tâche lorsque les sujets conduisent et récitent les litanies. Toutefois, comme (Hansen et al., 2000) le mentionnent, cette tendance générale ne se vérifie pas chez tous les sujets : le sujet 3 a obtenu des valeurs de F0 plus basses lors de la dernière phase de conduite (étape 6, DT-5) tandis que le sujet 6 présente des valeurs de F0 les plus élevées lors de ses énonciations effectuées à la dernière étape, soit en condition simple sans charge de travail ajoutée. Des observations allant dans le même sens ont aussi été rapportées par (Ruiz et al., 1996 ; Huttunen et al., 2011 ; Giddens et al., 2013).

Compte non-tenu de ces quelques exceptions, nous pouvons considérer que la fréquence fondamentale permet de discriminer les énonciations récitées avec et sans tâche de conduite. Par contre, F0 ne semble pas être capable de différencier les phases de conduite entre-elles : la fréquence fondamentale n'évolue pas de façon linéaire avec l'augmentation de la difficulté de la tâche, ce constat rejoint celui de Johannes et al. (2007) qui ont montré que la fréquence fondamentale ne suit pas une évolution linéaire en fonction de la charge de cognitive.

Nous sommes en mesure d'avancer plusieurs pistes d'explication : comme l'illustre notre schéma décrivant la dynamique du stress engendré par la charge de travail, disponible à la figure 3.3, la charge de la tâche n'est qu'un des paramètres influençant les appréciations cognitives réalisées par chaque individu. Par exemple, la mise en œuvre de certaines stratégies de coping centrées sur la tâche, telles que la régulation de la vitesse ou le choix de la bande de circulation ont atténué ou augmenté la charge de la tâche. A ces stratégies, certains individus, comme le sujet 3, en ont ajouté d'autres centrées sur les émotions : elles visaient à réguler par exemple la respiration. A titre d'exemple, citons le nombre élevé de pauses d'une durée relativement homogène lors des énonciations des litanies par le sujet 3 à l'étape 6 (DT-5).

Le sens d'énonciation de la litanie a engendré un effet très robuste sur la fréquence fondamentale, celle-ci est plus élevée lors du récit à rebours dans quasiment tous les cas. La charge cognitive est plus élevée lors de l'énonciation à rebours car le contrôle exécutif doit inhiber l'ordre naturel de la litanie. Nos résultats vont dans la même direction que ceux de Mendoza et al. (1999) dont les sujets avaient déclarés ressentir une forte charge cognitive lors du récit à l'envers. Toutefois, dans quelques cas, cette différence de F0 disparaît, voire même, s'inverse. Ainsi, chez le sujet 11, l'effet du sens d'énonciation de la litanie sur la fréquence fondamentale est à la limite de la significativité : il est manifeste uniquement lors de la 3e étape (DT2). F0 est statistiquement plus haute en énonciation endroit lors de la 7e étape chez le sujet 3.

Afin d'aller plus loin dans notre réflexion, nous avons segmenté les litanies et les avons représentées sous forme de prosogrammes. Ceux-ci mettent en avant d'autres éléments potentiellement pertinents à propos de F0. Tout d'abord, nous avons noté de nombreux dévoisements, principalement sur la dernière voyelle lors des énonciations à rebours. Ces dévoisements s'expliquent le plus souvent par le fait que les sujets soupiraient à la fin des litanies. Des apparitions tardives du voisement sont aussi notables, principalement chez le sujet 6.

Toutes ces informations ne sont bien sûr pas prises en compte dans l'évolution des valeurs de la fréquence fondamentale puisque les plis vocaux ne vibrent pas. Cependant, nous pensons que ces informations sont sans doute très porteuses de sens, notre avis est conforté par les conclusions de MacPherson et al. (2016) indiquant que F0 n'est pas un bon prédicteur de la charge cognitive alors que la qualité vocale semble être plus affectée par des variations de la charge cognitive.

