



HAL
open science

L'allocation de l'attention visuelle lors d'une situation multi-tâche et dynamique : l'approche de carrefour en conduite.

Sophie Lemonnier

► **To cite this version:**

Sophie Lemonnier. L'allocation de l'attention visuelle lors d'une situation multi-tâche et dynamique : l'approche de carrefour en conduite.. Psychologie. Université paris 8, 2011. Français. NNT : . tel-03028666

HAL Id: tel-03028666

<https://hal.science/tel-03028666v1>

Submitted on 21 Dec 2020

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

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

Université Paris 8 — Vincennes-Saint-Denis
École doctorale Cognition, Langage, Interaction

THÈSE

pour obtenir le grade de
Docteur en Psychologie

L'ALLOCATION DE L'ATTENTION VISUELLE LORS D'UNE SITUATION MULTI-TÂCHE ET DYNAMIQUE : L'APPROCHE DE CARREFOUR EN CONDUITE.

présentée par
Sophie LEMONNIER

dirigée par
Thierry BACCINO, Université Paris 8
et par
Roland BREMOND, IFSTTAR

Date de Soutenance :
25.11.2015

Membres du jury :

Thierry BACCINO	Directeur	Professeur	Univ. Paris 8 - CHArt
Christian BASTIEN	Examineur	Professeur	Univ. de Lorraine - PErSEUs
Roland BREMOND	Co-Directeur	Directeur de Recherche	IFSTTAR - LEPSiS
Olivier LE MEUR	Rapporteur	Maître de Conférence	ESIR - IRISA
Franck MARS	Examineur	Chargé de Recherche	CNRS - IRCCyN
Corinne ROUMES	Rapporteur	Professeur	IRBA
Charles TIJUS	Examineur	Professeur	Univ. Paris 8 - CHArt

Titre : L'allocation de l'attention visuelle lors d'une situation multi-tâche et dynamique : l'approche de carrefour en conduite.

Résumé :

L'attention visuelle overt est sélective : si une information localisée est pertinente pour une tâche, l'attention est allouée à la zone contenant cette information. Si plusieurs sous-tâches sont nécessaires à la réalisation de cette tâche, chacune associée à une information différente, l'allocation de l'attention doit être sérielle, et les mouvements des yeux permettent de récupérer ces informations. Mais de quelle manière ; selon quel ordre de priorité ? Existe-il une stratégie optimale pour recueillir ces informations, et les personnes suivent-elles cette stratégie optimale ? Avec ce travail, nous avons voulu mettre l'accent sur la validité externe des expérimentations et nous focaliser sur des situations dynamiques naturelles. Or dans ce type de situation, les traitements top-down, découlant des connaissances préalables et de l'objectif, guident préférentiellement l'allocation de l'attention, tandis que les traitements bottom-up (caractéristiques des entrées perceptives) ont une influence mineure. Ce travail est donc centré sur l'attention top-down. La situation choisie est une approche de carrefour en conduite automobile, les sous-tâches étudiées sont le contrôle du véhicule (la trajectoire) et la décision de s'arrêter ou non au carrefour. Deux objectifs opérationnels sont investigués à travers l'analyse des mouvements oculaires : 1/ distinguer les sous-tâches de contrôle du véhicule et de prise de décision, 2/ distinguer les processus de la sous-tâche de prise de décision. Pour chaque objectif, une approche qualitative puis quantitative sont explorées. Des techniques de classification supervisées ont notamment été utilisées pour distinguer les différents processus. Deux études ont été conduites afin de répondre à ces objectifs, une en simulateur de conduite et une en situation réelle de conduite, mettant toutes deux en scène des approches de carrefours.

Pour le premier objectif, nous nous appuyons sur un modèle théorique de l'allocation de l'attention (SEEV) stipulant que l'attention top-down dépend de la valeur de l'information (modulée ici par la règle de priorité au carrefour) et des attentes liées à l'information (modulées ici par la densité de trafic au carrefour). Des prédictions quantitatives permettent ensuite de confronter les observations à un modèle optimal de l'allocation de l'attention. Les résultats mettent en évidence la présence d'une stratégie quasi-optimale, ainsi qu'une modulation importante des mouvements des yeux en fonction de la valeur de l'information (la règle de priorité). Le rôle des attentes, modulées par la densité de trafic durant l'étude en simulateur, semble mineur, tandis que le trafic attendu a un impact plus important sur les mouvements des yeux durant l'étude en situation réelle, ce qui pourrait être lié à un effet de l'aménagement et non directement de la densité de trafic. L'impact de la saillance visuelle et de l'effort est également discuté.

Pour le second objectif, un modèle de prise de décision (Différentiation / Consolidation) est convoqué, stipulant que deux processus se suivent dans le temps pour aboutir à une décision : le processus de différenciation pour prendre une pré-décision, puis le processus de consolidation afin de la vérifier. La présence de l'un ou l'autre de ces processus est étudiée en fonction du moment de l'approche de carrefour, de

la règle de priorité et de la décision finale de s'arrêter ou non. L'analyse des mouvements oculaires semble cohérent avec les prédictions émises sur l'exploration visuelle, la dynamique des processus de prise de décision et le changement de processus. Cependant, la position à laquelle le changement d'un processus à l'autre s'opère semble être plus proche du carrefour en situation réelle qu'en simulateur, ce qui pourrait s'expliquer par le danger réel et la visibilité plus restreinte en situation réelle. L'aspect dynamique est également discuté. La consistance des données issues de l'étude en situation réelle est plus contestable (grande variabilité et peu d'essais), mais apporte une validité externe aux observations faites également en simulateur, les deux études sont ainsi complémentaires.

Enfin, une généralisation des modèles utilisés et de nos interprétations des données vers des applications est discutée, et nous concluons en proposant un modèle probabiliste bayésien qui permettrait de prédire la position du regard lors d'une situation multi-tâche et dynamique.

Mots-clefs : Attention visuelle top-down, Mouvement des yeux, Oculomètre, Multi-tâche, Tâche naturelle, Conduite automobile

Les travaux décrits dans cette thèse ont été réalisés au sein du laboratoire Cognitions Humaine et Artificielle (CHArt EA 4004, Université Paris 8, 2 rue de la liberté, 93526 Saint-Denis) et du laboratoire Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations (LEPSiS, 14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes, Champs sur Marne F-77447 Marne la Vallée Cedex 2) appartenant à l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR) qui a financé ce travail de thèse dans le cadre du projet interne intitulé I2V portant sur l'Impact des Informations Visuelles sur les comportements de conduite.

Title: Allocation of the visual attention in a multi-task and dynamic situation: the approach of crossroads.

Abstract: The overt visual attention is selective: if a localized information is relevant to a task, the attention is allocated to the area containing the information. If multiple subtasks are necessary to execute this task, and each subtask is associated with a different information, the allocation of attention must be serial to enable to select these different information. But how, and according to what priority order? Is there an optimal strategy to collect this information, and do people follow this optimal strategy? In this work, we focus on the external validity of experiments and on natural dynamic situations. In this type of situation, the top-down treatments resulting from prior knowledge and goal preferably guide the allocation of attention, while the bottom-up treatments (characteristics of perceptual input) play a minor role. This work is then focused on top-down attention. The chosen situation is an approach of driving crossroads, the studied subtasks are the control of vehicle (trajectory) and the decision to stop or not at the crossroads. Two operational objectives are investigated by analyzing eye movements: 1/ discriminating the vehicle's control and decision making subtasks, 2/ discriminating the process of the decision making subtask. For each objective, we explore a qualitative and quantitative approach. In particular, supervised techniques of classification have been used to distinguish the different processes. Two studies were conducted in order to meet these objectives, one with a driving simulator and one in a real situation of driving, both involving approaches to crossroads.

For the first aim, we based our analysis on a theoretical model of the allocation of attention (SEEV) stipulating that the top-down attention depends on the value of information (modulated here by the priority rule at the crossroads) and expectations associated to the information (modulated here by the traffic density at the crossroads). Then, quantitative predictions enable to compare the observations with an optimal model of the allocation of attention. The results highlight the presence of a quasi-optimal strategy and an important modulation of eye movements depending on the value of the information (priority rule). The role of expectations, modulated by traffic density during the simulator study, seems weak, while the expected traffic has a more important impact on eye movements during the study in a real situation, which could be related to an effect of the road design rather than the traffic density. The impact of visual saliency and effort is also discussed.

For the second aim, a model of decision making (Differentiation / Consolidation) is used, stipulating that decision making involves two successive processes: the differentiation process conducts to a pre-decision and then the consolidation process validates it. The presence of either of these processes is studied in function of the moment of the crossroad approach, the priority rule and the final decision to stop or not. Analyses of eye movements seem consistent with the predictions in terms of visual exploration, the dynamic of decision making process and the change of process. However, the position at which the change from one process to another takes place seems to be closer to the crossroad in the real situation than in driving simulator, which could be explained by the real danger and the more restricted visibility.

The dynamic aspect is also discussed. Data consistency obtained from the study in a real situation is more questionable (variability and few trials), but provides external validity to observations made in the diving simulator, both studies are thus complementary.

Finally, a generalization of the models used and our interpretations of the data to applications is discussed, and we conclude by proposing a Bayesian probabilistic model that would predict the position of the gaze in a multi-tasking and dynamical situations.

Key-words: Top-down visual attention, Eye movements, Eye-tracker, Multi-task, Natural task, Driving

Il n'y a aucune passion que quelque particulière action des yeux ne déclare [...].

Mais encore qu'on aperçoive aisément ces actions des yeux, et qu'on sache ce qu'elles signifient, il n'est pas aisé pour cela de les décrire, à cause que chacune est composée de plusieurs changements qui arrivent au mouvement et en la figure de l'œil, lesquels sont si particuliers et si petits que chacun d'eux ne peut être aperçu séparément, bien que ce qui résulte de leur conjonction soit fort aisé à remarquer.

René Descartes

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mes directeurs de thèse, Thierry Baccino et Roland Brémond, pour m'avoir permis de travailler sur ce sujet, d'avoir toujours cru en moi et de m'avoir aidé à chaque étape. Merci à Thierry pour m'avoir guidé, pour s'être montré toujours disponible, pour avoir pris le temps de m'expliquer chaque fois que j'étais coincée. Merci à Roland, pour toutes nos discussions, pour tout ce temps passé à débattre, à essayer de se convaincre l'un l'autre ; c'étaient des moments formidables, je n'aurais pas compris tant de choses sans cela, merci pour sa patience, sa pédagogie, son humanité. Merci de m'avoir donné le goût de la recherche multidisciplinaire.

Je remercie également les membres du jury, Olivier Le Meur, Corinne Roumes, Christian Bastien, Franck Mars et Charles Tijus, d'avoir accepté d'évaluer ce travail de thèse.

Je remercie ensuite toutes les personnes avec qui j'ai eu la chance de collaborer. Je remercie Lara Désiré, notamment pour ces trois mois passés en Bretagne et toute la phase complètement folle des pré-tests avec le véhicule instrumenté, puis de l'expérience en tant que telle ; je n'aurais jamais eu assez d'imagination pour anticiper tous les problèmes qu'on a rencontrés, c'était vraiment une expérience géniale sous fond de jeu de piste. J'en profite pour remercier également Matthieu Adam et Dominique Bill pour leur support inestimable lors de cette étude. Je remercie Jean-Philippe Tarel pour nos discussions sur des aspects quantitatifs de ce travail de thèse. Je remercie Julien Diard pour nos longues discussions autour des modèles probabilistiques, pour m'avoir expliqué chaque chose sans jamais trouver mes questions naïves. Je remercie Abderrahmane Boubezoul pour son initiation à l'utilisation des classifieurs, pour avoir accepté de jouer avec nos données, et pour m'avoir expliqué chaque étape. Je remercie Guillaume Saint Pierre d'avoir également accepté de jouer avec nos données, et de même de m'avoir initié aux modélisations statistiques.

Pour l'étude en simulateur de conduite, un grand merci à Fabrice Vienne, Jacky Robouant, Stéphane Caro et Isabelle Aillerie, pour avoir créé l'environnement virtuel et le scénario, mais également pour tout le temps passé à me montrer comment faire fonctionner un simulateur de conduite.

Je remercie également tous mes collègues. Tout d'abord les collègues du LEPSiS, Eric, Didier, Elise, Jean-Philippe, Régis, Fabrice, Stéphane, Jacky, Utku, Julien et tous les autres, pour leur accueil sans pareil ; par ailleurs je remercie ceux qui étaient mes collègues mais avant tout mes "frères d'armes", mes amis : Kévin, Vérane et Laurent, mais aussi Mathieu et Julien. Merci pour toutes ces pauses sans lesquelles la thèse n'aurait pas eu la même saveur. Merci ensuite aux collègues du LPNC et du LIP, qui ont accompagné la fin de thèse et pour tous les super moments de détente, merci à Mélanie, Louise, Svetlana, Oulmann et tous les autres ! Merci également aux nouveaux collègues de PErSEUs qui se sont tous montrés accueillants et compréhensifs en ce dernier mois de pré-soutenance.

Je remercie également ma famille pour tout ce qu'ils m'ont apporté tout au long de ma vie et qui m'a permis de franchir cette première étape vers, je l'espère, le monde

de la recherche : merci à ma mère pour m'avoir montré depuis toujours ce qu'est le courage et la volonté, merci à mon père pour m'avoir donné le goût des énigmes et de la rigueur intellectuelle, merci à mon frère d'avoir cru en moi et d'être toujours curieux et bienveillant à mon égard, merci à tous pour m'avoir toujours soutenu.

Merci pour finir à Pierre-Jean pour toutes ces fois où tu m'as permis de "décrocher" de ce travail de thèse, de retrouver une vie privée, mais aussi merci pour toutes ces autres fois où nous n'avons pas réussi à décrocher, immergés que nous sommes, et qui étaient tout autant d'excellents moments ! Merci donc pour cette joie apportée dans tous les aspects de ma vie.

Table des matières

Préambule	i
1. L'allocation de l'attention visuelle en situation naturelle	1
1.1. L'attention visuelle	1
1.1.1. Qu'est-ce que l'attention visuelle ?	1
1.1.2. Quelle taxonomie des processus de l'attention ?	3
1.2. Des modèles différents pour des processus différents	8
1.2.1. Distinctions entre les modèles théoriques et computationnels	8
1.2.2. Les modèles bottom-up : modèles computationnels	9
1.2.3. Les modèles top-down : modèles théoriques	13
1.3. L'attention visuelle en situation naturelle	15
1.3.1. Qu'appelle-t-on une "tâche naturelle" ?	15
1.3.2. Des modèles théoriques et quantitatifs de l'attention visuelle	16
2. Une situation naturelle et multi-tâche : la conduite automobile	21
2.1. La conduite : une situation naturelle	21
2.1.1. Apprentissage d'une tâche	21
2.1.2. Application à la conduite	22
2.2. La conduite : une situation multi-tâche	23
2.2.1. Les différents types de sous-tâches de la conduite	23
2.2.2. L'importance de la sous-tâche "prise de décision"	25
2.2.3. Un modèle de la prise de décision	26
2.3. Une situation : l'approche de carrefour	29
2.3.1. Les caractéristiques de cette situation	29
2.3.2. Opérationnalisation de cette situation	30
3. Problématique	33
3.1. Problématique générale	33
3.2. Distinguer des sous-tâches par les mouvements des yeux [Q1]	34
3.2.1. Distribution de l'attention visuelle entre plusieurs sous-tâches [Q1.1]	34