A ce propos, nous avons aussi relevé des micro-variations de la fréquence fondamentale au sein de plusieurs phonèmes voisés, ces phénomènes sont très présents chez le sujet 6. Au travers de leur indice μ , Ruiz et al. (1996) ont déjà investigué ces micro-variations sur des voyelles en rapportant la valeur de F0 au centre la voyelle sur celles mesurées au début et à la fin de cette voyelle. Nous avons relevé ce phénomène sur d'autres phonèmes que sur des voyelles, notamment sur des consonnes fricatives voisées et sur des semi-consonnes. Pour peu que ces micro-variations de F0 ne soient pas dues à des artefacts de l'algorithme d'extraction, nous pourrions investiguer plus finement ces micro-variations que l'indice proposé par Ruiz et al. (1996) en moyennant la distance séparant chaque valeur de F0 de la droite reliant les valeurs de F0 du début et la fin de chaque phonème voisé. Notons tout de même que nos premières observations ne nous autorisent pas affirmer que ces micro-variations sont plus présentes sous l'effet du stress engendré par la charge de travail mais cette hypothèse reste ouverte et constitue une perspective intéressante.

Au niveau des macro-variations de la fréquence fondamentale, nous avons observé, pour chaque sujet, quelques envolées de F0 : elles se sont produites principalement sur la voyelle de la dernière syllabe précédant une pause ou sur le premier phonème voisé suivant une pause. Ces envolées se traduisent par des valeurs extrêmes qui ont tendance à attirer des indices comme la moyenne, souvent utilisée dans les travaux scientifiques passés en revue dans ce document. Même si la fréquence fondamentale semble être un prédicteur robuste du stress engendré par la charge de travail (Giddens et al., 2013), nous constatons, grâce aux prosogrammes, que l'étude de la prosodie demeure importante, c'est pourquoi nous avons analysé, dans un second temps, l'évolution de l'écart inter-syllabique.

Chapitre 11

Discussion générale

à venir...

Références

- Abercrombie, D. (1967). *Elements of general phonetics*. Aldine Pub. Company.
- Alvear, R. M. B. d., Barón-López, F. J., Alguacil, M. D., & Dawid-Milner, M. S. (2013, juillet). Interactions between voice fundamental frequency and cardiovascular parameters. Preliminary results and physiological mechanisms. *Logopedics Phoniatrics Vocology*, 38(2), 52–58. Consulté le 2016-02-05, sur <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.3109/14015439.2012.696140> doi: 10.3109/14015439.2012.696140
- Anderson, J. R. (1996). ACT : A simple theory of complex cognition. *American Psychologist*, 51(4), 355–365. doi: 10.1037/0003-066X.51.4.355
- Augustinova, M., & Ferrand, L. (2007). Influence de la présentation bicolore des mots sur l'effet Stroop. *L'année psychologique*, 107(02), 163–179. Consulté le 2017-02-01, sur <http://www.necplus.eu/action/displayAbstract?aid=2424608&fileid=S0003503307002011>
- Baber, C., & Noyes, J. (1996). Automatic speech recognition in adverse environments. *Human factors*, 38(1), 142–155. Consulté le 2017-02-10, sur <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1518/001872096778940840>
- Baddeley, A. D. (1986). *Working memory* (Vol. 11). Oxford University Press.
- Barrouillet, P., Bernardin, S., & Camos, V. (2004). Time Constraints and Resource Sharing in Adults' Working Memory Spans. *Journal of Experimental Psychology : General*, 133(1), 83–100. Consulté le 2015-09-29, sur <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0096-3445.133.1.83> doi: 10.1037/0096-3445.133.1.83
- Beaulieu-Prévost, M. V. D., Ouellette, A., & Achille, M. (2005). Analyse de classification hiérarchique et qualité de vie. *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology*, 1(1), 25–30. doi: 10.20982/tqmp.01.1.p025
- Boë, L.-J., & Tubach, J. P. (1992). *De A à zut : dictionnaire phonétique du français parlé*. Grenoble : ELLUG.
- Brookhuis, K. A., & de Waard, D. (2010, mai). Monitoring drivers' mental workload in driving simulators using physiological measures. *Accident Analysis & Prevention*, 42(3), 898–903. Consulté le 2017-01-18, sur <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000145750900116X> doi: 10.1016/j.aap.2009.06.001
- Bruchon-Schweitzer, M., & Boujut, E. (2016). *Psychologie de la santé*. Dunod. (OCLC : 947338433)
- Bruyninckx, M., & Harmegnies, B. (1994). Evolution temporelle de la variabilité du spectre moyen à long terme. *Le Journal de Physique IV*, 4(C5), C5–521.
- Cannon, W. B. (1932). *The wisdom of the body*. W.W. Norton & Company, inc.
- Cegarra, J., & Morgado, N. (2009). Étude des propriétés de la version francophone du NASATLX. In *Communication présentée à la cinquième édition du colloque de psychologie ergonomique (Epique)*. Consulté le 2015-08-27, sur http://webcom.upmf-grenoble.fr/lpnc/IMG/pdf/Cegarra_Morgado_2009_EPIQUE_.pdf
- Chanquoy, L., Tricot, A., & Sweller, J. (2007). *La charge cognitive : théorie et applications*. Paris : Armand Colin.