3.2.2.	Des prédictions quantitatives pour chacune des sous-tâches [Q1.2]	37
3.3.	Distinguer différentes étapes temporelles d'une sous-tâche par les mouvements des yeux [Q2]	41
3.3.1.	Les différentes phases d'une sous-tâche : la prise de décision [Q2.1]	41
3.3.2.	Prédire la présence d'une sous-tâche [Q2.2]	44
3.4.	Synthèse des hypothèses et démarche expérimentale	47
3.4.1.	En simulateur	47
3.4.2.	En situation réelle	48
3.4.3.	Des mesures adaptées à chacune des études	48
4.	Étude sur simulateur de conduite	51
4.1.	Matériel et méthode	51
4.1.1.	Participants	51
4.1.2.	Matériel et instrumentation	52
4.1.3.	Procédure	54
4.2.	Q1 : Distinguer des sous-tâches avec les mouvements des yeux.	56
4.2.1.	Les aires d'intérêt	56
4.2.2.	Analyse des données	57
4.2.3.	Résultats	59
4.2.4.	Synthèse des résultats	64
4.3.	Q2 : Distinguer différentes étapes d'une sous-tâche par les mouvements des yeux.	67
4.3.1.	Analyse des données	67
4.3.2.	Analyses préliminaires	69
4.3.3.	Résultats	72
4.3.4.	Synthèse des résultats	76
5.	Étude avec un véhicule instrumenté	79
5.1.	Matériel et méthode	79
5.1.1.	Participants	79
5.1.2.	Le véhicule instrumenté	80
5.1.3.	Le circuit	83
5.1.4.	Procédure	84
5.1.5.	Analyse des données	86
5.2.	Résultats	90
5.2.1.	Analyses descriptives	90
5.2.2.	Analyses statistiques	90
5.3.	Synthèse des résultats	99
6.	Discussion générale et perspectives	101
6.1.	Synthèse de la démarche	101
6.2.	Discussion des résultats en lien avec le modèle <i>Expectancy / Value</i> [Q1]	103
6.2.1.	Les ressources attentionnelles	103

6.2.2.	La valeur de l'information liée à la règle de priorité	105
6.2.3.	Les attentes liées au trafic	106
6.2.4.	Les composantes bottom-up : la saillance et l'effort	108
6.3.	Discussion des résultats en lien avec le modèle Diff / Cons [Q2]	110
6.3.1.	Les processus de la prise de décision	110
6.3.2.	La dynamique temporelle	116
6.3.3.	Apport des classifieurs	117
6.4.	Apports et limites des méthodologies expérimentales employées	119
6.4.1.	Étude en simulateur de conduite	119
6.4.2.	Étude en situation réelle de conduite	120
6.5.	Perspectives	122
6.5.1.	Généralisation et applications	122
6.5.2.	Un modèle prédictif mixte de l'attention visuelle	125
Bibliography		131
Publications		149
Annexes		153
A.	Les différents mouvement des yeux	153
B.	Résolution non-homogène de l'œil	155
C.	Les voies visuelles	157
D.	Calcul des fixations (algorithme SMI)	159
E.	Étude en simulateur : la position de la pré-décision	161
F.	Étude en simulateur : l'interaction Position × Situation	163
G.	Étude en situation réelle : le choix des zones	165
H.	Étude en situation réelle : la vitesse	167

Préambule

La sécurité routière est un enjeu de santé public international. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé ([WHO, 2013](#)), les accidents incluant des véhicules à moteur représentent la deuxième cause de mortalité chez les personnes entre 15 et 29 ans. Bien que le nombre de ce type de décès soit actuellement en baisse dans les pays développés, il ne cesse d'augmenter dans les pays en développement. En effet, le nombre de morts sur la route a été estimé à 1,24 million dans le monde en 2010, auquel s'ajoute l'estimation de 20 à 50 millions de blessures non mortelles.

Par ailleurs, depuis les études fondamentales de l'Université de l'Indiana et du Laboratoire de recherche des transports et de la route ([Sabey & Staughton, 1975](#); [Treat et al., 1979](#)), le facteur humain est connu pour être dominant dans les causes d'accidents ([Rumar, 1985](#)). Le rôle de l'attention visuelle est d'une importance particulière. En effet, le premier facteur de causalité trouvé par l'étude de l'université de l'Indiana est la recherche visuelle inappropriée (*improper lookout*), suivi de l'inattention en troisième et de la distraction en cinquième. D'après l'étude de [Trick et al. \(2004\)](#), qui s'inscrit dans la continuité d'autres travaux ([Goodman et al., 1999](#); [Treat et al., 1979](#); [Utter, 2001](#)), les experts de la sécurité routière s'accordent pour dire que de nombreux accidents de voiture sont causés par des problèmes d'attention sélective.

Afin de diminuer les accidents de la route, beaucoup de moyens existent. En terme d'objet, il existe une marge de manœuvre au niveau de l'environnement, du véhicule et de l'humain. Pour l'organisation de l'environnement, l'aménagement routier est central, en incluant l'ensemble de la signalisation et de la législation. L'aménagement est repensé régulièrement afin d'améliorer la lecture de la route par les différents usagers, permettant ainsi de diminuer les erreurs humaines. Pour le véhicule, les améliorations techniques récentes ont facilité sa maîtrise et diminué les risques. De plus en plus viennent s'y ajouter les aides à la conduite qui appuient le conducteur dans sa tâche. Pour l'humain, qu'il soit conducteur ou usager de la route au sens large (*e.g.* piéton), les campagnes de prévention et de sensibilisation ajoutées au renforcement des exigences demandées pour l'obtention du permis ont également porté leurs fruits dans les dernières décennies.

A un autre niveau, il existe de multiples manières de tester de nouvelles hypothèses, depuis les essais sur le terrain à l'échelle d'une portion de route, d'une ville ou d'un

pays, jusqu'aux simulations entièrement virtuelles, en passant par les observations (*e.g.* filmer en continu une zone donnée), les comparaisons (*e.g.* inter et intra pays), les études par questionnaires, les expériences menées sur simulateur ou en situation réelle, l'accidentologie (*e.g.* pour identifier les causes *a posteriori*). La majorité de ces outils peut être appliquée aux différents objets d'étude et ainsi permettre le recueil d'un grand nombre de solutions et/ou de connaissances, le tout pouvant être mené en parallèle et se nourrissant mutuellement.

Les nombreux axes de recherche s'articulant autour de cette problématique sont souvent pluridisciplinaires, à l'instar du LEPSiS (Laboratoire Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations), et peuvent regrouper des chercheurs en sciences pour l'ingénieur, notamment en IA (intelligence artificielle), SMA (système multi-agents) et traitement du signal, et en sciences cognitives, notamment en ergonomie, psychologie cognitive et STAPS (sciences et techniques des activités physiques et sportives). En terme d'objet, ces différents champs disciplinaires permettent d'aborder la question de la sécurité routière directement en ce qui concerne l'humain (perception, décision, comportement), mais également indirectement au travers de l'environnement (signalisation, aménagement) et du véhicule (aides à la conduite).

En termes d'outils, un panel très large peut être utilisé, notamment la simulation de trafic (et plus généralement le peuplement et les animations de scènes virtuelles) et les simulateurs de conduite. Les recherches pour chacun de ces deux outils incluent deux axes distincts : la validation de l'outil et la production de connaissances. Pour la simulation de trafic, la validation consiste d'une part à estimer si le comportement des agents virtuels est suffisamment proche du comportement humain ; d'autre part, à comparer le comportement des participants sur simulateur et sur la route. Pour cela, les chercheurs puisent dans des modèles de sciences cognitives. La validation d'un simulateur, qui peut être piéton ou de conduite (en automobile, en moto ou en vélo), consiste à déterminer si les comportements qu'il induit sont comparables, quantitativement et / ou qualitativement, aux comportements observés hors laboratoire. L'un des objectifs consiste à améliorer les modèles du comportement.

Ces deux outils peuvent également avoir des applications directes dans l'aide au diagnostic et l'évaluation. Par exemple, afin de définir une doctrine d'aménagement (*i.e.* généraliser à l'ensemble du réseau routier), ou plus spécifiquement pour déterminer si, sur une portion de route donnée, il vaut mieux aménager un rond point ou un carrefour à feu tricolore, la simulation de trafic peut permettre de recueillir un grand nombre de flux de trafic virtuel dans les deux situations. Elle permet également de comparer la quantité d'embouteillages et d'accrochages, et le simulateur autorise la conduite des personnes dans les deux situations afin de comparer les performances, le nombre de collisions et les avis subjectifs.

Concernant l'attention visuelle, la littérature est très vaste. Elle peut être abordée en fonction du type de tâche. En ce sens, la première question que nous nous sommes posée était de savoir quelles sont les spécificités de la tâche de conduite. La conduite est une tâche complexe pour laquelle les traitements cognitif, perceptif, attentionnel et moteur sont très fortement présents (Fuller, 2005). Cette complexité

résulte de la présence de plusieurs sous-tâches nécessaires à la réalisation de la tâche de conduite. Mais la conduite est avant tout une tâche dynamique dans laquelle la pression temporelle est centrale, notamment du fait des risques potentiellement élevés et de la volonté des conducteurs d'optimiser leur temps de transport. Ces nombreuses sous-tâches et sous-objectifs doivent donc être menés en parallèle.

Les erreurs humaines associées aux aspects attentionnels sont souvent corrélées à d'autres facteurs, tels que l'utilisation du téléphone, la fatigue, la conduite de nuit, l'alcool et la consommation de drogues (voir [Shinar \(2007\)](#), partie D). Mais la compréhension du comportement humain inclut la compréhension du comportement dans une situation de référence, auquel peuvent venir s'ajouter des facteurs conduisant à des écarts par rapport à ce comportement de référence. Ceci est d'autant plus vrai que la tâche de conduite seule inclut un ensemble de sous-tâches.

L'objectif de ce travail de thèse est donc de comprendre l'allocation de l'attention visuelle lors d'une tâche, plus précisément avec les mouvements des yeux, dans des situations multi-tâches pour laquelle la pression temporelle nécessite le traitement en parallèle de ces différentes tâches.

Ce travail de thèse est présenté comme suit. L'état de l'art est décrit dans les Chapitres 1 et 2. Ils permettent de situer ce travail de thèse dans la littérature et de présenter les choix qui ont été faits en terme de spécification de la problématique, choix des modèles théoriques et situation d'application. Le Chapitre 3 décrit la problématique, l'opérationnalisation des hypothèses théoriques et la démarche expérimentale. Les Chapitres 4 et 5 décrivent les études qui ont été conduites, en simulateur de conduite puis en situation réelle de conduite. Pour finir, le Chapitre 6 permet de discuter les résultats, et de recouper avec l'état de l'art en proposant des perspectives d'application. Nous décrivons ci-dessous chaque chapitre plus en détail.

Le Chapitre 1 permet de situer la problématique par rapport aux modèles théoriques de la littérature. Ainsi, la problématique portant sur l'attention visuelle et sur la prise d'information visuelle est recentrée autour de l'attention explicite (*overt*), et les différentes composantes de l'attention considérées sont les composantes bottom-up et top-down. Une distinction est ensuite faite entre une approche computationnelle conduisant majoritairement à des modèles prédictifs, fortement représentés dans les études portant sur la composante bottom-up ; et une approche plus théorique, conduisant majoritairement à des modèles qualitatifs, fortement représentés dans les études portant sur la composante top-down. Ainsi les modèles bottom-up sont souvent quantitatifs et prédictifs, mais ne sont que peu efficaces dans des situations naturelles, et les modèles théoriques sont plus utiles en situation naturelle mais posent de nombreux problèmes pour être implémentés et dans leur prédictibilité. Ces deux composantes étant nécessaires à une compréhension globale de l'allocation de l'attention, certains modèles mixtes sont apparus dans la littérature, même s'ils ne sont pas encore totalement satisfaisants. L'accent est mis sur le modèle SEEV (*Saliency Effort Expectancy Value*) de [Wickens et al. \(2003\)](#) sur lequel est basée la première partie de la problématique. Ce travail étant centré sur l'attention visuelle lors d'une situation naturelle, la composante top-down y est plus spécifiquement étudiée.

Le Chapitre 2 décrit le processus de conduite qui présente un aspect multi-tâche,

dynamique et naturel, avec un poids fort de la tâche, et donc de la composante top-down. L'aspect multi-tâche de la conduite est décrit au travers de modèles théoriques qui soulignent l'existence de trois types de sous-tâches en conduite automobile : le contrôle du véhicule, la gestion des interactions et la navigation. L'accent est mis sur les deux premières. Ces sous-tâches sont définies notamment par rapport aux types d'informations visuelles qu'elles nécessitent. La sous-tâche de gestion des interactions choisie est plus spécifiquement une sous-tâche de prise de décision, dont les processus sont définis sur la base du modèle Différentiation / Consolidation (Svenson, 1992) sur lequel la seconde partie de la problématique s'appuie. Enfin, le choix de l'approche de carrefour comme situation expérimentale est expliqué.

Le Chapitre 3 permet de reposer la problématique en fonction des choix théoriques présentés dans les chapitres précédents, puis d'opérationnaliser les hypothèses en fonction des choix expérimentaux définis dans les chapitres précédents. La première partie de cette problématique consiste à se demander s'il est possible de distinguer l'allocation de l'attention visuelle entre les deux sous-tâches de contrôle latéral et de gestion des interactions sur la base de la recherche visuelle, donc des mouvements des yeux. La seconde partie consiste à se demander s'il est possible de faire de même mais pour les processus propres à la sous-tâche de prise de décision et ceci en prenant en compte leur dynamique temporelle ; donc, les processus ici étudiés étant sériels, de distinguer les différentes phases d'une sous-tâche sur la base des mouvements des yeux. Ces deux parties sont ensuite reformulées grâce aux modèles SEEV et Différentiation / Consolidation afin d'émettre des prédictions, qualitatives puis quantitatives.

Le Chapitre 4 décrit la première expérience de ce travail de thèse, menée en simulateur de conduite, notamment le matériel, avec le simulateur, l'environnement virtuel, l'oculomètre et la procédure. Puis les résultats observés sont présentés, dans un premier temps par rapport à la première partie de la problématique, en lien avec la proportion de regards dans des zones contenant l'information pertinente à l'une ou l'autre des sous-tâches en fonction de la règle de priorité et de la densité de trafic au carrefour ; puis ces résultats sont comparés aux prédictions quantitatives émises grâce à un modèle reposant sur le modèle SEEV (EV). Dans un second temps, les résultats observés sont présentés par rapport à la seconde partie de la problématique, en lien avec l'intensité de l'exploration visuelle, traduite par les amplitudes de saccade et les durées de fixation, en fonction de la position par rapport au carrefour, de la règle de priorité et du comportement d'arrêt au carrefour ; puis ces résultats sont comparés aux prédictions émises par différents classifieurs, notamment concernant le processus de prise de décision.

Le Chapitre 5 décrit la seconde expérience de ce travail menée en situation réelle de conduite à l'aide d'un véhicule instrumenté. Ce véhicule, et l'ensemble de son équipement, dont l'oculomètre, sont décrits, ainsi que la procédure. Les résultats observés sont ensuite présentés, principalement l'excentricité du regard, donc l'écart entre la position du regard et l'axe du véhicule, et les amplitudes horizontales du regard, pour approcher la notion d'exploration visuelle, en fonction de la règle de priorité, du trafic attendu et de la position au carrefour. La distinction entre analyses et parties de la problématique est moins clairement établie du fait des contraintes

liées au choix des mesures.