- Cowie, R., & Cornelius, R. R. (2003, apr). Describing the emotional states that are expressed in speech. *Speech Communication*, 40(1-2), 5-32. Consulté le 2015-06-05, sur <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167639302000717> doi: 10.1016/S0167-6393(02)00071-7
- Cox, T., & Mackay, C. (1978). A psychological model of occupational stress. In T. Cox (Ed.), *Stress*. Baltimore, Maryland : University Park Press.
- da Silva, F. P. (2014). Mental workload, task demand and driving performance : What relation? *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 162(0), 310 - 319. Consulté sur <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042814063137> ({XVIII} Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito, Transporte y Logística (PANAM 2014)) doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.12.212>
- Demberg, V., & Sayeed, A. (2016, janvier). The Frequency of Rapid Pupil Dilations as a Measure of Linguistic Processing Difficulty. *PLOS ONE*, 11(1), e0146194. Consulté le 2016-02-17, sur <http://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0146194> doi: 10.1371/journal.pone.0146194
- de Waard, D. (1996). *The measurement of drivers' mental workload* (Thèse de doctorat non publiée). Rijksuniversiteit Groningen. (OCLC : 246923858)
- Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(1), 32-64. doi: 10.1518/001872095779049543
- Engelhardt, P. E., Ferreira, F., & Patsenko, E. G. (2010, avril). Pupillometry reveals processing load during spoken language comprehension. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 63(4), 639-645. Consulté le 2016-04-11, sur <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17470210903469864> doi: 10.1080/17470210903469864
- Fan, J., McCandliss, B. D., Sommer, T., Raz, A., & Posner, M. I. (2002). Testing the efficiency and independence of attentional networks. *Journal of cognitive neuroscience*, 14(3), 340-347.
- Faure, V., Lobjois, R., & Benguigui, N. (2016). The effects of driving environment complexity and dual tasking on drivers' mental workload and eye blink behavior. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 40, 78 - 90. Consulté sur <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369847816300171> doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trf.2016.04.007>
- Fernandez, R., & Picard, R. W. (2003). Modeling drivers' speech under stress. *Speech Communication*, 40(1-2), 145 - 159. Consulté sur <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167639302000808> doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6393\(02\)00080-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6393(02)00080-8)
- Folkman, S. (2008, janvier). The case for positive emotions in the stress process. *Anxiety, Stress, & Coping*, 21(1), 3-14. Consulté sur <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10615800701740457> doi: 10.1080/10615800701740457
- Frankenhaeuser, M., & Arbetsmiljöfonden. (1989). *Stress, health, job satisfaction : a summary of research projects on stress and the psychological work environment, led by marianne frankenhaeuser*. Arbetsmiljöfonden.
- Gaillard, A., & Wientjes, C. J. E. (1994). Mental load and work stress as two types of energy mobilization. *Work & Stress*, 8(2), 141-152. Consulté sur <http://dx.doi.org/10.1080/02678379408259986> doi: 10.1080/02678379408259986
- Garcia-Debanc, C., & Fayol, M. (2002). Des modèles psycholinguistiques du processus rédactionnel pour une didactique de la production écrite. *Repères, recherches en didactique du français langue maternelle*, 26(1), 293-315. Consulté le 2017-04-08,