Le Chapitre 6 permet de discuter les différents résultats observés dans les deux études. Ces résultats sont discutés en lien avec le modèle SEEV puis avec le modèle Différentiation / Consolidation. Chaque sous-point discuté l'est d'abord par rapport aux résultats observés lors de l'étude en simulateur de conduite, puis par rapport à ceux observés lors de l'étude en situation réelle de conduite. Les contraintes et les apports liés au support de ces deux études (simulateur / véhicule instrumenté) sont ensuite discutés. Pour finir, des généralisations et des applications des résultats observés et des interprétations proposées sont décrites, suivies d'une proposition de modèle probabiliste mixte prenant en compte différents aspects traités durant ce travail.

L'allocation de l'attention visuelle en situation naturelle

1.1. L'attention visuelle

1.1.1. Qu'est-ce que l'attention visuelle ?

L'attention est un processus cognitif permettant de sélectionner certains aspects de l'environnement. Cela permet de recueillir des informations propres à un objet ou à une partie de l'espace (attention spatiale) afin de l'analyser.

La notion d'attention est étroitement liée à la notion de ressources attentionnelles. Ces ressources sont limitées ([Duncan, 1984](#)), c'est pourquoi il est nécessaire de sélectionner les informations présentes dans l'environnement : l'allocation de l'attention ne se fait pas au hasard. Plus spécifiquement, concernant l'attention visuelle, qui est l'objet de ce travail de thèse, nous pouvons citer [Labbett & Langham \(2006\)](#), p 10 : "Le cerveau a une capacité considérable, mais non exhaustive, à traiter des images visuelles, le cerveau doit donc sélectionner pour percevoir"¹.

De nombreuses propositions de définition de l'attention, pour l'ensemble des modalités sensorielles ou seulement pour l'attention visuelle, ont été proposées dans la littérature. Nous en avons retranscrites certaines ci-dessous :

- "Tout le monde sait ce qu'est l'attention. C'est la prise de possession par l'esprit, sous une forme claire et vive, d'un objet ou d'une suite de pensées parmi plusieurs qui semblent possibles"², [James \(1890\)](#) ;
- "Quand une personne adopte une attitude qui va faciliter sa réponse à un ou plusieurs stimulus particuliers, cette attitude prend le nom d'anticipation ou d'attention"³, [Dashiell \(1928\)](#) ;

1. "The brain has an extensive, but not an exhaustive, capacity to process visual images, thus, the brain must select to perceive."

2. "Every one knows what attention is. It is the taking possession by the mind, in clear and vivid form, of one out of what seem several simultaneously possible objects or trains of thought."

3. "When a person takes up an attitude that will facilitates his response to some particular

- “[l’attention ...] implique le passage sélectif d’une information sensorielle pertinente à la conscience”⁴, [Hernandez-Peon \(1966\)](#).

Cependant, il ressort principalement de la littérature qu’il est très difficile de définir l’attention : “L’attention ne peut être réduite à une seule définition, elle ne peut être liée à une seule structure anatomique ou évaluée par un test unique”⁵ ([Zomeren & Brouwer, 1994](#)) ; “Même si William James a déclaré que *tout le monde sait ce que l’attention est*, il n’y a pas de définition unique, satisfaisante de l’attention”⁶, ([Wolfe & Horowitz, 2004](#)).

Afin de spécifier ce que peut être l’attention, et plus précisément l’attention visuelle, nous avons donc choisi de décrire un modèle de l’attention visuelle proposée dans la littérature, celui de [Knudsen \(2007\)](#). Actuellement, la plupart des modèles théoriques de l’attention prennent en compte les deux types de processus bottom-up (ascendants) et top-down (descendants ; voir section suivante pour une description plus précise de ces deux composantes). Pour [Knudsen \(2007\)](#), l’attention visuelle est un processus avec un objectif principal qui est l’accès à la mémoire de travail. Dans le modèle qu’il propose, illustré dans la Figure 1.1, l’attention repose sur quatre composantes fondamentales :

- Le filtre de saillance (influence bottom-up), qui sert principalement à sélectionner les stimuli peu fréquents dans le temps ou dans l’espace, ou importants biologiquement ([Koch & Ullman, 1985](#)). Ces stimuli ont un avantage lors de la compétition pour accéder à la mémoire de travail.
- Le contrôle sensitif (influence top-down), qui régule les signaux issus de différentes informations en compétition pour accéder à la mémoire de travail ([Egeth & Yantis, 1997](#)). L’influence du contrôle sensitif augmente graduellement avec la difficulté de la tâche.
- La sélection compétitive, qui correspond au processus déterminant quelle information accède à la mémoire de travail ([Desimone & Duncan, 1995](#)).
- La mémoire de travail, qui représente la partie dynamique de la mémoire opérant durant quelques secondes afin de sélectionner l’information qui sera analysée plus en détail ([Baddeley, 2003](#)). L’information en mémoire de travail aide à la décision et à la planification, et contrôle le signal top-down qui module les représentations neurales qui contribuent à cette information, formant une boucle. [LaBar et al. \(1999\)](#) ont mis en évidence le lien étroit entre mémoire de travail et attention visuelle. En effet, la mémoire de travail optimise la résolution de l’information visuelle d’un objet en y dirigeant les mouvements des yeux ([Colby & Goldberg, 1999](#)).

stimulus or stimuli, that attitude goes by the name of attending or attention.”

4. “[attention...] involves the selective passage of relevant sensory information to consciousness”

5. “Attention cannot be reduced to a single definition, nor can it be linked to a single anatomical structure or assessed with a single test.”

6. “Even though William James famously declared that *Everyone knows what attention is*, there is no single, satisfying definition of attention.”

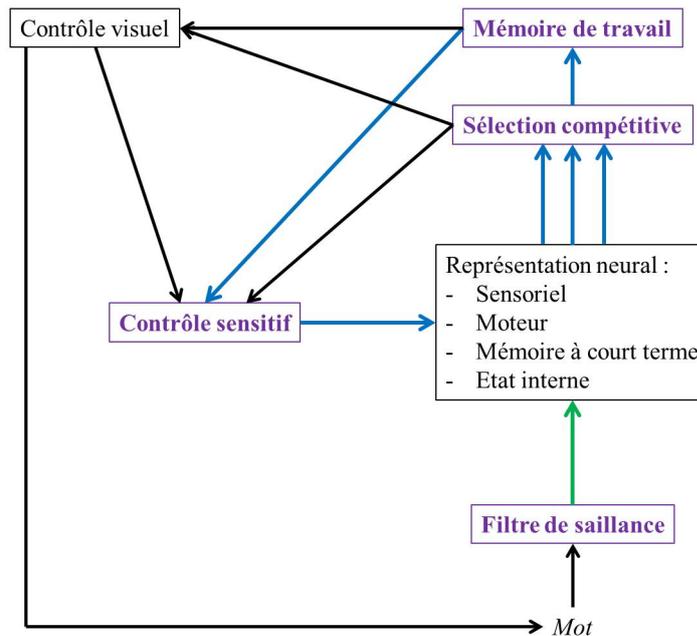


Figure 1.1.: Le modèle décrit par Knudsen (2007), p 59, avec en exemple un mot comme entrée au système sensoriel (en italique). Il représente les différents processus contribuant à l'attention visuelle (en violet) et leurs interactions. Les flèches bleues représentent l'influence top-down (formant une boucle), et la flèche verte, l'influence bottom-up.

1.1.2. Quelle taxonomie des processus de l'attention ?

L'attention peut être abordée selon différentes perspectives, permettant de guider la recherche dans la littérature. Ces différentes perspectives reposent sur des classifications de l'attention. En fonction de l'approche choisie, les taxonomies utilisées recouvrent des notions plus ou moins différentes. Il nous a également semblé que ces différentes taxonomies permettent de répondre à des questions différentes et renvoient à des façons différentes de se représenter l'attention. En effet, il semble qu'en fonction des problématiques des chercheurs, les questions ont évolué. Nous nous attarderons ici sur trois questions : les processus de l'attention peuvent se différencier en terme de comportement moteur (vont-ils être associés à une action ?), en terme de traitement (l'information sera-t-elle traitée différemment en fonction de ceux-ci ?), en terme de sélection de l'information (quelle information vont-ils sélectionner ?).

Nous allons donc présenter, de manière non exhaustive, les distinctions principales de l'attention visuelle que nous avons rencontrées dans la littérature, afin de situer notre travail et de justifier le choix taxonomique fait par la suite.

Comment s'exprime l'attention ?

Overt versus covert L'orientation de l'attention peut être explicite (*overt*) ou cachée (*covert*) (Posner, 1980). Comme l'expliquent synthétiquement Itti & Koch (2001), l'attention dite *overt* est l'expression de l'attention lorsque celle-ci implique un mouvement oculaire (et parfois de la tête). À l'inverse, l'attention dite *covert* n'implique aucun mouvement des yeux, c'est un déplacement (*shift*) mental sans comportement moteur associé⁷.

La problématique de ce travail de thèse est centrée sur la question de la distribution de l'attention visuelle dans une situation multi-tâche. Les tâches considérées ne sont pas des tâches mentales, comme par exemple une tâche de calcul mental, dans lesquelles prédomineraient *a priori* les processus *covert* de l'attention, mais sont intrinsèquement liées à la recherche d'une information dans la scène visuelle qui permet de réaliser cette tâche. Étant donné le choix de la problématique et ce choix de situation, seuls les processus *overt* de l'attention seront considérés dans la suite de ce travail. Les classifications de l'attention visuelle suivantes entrent donc dans le cadre d'une attention visuelle *overt* et le comportement au centre de cette étude est le mouvement des yeux.

L'attention visuelle *overt* et les mouvements des yeux Il est établi dans la littérature qu'il existe une relation étroite entre le mouvement des yeux et l'attention visuelle (Rayner, 1998). Afin d'étudier cette dernière, les chercheurs choisissent le plus souvent l'utilisation d'un oculomètre qui permet de recueillir le mouvement des yeux (voir Annexe A).

Il est généralement considéré que, dans une tâche naturelle, le regard traduit une recherche active de l'information (Henderson, 2003). En effet, l'anatomie de l'œil ne permet d'avoir une vision précise, détaillée et en couleur qu'au niveau de la fovéa (voir Annexe B), dont le diamètre est de quelques degrés dans le champ visuel. Afin de percevoir un objet en profitant de l'acuité maximale, il est donc nécessaire de fixer visuellement la source d'information en question. De ce fait, les mouvements oculaires sont considérés comme traduisant des processus cognitifs (Yarbus, 1967).

Le lien qui existe entre le regard et l'attention peut s'exprimer ainsi : "l'attention spatiale et les yeux se déplacent souvent dans l'environnement en tandem"⁸ (Hunter & Kingstone, 2003). En effet, un *shift* attentionnel implique en général un mouvement des yeux (Posner & Cohen, 1984), et une saccade volontaire implique un *shift* attentionnel (Deubel & Schneider, 1996; Kowler et al., 1995).

Les mouvements des yeux sont utilisés pour étudier l'attention lors de nombreuses tâches naturelles telles que la lecture (Baccino, 2011; Just & Carpenter, 1980; Rayner, 1998), l'interaction homme-machine (Jacob, 1991; Jacob & Karn, 2003), la recherche dans une liste (Crosby & Peterson, 1991), la sélection dans un menu de tâche (Aal-

7. Des études ont cependant mis en lumière des variations de mouvements oculaires non contrôlés, principalement des micro-saccades (voir Annexe A), en fonction des déplacements (*shifts*) de l'attention dite *covert* (Hafed & Clark, 2002; Laubrock et al., 2005).

8. "spatial attention and the eyes often move about the environment in tandem"

tonen et al., 1998), l'utilisabilité (Cowen et al., 2002; Goldberg & Kotval, 1999), la conduite automobile (Underwood et al., 2003), la réalité virtuelle (Duchowski et al., 2000, 2002), le marketing (Pieters, 2008), le sport (Land & McLeod, 2000), et même le fait de servir du thé (Land et al., 1999). Un avantage additionnel de s'intéresser au mouvement des yeux pour étudier l'attention réside dans la possibilité de reproduction des données et dans les similarités interindividuelles : "Cette stabilité dans les patterns de fixation rend, de manière inattendue, l'investigation des comportements naturels accessible aux approches expérimentales"⁹ (Hayhoe & Rothkopf, 2010), p 5.

Quel processus attentionnel pour le traitement visuel ?

Pré-attentif versus attentif Une des taxonomies dominantes dans la littérature introduit la notion de processus pré-attentif et attentif. Les processus pré-attentifs sont rapides et se font en parallèle, tandis que les processus attentifs sont plus lents et permettent de sélectionner un objet spécifique dans la scène, avec un rôle important du feedback (Wolfe, 2003). Certaines tâches de recherche simple peuvent être accomplies sur la base de processus pré-attentifs uniquement, mais des tâches plus exigeantes nécessitent une attention séquentielle, dite aussi focale (Liversedge & Findlay, 2000).

Treisman & Gelade (1980) ont introduit la notion de *feature* (que l'on peut traduire par "propriété" ou "caractéristique"). Une *feature* est la valeur particulière associée à une dimension. Pour un item donné, une dimension peut être par exemple sa couleur ou son orientation, et les *features* associées pourraient alors être rouge pour la couleur et verticale pour l'orientation.

Ces auteurs ont développés un paradigme de la recherche visuelle fondé sur cette notion: *Feature Integration Theory* (FIT). Ils postulent que lorsque seule une *feature* différencie un item d'un ensemble, la recherche permettant de l'identifier se fait de manière pré-attentive. Il n'y a donc pas dans ce cas de limite attentionnelle. Autrement dit, lorsqu'une seule dimension varie, cette variation est automatiquement perçue, et son traitement ne dépend pas du nombre de stimuli, le temps de détection et le nombre de fixations nécessaires ne varient donc pas. Ce phénomène est nommé effet *pop-out* (*i.e.* "saute aux yeux" ; voir Figure 1.2 pour un exemple).

A l'inverse, lorsque une conjonction de plusieurs *features* différencie la cible des distracteurs, la recherche visuelle serait sérielle (Gilbert & Sigman, 2007; Wolfe & Horowitz, 2004). Cette recherche demande alors une attention focale de nature attentive, et correspond à l'effet nommé *set-size* (voir Figure 1.2 pour un exemple).

Quel processus attentionnel pour la sélection visuelle ?

Bottom-up versus top-down Les processus visuels bottom-up renvoient à la sillance physique d'une scène visuelle, et ils dépendent directement des entrées sensorielles. Ils débutent dans les aires cérébrales de bas niveaux qui vont ensuite trans-

9. "This stability in fixation patterns makes the investigation of natural behavior unexpectedly accessible to experimental investigation".