- sur http://www.persee.fr/doc/reper_1157-1330_2002_num_26_1_2409
- Giddens, C. L., Barron, K. W., Byrd-Craven, J., Clark, K. F., & Winter, A. S. (2013). Vocal indices of stress : A review. *Journal of Voice*, 27(3), 390.e21 - 390.e29. Consulté sur <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892199712002354> doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvoice.2012.12.010>
- Gledhill, J., Rodary, C., Mahe, C., & Laizet, C. (2002, mars). Validation française de l'échelle de fatigue révisée de Piper. *Recherche en soins infirmiers*(68), 50–65.
- Guillet, L. (2012). *Le stress* (Première Édition éd.). Bruxelles : De Boeck.
- Guzman, M., Correa, S., Muñoz, D., & Mayerhoff, R. (2013, janvier). Influence on Spectral Energy Distribution of Emotional Expression. *Journal of Voice*, 27(1), 129.e1–129.e10. Consulté le 2015-06-08, sur <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0892199712001427> doi: 10.1016/j.jvoice.2012.08.008
- Hagmueller, M., Rank, E., & Kubin, G. (2006, décembre). *Evaluation of the Human Voice for Indications of Workload-induced Stress in the Aviation Environment* (Rapport technique N° EEC Note No. 18/06). EUROCONTROL.
- Hansen, J., Swail, C., South, A., Moore, H., Steeneken, H., Cupples, E., ... Verlinde, P. (2000). *The impact of speech under "stress" on military speech technology = l'impact de la parole en condition de "stress" sur les technologies vocales militaires*. Neuilly-sur-Seine Cedex, France : RTO/NATO.
- Harmegnies, B. (1992). Sources of variations in long term speech spectra : literature review. *Canadian Acoustics*, 20(2), 9–35. Consulté le 2015-06-28, sur <http://jcaa.caa-aca.ca/index.php/jcaa/article/view/708>
- Harmegnies, B. (2015). La « voix » : miroir de l'âme, miroir déformant ou miroir aux alouettes? In *Académie royale de belgique*. Bruxelles.
- Harmegnies, B., & Landercy, A. (1992). A multivariate approach for the analysis of speech under cognitive stress. In *Proceedings of the esca workshop "speech processing in adverse conditions"* (pp. 231–234). Nice.
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (2005). Results of empirical and theoretical research. *Ergonomics : Skill, displays, controls, and mental workload*, 2, 408.
- Holmqvist, S., Santtila, P., Lindström, E., Sala, E., & Simberg, S. (2013, novembre). The Association Between Possible Stress Markers and Vocal Symptoms. *Journal of Voice*, 27(6), 787.e1–787.e10. Consulté le 2017-01-04, sur <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0892199713001343> doi: 10.1016/j.jvoice.2013.06.012
- Horrey, W. J., Lesch, M. F., Garabet, A., Simmons, L., & Maikala, R. (2016). Distraction and task engagement : How interesting and boring information impact driving performance and subjective and physiological responses. *Applied Ergonomics*, 58, 342 - 348. Consulté sur <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003687016301429> doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2016.07.011>
- Huttunen, K., Keränen, H., Väyrynen, E., Pääkkönen, R., & Leino, T. (2011, janvier). Effect of cognitive load on speech prosody in aviation : Evidence from military simulator flights. *Applied Ergonomics*, 42(2), 348–357. Consulté le 2015-05-05, sur <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003687010001195> doi: 10.1016/j.apergo.2010.08.005
- Ibeas, A., Moura, J. L., dell'Olio, L., Alonso, B., da Silva, F. P., Santos, J. A., & Meireles, A. (2014). XVIII congreso panamericano de ingeniería de tránsito, transporte y logística (panam 2014) road accident : Driver behaviour, learning and driving task. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 162, 300 - 309. Consulté sur <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042814063125> doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.12.211>

- ISO. (1991). *Principes ergonomiques concernant la charge de travail mental – Termes généraux et leurs définitions* (N° 10075). Genève. Consulté le 2017-04-04, sur <https://www.iso.org/fr/standard/18045.html>
- Johannes, B., Wittels, P., Enne, R., Eisinger, G., Castro, C., Thomas, J., ... Gerzer, R. (2007). Non-linear function model of voice pitch dependency on physical and mental load. *European Journal of Applied Physiology*, 101(3), 267-276. doi: 10.1007/s00421-007-0496-6
- Juslin, P. N., & Laukka, P. (2003). Communication of emotions in vocal expression and music performance : Different channels, same code? *Psychological bulletin*, 129(5), 770.
- Kagan, A. R., & Levi, L. (1975). Health and environment-psychosocial stimuli. A review. In L. Levy (Ed.), *Society, stress and disease - Childhood and Adolescence* (Vol. II). Oxford : Oxford University Press.
- Khawaja, M. A., Chen, F., Owen, C., & Hickey, G. (2009). Cognitive Load Measurement from User's Linguistic Speech Features for Adaptive Interaction Design. In T. Gross et al. (Eds.), *Human-Computer Interaction – INTERACT 2009* (pp. 485–489). Springer Berlin Heidelberg.
- Krajewski, J., Batliner, A., & Golz, M. (2009). Acoustic sleepiness detection : Framework and validation of a speech-adapted pattern recognition approach. *Behavior Research Methods*, 41(3), 795-804. Consulté sur <http://dx.doi.org/10.3758/BRM.41.3.795> doi: 10.3758/BRM.41.3.795
- Krajewski, J., & Kröger, B. J. (2007). Using prosodic and spectral characteristics for sleepiness detection..
- Krajewski, J., Schnieder, S., Sommer, D., Batliner, A., & Schuller, B. (2012, mai). Applying multiple classifiers and non-linear dynamics features for detecting sleepiness from speech. *Neurocomputing*, 84, 65–75. Consulté le 2015-06-08, sur <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925231211007399> doi: 10.1016/j.neucom.2011.12.021
- Ladefoged, P. (2006). *A course in phonetics* (5th ed éd.). [Southbank, Victoria,] Australia ; Boston, MA : Thomson, Wadsworth.
- Landercy, A., & Renard, R. (1977). *Éléments de phonétique* (1. éd éd.). Mons : Centre International de Phonétique Appliquée. (OCLC : 10489010)
- Lazarus, R., & Folkman, S. (1984). *Stress, Appraisal, and Coping*. Springer.
- Le, P. N., Ambikairajah, E., Epps, J., Sethu, V., & Choi, E. H. (2011, avril). Investigation of spectral centroid features for cognitive load classificationst. *Speech Communication*, 53(4), 540–551. Consulté sur <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167639311000069> doi: 10.1016/j.specom.2011.01.005
- Leclercq, P., & Zimmermann, P. (2000). L'évaluation des fonctions attentionnelles. In x. Seron & M. Van der Linden (Eds.), *Traité de neuropsychologie* (p. 95-114). Solal.
- Lin, C. J., Lin, P.-H., Chen, H.-J., Hsieh, M.-C., Yu, H.-C., Wang, E. M.-Y., & Ho, H. L. C. (2012, novembre). Effects of controller-pilot communication medium, flight phase and the role in the cockpit on pilots' workload and situation awareness. *Safety Science*, 50(9), 1722–1731. Consulté le 2015-05-04, sur <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092575351200094X> doi: 10.1016/j.ssci.2012.04.007
- Lundberg, U. (2002, mai). Psychophysiology of work : Stress, gender, endocrine response, and work-related upper extremity disorders. *American Journal of Industrial Medicine*, 41(5), 383–392. Consulté le 2015-06-02, sur <http://doi.wiley.com/10.1002/ajim.10038> doi: 10.1002/ajim.10038
- MacPherson, M. K., Abur, D., & Stepp, C. E. (2016, décembre). Acoustic Measures of Voice and Physiologic Measures of Autonomic Arousal during Speech