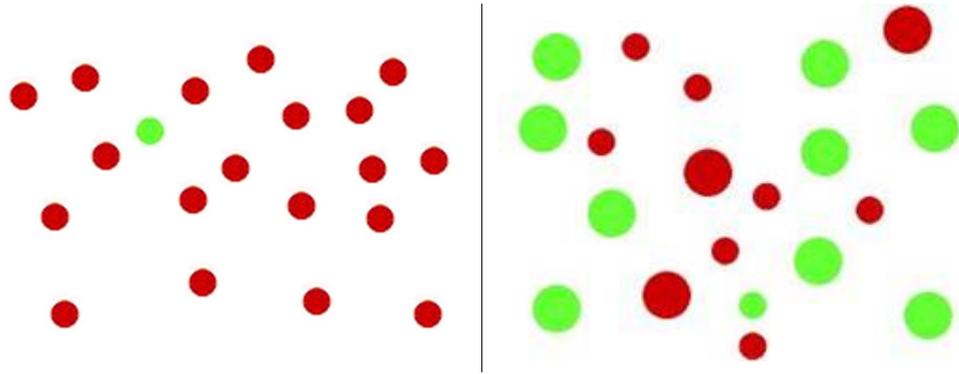


Figure 1.2.: La tâche dans cet exemple est de trouver le petit rond vert, avec à gauche un effet *pop-out* (une seule *feature* peut varier entre la cible et les distracteurs : la couleur), et à droite un effet *set-size* (deux *features* peuvent varier entre la cible et les distracteurs : la couleur et la taille).

mettre les informations vers les aires cérébrales supérieures. Les processus top-down renvoient quant à eux aux fonctions des objets présents dans la scène visuelle et à leur localisation. Ils sont associés au but suivi par l'individu, à son système de récompense, ou encore à un danger potentiel. Ils sont initiés dans les aires cérébrales supérieures, puis les informations issues de ces processus sont transmises vers les aires de bas niveau afin de moduler le traitement des entrées sensorielles. Ils ne dépendent donc pas directement de ces dernières.

Deux types de traitement top-down peuvent être distingués (Baluch & Itti, 2011; Chun & Jiang, 1998; Gilbert & Sigman, 2007). Les processus top-down “volontaires” (*volitional top-down process*) permettent par exemple, lors d'une illusion visuelle, de basculer entre deux interprétations (voir Figure 1.3, à gauche). A l'inverse, les processus top-down “involontaires” (*mandatory top-down process*) sont automatiques et persistants. Ils contraignent, par exemples lors d'un autre type d'illusion visuelle, à une seule interprétation, et cela alors même que la nature de l'illusion est consciente chez le participant (voir Figure 1.3, à droite).

Contrairement à la distinction entre processus pré-attentif et attentif vu précédemment, cette taxonomie s'attache d'avantage à ce qui dirige l'attention qu'à ce qui caractérise les processus. Néanmoins, il est possible de rapprocher ces deux taxonomies. Dans les faits, les prédictions posées par les modèles sous-jacents à ces deux distinctions se recouvrent suffisamment pour que cela ne gêne pas la généralisation de ces modèles utilisant les deux nomenclatures. En particulier, les phénomènes pop-out et set-size sont également utilisés pour définir les processus bottom-up et top-down. Par exemple, si un T rouge est présenté au milieu de T noirs, le regard se portera immédiatement dessus, puisque ce T est saillant, et la localisation de ce T sera connue immédiatement, puisque une seule *feature* le distingue des autres.

D'autre part, le modèle de Treisman & Gelade (1980), utilisant les notions de processus attentif et pré-attentif, a donné lieu a des modèles tel que celui de Koch

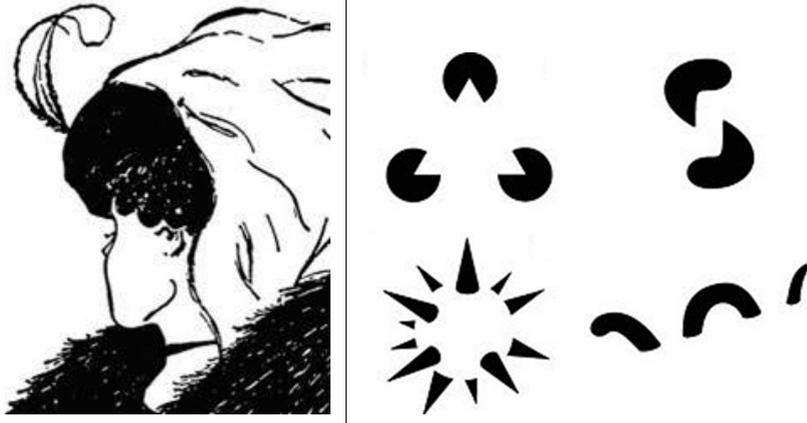


Figure 1.3.: A gauche, l'illusion de [Boring \(1930\)](#) mettant en évidence un exemple de processus top-down volontaire, puisqu'il est possible de *switcher* entre les deux interprétations, la jeune fille et la dame âgée ; à droite, quatre illusions dont le triangle de [Kanizsa \(1976\)](#), mettant en évidence un exemple de processus top-down involontaire, puisqu'il n'est pas possible de ne pas se représenter le triangle (haut-gauche), le cylindre (haut-droite), la sphère (bas-gauche) ou le serpent en continue (bas-droite).

& [Ullman \(1985\)](#) puis au modèle computationnel de [Itti et al. \(1998\)](#) (décrit dans la section 1.2.2), basés tout deux sur les notions de processus bottom-up et top-down. De plus, [Treisman & Gelade \(1980\)](#) précisent que pour les processus attentifs, la localisation d'une conjonction doit précéder l'identification de celle-ci, tandis que pour une *feature*, sa localisation et son identification peuvent être indépendantes. Cela repose sur le fait que des connaissances au préalable portent sur la localisation d'une conjonction concernant l'objet de la recherche visuelle ([Posner & Cohen, 1984](#)), rejoignant ainsi la définition des processus top-down qui nécessitent des connaissances et des attentes vis à vis de l'objet cherché, dont sa localisation.

Exogène versus endogène Une nomenclature proche de la notion de processus bottom-up et top-down introduit celle de processus endogène et exogène. Cette taxonomie met l'accent sur la *source* de l'information (dedans / dehors), tandis que la précédente met l'accent sur la *circulation* de l'information (de l'extérieur vers l'intérieur ou inversement). Les processus endogènes dépendent des connaissances préalables qu'une personne a de l'environnement et de ce que cette personne veut accomplir. Les processus exogènes sont des réponses proches du réflexe à l'environnement extérieur. Ils seront notamment dominants lorsque la personne a très peu de connaissance *a priori* dans une situation donnée, par exemple dans un lieu inconnu, ou lorsqu'aucun but n'est défini, par exemple lors d'une tâche d'exploration libre.

Du fait d'une certaine superposition entre ces deux nomenclatures, des désaccords

se produisent dans la littérature. A titre d'exemple, nous pouvons citer les deux phrases suivantes : "l'attention est attirée de façon exogène ('bottom-up') vers des stimuli avec une saillance physique élevée, tels qu'un mouvement soudain"¹⁰ Summerfield & Egner (2009), p 404 ; "un traitement exogène est facilement confondu avec un traitement bottom-up ou dirigé par le stimulus, mais ce n'est pas la même chose"¹¹ Trick et al. (2004), p 392. Ces derniers signalent en effet qu'un processus bottom-up peut être dans certains cas endogène. Par exemple, lorsqu'une réponse à un stimulus est apprise au point d'être devenue automatique, elle est dirigée par l'environnement mais peut être non intentionnelle (cet aspect peut être rapproché de la notion de conditionnement).

Pour éviter toute confusion, nous avons préféré orienter la suite de ce travail en termes de traitements bottom-up et top-down, d'autant que cette nomenclature est largement répandue dans la littérature, notamment dans celle qui inclue les principaux modèles utilisés pour ce travail de thèse.