- as a Function of Cognitive Load. *Journal of Voice*. Consulté le 2017-01-24, sur <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0892199716303022> doi: 10.1016/j.jvoice.2016.10.021
- Maincent, A. (2001). *Le nasa tlx, traduit en français et adapté* (Rapport technique). Lyon : Laboratoire d'Etudes et d'Analyses de la Cognition et des Modèles.
- Martin, C., Hourlier, S., & Cegarra, J. (2013, décembre). La charge mentale de travail : un concept qui reste indispensable, l'exemple de l'aéronautique. *Le travail humain*, Vol. 76(4), 285–308.
- Martinet, A. (1970). *Eléments de Linguistique Générale* (ARMAND COLIN éd.). Armand Colin.
- Matthews, G., & Desmond, P. A. (2002). Task-induced fatigue states and simulated driving performance. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 55(2), 659-686. (PMID : 12047065)
- Megaw, T. (2005). The definition and measurement of mental workload. In J. R. Wilson & E. N. Corlett (Eds.), *Evaluation of human work* (3rd ed éd., p. 525-552). Boca Raton, FL : Taylor & Francis.
- Mehler, B., Reimer, B., Coughlin, J., & Dusek, J. (2009, décembre). Impact of Incremental Increases in Cognitive Workload on Physiological Arousal and Performance in Young Adult Drivers. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2138, 6–12. Consulté le 2015-12-11, sur <http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/2138-02> doi: 10.3141/2138-02
- Mendoza, T. R., Wang, X. S., Cleeland, C. S., Morrissey, M., Johnson, B. A., Wendt, J. K., & Huber, S. L. (1999). The rapid assessment of fatigue severity in cancer patients. *Cancer*, 85(5), 1186–1196.
- Mertens, P. (2004). Un outil pour la transcription de la prosodie dans les corpus oraux. *Traitement Automatique des langues*, 45(2), 109–130. Consulté le 2017-07-17, sur <http://www.academia.edu/download/30918069/ta12004.pdf>
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two : some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63(2), 81–97. doi: 10.1037/h0043158
- Mulder, G. (1986). The Concept and Measurement of Mental Effort. In G. R. J. Hockey, A. W. K. Gaillard, & M. G. H. Coles (Eds.), *Energetics and Human Information Processing* (pp. 175–198). Springer Netherlands. Consulté le 2017-04-02, sur http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-4448-0_12 (DOI : 10.1007/978-94-009-4448-0_12)
- Muller, C., Grossmann-Hutter, B., Jameson, A., Rummer, R., & Wittig, F. (2001). Recognizing time pressure and cognitive load on the basis of speech : An experimental study. In M. Bauer, P. Gmytrasiewicz, & J. Vassileva (Eds.), *User modeling 2001* (Vol. 2109, p. 24-33). Springer Berlin Heidelberg.
- Murray, I. R., Baber, C., & South, A. (1996). Towards a definition and working model of stress and its effects on speech. *Speech Communication*, 20(1–2), 3 - 12. Consulté sur <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167639396000404> doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6393\(96\)00040-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6393(96)00040-4)
- Müller, T., Giesa, H.-G., & Anders, G. (2001, décembre). Evaluation of airborne data link communication. *Aerospace Science and Technology*, 5(8), 521–527. Consulté le 2015-11-06, sur <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963801011166> doi: 10.1016/S1270-9638(01)01116-6
- Nachreiner, F. (1999). International Standards on Mental Work-Load. *Industrial Health*, 37(2), 125–133. Consulté le 2017-04-03, sur https://www.jstage.jst.go.jp/article/indhealth1963/37/2/37_2_125/_article/-char/ja/

- New, B., Brysbaert, M., Veronis, J., & Pallier, C. (2007, octobre). The use of film subtitles to estimate word frequencies. *Applied Psycholinguistics*, *28*(04). doi: 10.1017/S014271640707035X
- Nguyen-Xuan, A. (1995). Les mécanismes cognitifs d'apprentissage. *Revue française de pédagogie*, *112*(1), 57–67. Consulté le 2015-09-25, sur http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/rfp_0556-7807_1995_num_112_1_1226 doi: 10.3406/rfp.1995.1226
- Oberauer, K. (2001). Removing irrelevant information from working memory : A cognitive aging study with the modified Sternberg task. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, *27*(4), 948–957.
- Paas, F., Tuovinen, J. E., Tabbers, H., & Van Gerven, P. W. M. (2003, mars). Cognitive Load Measurement as a Means to Advance Cognitive Load Theory. *Educational Psychologist*, *38*(1), 63–71. Consulté le 2017-02-25, sur http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1207/S15326985EP3801_8 doi: 10.1207/S15326985EP3801_8
- Patel, S., Henderson, R., Bradley, L., Galloway, B., & Hunter, L. (1991, novembre). Effect of visual display unit use on blink rate and tear stability. *Optometry and Vision Science : Official Publication of the American Academy of Optometry*, *68*(11), 888–892.
- Patel, S., Scherer, K. R., Björkner, E., & Sundberg, J. (2011, avril). Mapping emotions into acoustic space : The role of voice production. *Biological Psychology*, *87*(1), 93–98. Consulté le 2015-02-26, sur <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301051111000408> doi: 10.1016/j.biopsycho.2011.02.010
- Philippot, P. (2007). *Emotion et psychothérapie*. Editions Mardaga.
- Piccaluga, M., & Harmegnies, B. (2006). Analyse des stratégies de chunking en interprétation simultanée. In *Jep-irisa 2006* (Vol. 1). Dinard.
- Piper, B., Dibble, S., Dodd, M., Weiss, M., Slaughter, R., & Paul, S. (1998, mai). The revised Piper Fatigue Scale : psychometric evaluation in women with breast cancer. *Oncology nursing forum*, *25*(4), 677–684. Consulté le 2015-06-26, sur <http://europepmc.org/abstract/med/9599351>
- Piérart, B., & Harmegnies, B. (1993). Dysphasie simple de l'enfant et langage de la mère. *L'année psychologique*, *93*(2), 227–268. Consulté le 2016-01-26, sur http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/psy_0003-5033_1993_num_93_2_28696 doi: 10.3406/psy.1993.28696
- Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1989). *The attention system of the human brain* (Rapport technique). DTIC Document.
- Posner, M. I., & Raichle, M. E. (1994). *Images of mind*. New York, NY, US : Scientific American Library/Scientific American Books.
- Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (2007, janvier). Research on Attention Networks as a Model for the Integration of Psychological Science. *Annual Review of Psychology*, *58*(1), 1–23. Consulté le 2015-11-09, sur <http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.psych.58.110405.085516> doi: 10.1146/annurev.psych.58.110405.085516
- Romoaldo, G. (2015). *Identification et quantification de biomarqueurs d'états émotionnels*. (Poster présenté à la Matinée des Chercheurs - UMONS)
- Rosenfield, M., Jahan, S., Nunez, K., & Chan, K. (2015). Cognitive demand, digital screens and blink rate. *Computers in Human Behavior*, *51, Part A*, 403 - 406. Consulté sur <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0747563215003829> doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chb.2015.04.073>
- Roskam, A. J., Brookhuis, K. A., de Waard, D., Carlsen, O. M. J., Read, L., Jamson, S., ... Victor, T. (2002, sept). HumanMachine Interface And the Safety of traffic in

Europe : Deliverable 1 - Development of Experimental Protocol.

- Rubio, S., Díaz, E., Martín, J., & Puente, J. M. (2004). Evaluation of subjective mental workload : A comparison of SWAT, NASA-TLX, and workload profile methods. *Applied Psychology, 53*(1), 61–86. Consulté le 2015-06-13, sur <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1464-0597.2004.00161.x/full>
- Ruiz, R., Absil, E., Harmegnies, B., Legros, C., & Poch, D. (1996). Time- and spectrum-related variabilities in stressed speech under laboratory and real conditions. *Speech Communication, 20*(1–2), 111 - 129. Consulté sur <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167639396000489> (Speech under Stress) doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6393\(96\)00048-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6393(96)00048-9)
- Sander, D., & Scherer, K. (2014). *Traité de psychologie des émotions*. Dunod.
- Scherer, K. R. (2003). Vocal communication of emotion : A review of research paradigms. *Speech Communication, 40*(1–2), 227 - 256. Consulté sur <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167639302000845> doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6393\(02\)00084-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6393(02)00084-5)
- Selye, H. (1956). *The stress of life*. McGraw-Hill.
- Simpson, C. A. (1986, novembre). Speech variability effects on recognition accuracy associated with concurrent task performance by pilots. *Ergonomics, 29*(11), 1343–1357. Consulté le 2017-02-10, sur <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00140138608967250> doi: 10.1080/00140138608967250
- Slootmans, F., Dupont, E., & Silverans, P. (2011). *Risques pour les jeunes conducteurs dans la circulation : analyse des facteurs de risque pour les conducteurs de 18 à 24 ans sur la base d'une enquête concernant leur implication dans les accidents*. Institut Belge pour la Sécurité Routière.
- Sperandio, J. C. (1988). *L'ergonomie du travail mental*. Paris : Masson.
- Stavaux, L., Albart, M., Delvaux, V., Huet, K., Piccaluga, M., & Harmegnies, B. (2016). Stress, charge cognitive et signal de parole : étude exploratoire auprès de pilotes de chasse. In *Jep-taln-recital 2016* (Vol. 1). Paris.
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of experimental psychology, 18*(6), 643–662. Consulté le 2017-02-01, sur <http://psycnet.apa.org/journals/xge/18/6/643/>
- Vaissière, J. (2015). *La phonétique*. (OCLC : 974375312)
- Van der Linden, M., Meulemans, T., Seron, X., Coyette, F., Andrès, P., & Prairial, C. (2000). L'évaluation des fonctions exécutives. In x. Seron & M. Van der Linden (Eds.), *Traité de neuropsychologie* (p. 275-300). Solal.
- Viellard, S., & Bougeant, J.-C. (2005). Performances à un tâche de mémoire de travail sous induction émotionnelle négative : influence modulatrice de l'état émotionnel sur les processus exécutifs. *L'année psychologique, 105*(1), 63–104. doi: 10.3406/psy.2005.3820
- Waaramaa, T., Laukkanen, A.-M., Airas, M., & Alku, P. (2010, jan). Perception of Emotional Valences and Activity Levels from Vowel Segments of Continuous Speech. *Journal of Voice, 24*(1), 30–38. Consulté le 2015-02-26, sur <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0892199708000635> doi: 10.1016/j.jvoice.2008.04.004
- Weaver, B., Bédard, M., McAuliffe, J., & Parkkari, M. (2009, janvier). Using the Attention Network Test to predict driving test scores. *Accident Analysis & Prevention, 41*(1), 76–83. Consulté le 2016-03-10, sur <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0001457508001851> doi: 10.1016/j.aap.2008.09.006
- Wickens, C. D. (2008). Situation awareness : Review of mica endsley's 1995 articles on situation awareness theory and measurement. *Human Factors : The Journal of the*

Human Factors and Ergonomics Society, 50(3), 397–403.

- Wioland, F. (1991). *Prononcer les mots du français : des sons et des rythmes* (Hachette, Ed.). Paris.
- Wittels, P., Johannes, B., Enne, R., Kirsch, K., & Gunga, H.-C. (2002). Voice monitoring to measure emotional load during short-term stress. *European Journal of Applied Physiology*, 87(3), 278-282.
- Xie, B., & Salvendy, G. (2000, septembre). Prediction of Mental Workload in Single and Multiple Tasks Environments. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 4(3), 213–242. Consulté le 2017-04-01, sur http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1207/S15327566IJCE0403_3 doi: 10.1207/S15327566IJCE0403_3
- Yu, C., Hansen, J. H., & Oard, D. W. (2014). ‘Houston, We have a solution’ : A Case Study of the Analysis of Astronaut Speech during NASA Apollo 11 for Long-Term Speaker Modeling. *stress*, 15(17), 19. Consulté le 2017-02-10, sur <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.698.2074&rep=rep1&type=pdf>
- Zellin, M., Pannekamp, A., Toepel, U., & van der Meer, E. (2011, septembre). In the eye of the listener : Pupil dilation elucidates discourse processing. *International Journal of Psychophysiology*, 81(3), 133–141. Consulté le 2017-03-15, sur <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167876011001711> doi: 10.1016/j.ijpsycho.2011.05.009
- Zijlstra, F. R. H., & Doorn, L. v. (1985). The construction of a scale to measure subjective effort. *Delft, Netherlands*.
- Zwicker, E., & Feldtkeller, R. (1981). *Psychoacoustique : l’oreille, récepteur d’information*. Masson. Consulté sur <https://books.google.be/books?id=b0xXPAAACAAJ>