1.2. Des modèles différents pour des processus différents

1.2.1. Distinctions entre les modèles théoriques et computationnels

Parmi les modèles proposés dans la littérature sur l'attention visuelle, il est possible de distinguer deux types de modèles : ceux dont l'objectif principal sera de valider un cadre théorique et ceux dont l'objectif sera d'émettre des prédictions quantitatives. Cette distinction que l'on propose ici n'est pas absolue, et la majorité des modèles actuels tendent à inclure ces deux facettes. En effet, les modèles plus théoriques permettent d'émettre des prédictions qualitatives mais également parfois quantitatives, et les modèles plus quantitatifs se basent néanmoins sur un cadre théorique. Cependant, pour la majorité des modèles, une de ces deux facettes est prédominante. Ce point est important car il permet de mieux appréhender la suite de ce travail. Comme nous allons le voir, l'objectif actuel de la plupart des modèles bottom-up, le plus souvent bio-inspirés, est de pouvoir prédire la position du regard, tandis que celui des modèles top-down est principalement d'agrandir et d'élargir nos connaissances des processus attentionnels. De ce fait, un des enjeux majeurs de la recherche dans ce domaine serait de pouvoir coupler ces deux approches.

Ces deux objectifs théorique et prédictif sont en partie liés à un angle d'approche différent modulé en partie par la discipline concernée : les sciences cognitives et les sciences pour l'ingénieur. Les limites et les avantages sont donc très différents selon

10. "attention is attracted exogenously ('bottom-up') towards stimuli of high physical salience, such as sudden motion"

11. "Exogenous processing is easily confused with bottom-up or stimulus-driven processing, but it is not the same thing".

l'approche, comme nous le verrons par la suite pour les modèles bottom-up et top-down. Nous verrons également que l'idéal serait d'arriver à trouver un modèle mixte, tant sur le plan théorique en incluant les processus bottom-up et top-down, que sur le plan opérationnel en regroupant les deux types d'approches : cadre théorique et prédiction quantitative.

La frontière entre ces deux approches et entre les deux disciplines est de plus en plus poreuse et des modèles mixtes sont proposés. Toutefois, en fonction de l'orientation académique des chercheurs, cela donne le plus souvent non pas des modèles parfaitement mixtes, mais des modèles soit top-down auxquels une composante bottom-up a été ajoutée, mais qui ne sont pas implémentables, soit bottom-up auxquels une composante top-down a été ajoutée, mais qui ne sont pas satisfaisants d'un point de vue théorique quant à l'implication des processus top-down.

1.2.2. Les modèles bottom-up : modèles computationnels

Un modèle de l'attention basé sur la saillance visuelle

A la suite des travaux de [Treisman & Gelade \(1980\)](#) et de leur *Feature Integration Theory*, un modèle théorique de carte de saillance a été proposé par [Koch & Ullman \(1985\)](#). Ce modèle est doté d'une dynamique interne qui génère des shifts attentionnels. C'est le premier modèle dans la littérature de contrôle de l'attention visuelle qui a une architecture computationnelle basée sur les neurosciences. Il s'articule autour de la notion de carte de saillance, qui reçoit une entrée sensorielle et fournit une stratégie de l'allocation de l'attention : le centre de l'attention balaye la carte de saillance par ordre décroissant de saillance.

Ce modèle théorique a ensuite servi de base au modèle proposé par [Itti et al. \(1998\)](#), qui est, parmi les modèles quantitatifs, le modèle bottom-up sans doute le plus connu. Ces auteurs ont adapté le modèle de [Koch & Ullman \(1985\)](#) afin de pouvoir l'implémenter et ainsi proposer des prédictions quantitatives. C'est donc un modèle quantitatif de la saillance visuelle d'une scène. Plus précisément, le modèle de [Itti et al. \(1998\)](#) permet de calculer quelles sont les zones les plus saillantes. Ce modèle, et d'autres de la même classe, sont des modèles prédictifs de l'allocation de l'attention *overt* qui reposent sur l'hypothèse que l'observateur fixe en priorité les zones les plus saillantes ([Itti & Koch, 2000](#)).

Pour [Itti & Koch \(2001\)](#), les modèles prédisant l'allocation de l'attention en se basant sur les processus bottom-up reposent sur cinq points théoriques : la saillance perceptive du stimulus, qui dépend du contexte ; la carte de saillance, qui est une représentation unique et topographique de la scène visuelle ; l'inhibition du retour, qui empêche temporairement de fixer à nouveau une zone déjà fixée ([Klein, 2000](#)) ; l'interaction entre les mouvements des yeux et l'allocation de l'attention ; l'interprétation de la scène et la reconnaissance des objets, qui vont modifier le choix des zones fixées (composante top-down).

Les différents modèles basés sur la saillance visuelle se distinguent généralement par la stratégie utilisée afin de trier les entrées sensorielles (choix des *features*) et

d'extraire la carte de saillance (comparaisons et compétition des *features*). Nous allons détailler dans ce qui suit celui proposé par Itti et al. (1998) et certaines de ses évolutions, afin de mieux appréhender l'essence d'un modèle construit initialement autour des processus bottom-up.

Les entrées sensorielles Le modèle initial de Itti et al. (1998) permet de prédire l'attention portée sur une scène visuelle en fonction de certaines de ses propriétés (*features*). Ces *features* ont été définies comme étant celles provoquant un effet de pop-out. Il s'agit de la couleur, l'orientation, et l'intensité.

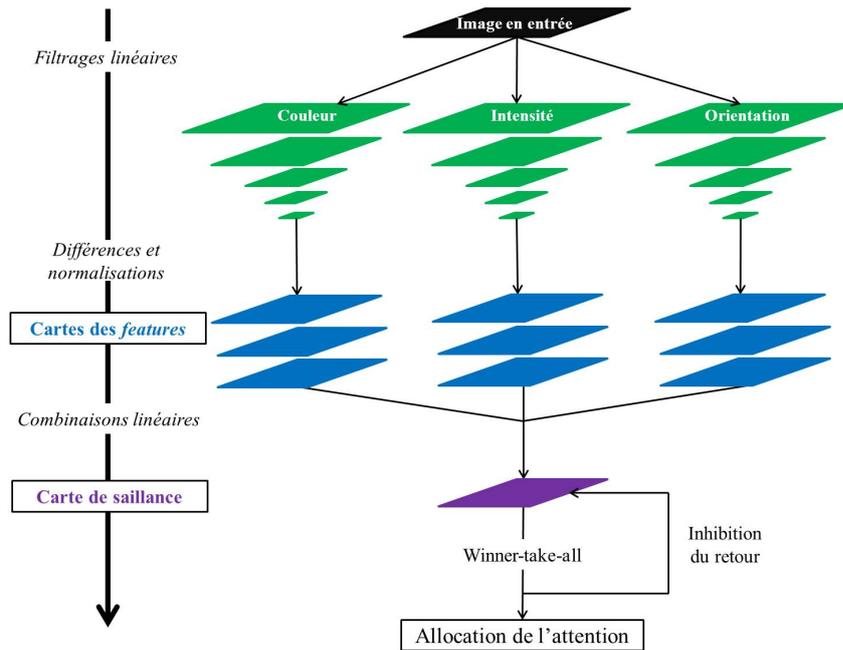


Figure 1.4.: Le modèle décrit par Itti et al. (1998) puis par Itti & Koch (2001). L'image donnée en entrée est décomposée en fonction des trois principales *features* (l'orientation, l'intensité et la couleur) et en fonction des zones de l'espace, à l'image des champs réceptifs des neurones. Le modèle produit ensuite des cartes de *features* sur la base des informations précédemment recueillies, puis, par combinaison de ces cartes, à une carte de saillance unique. En suivant le principe de *winner-take-all* (*i.e.* le point le plus saillant est choisi), le modèle prédit la prochaine position de l'attention visuelle. Puis, afin d'éviter de fixer ce même point indéfiniment, l'inhibition du retour permet d'inhiber ce point afin que la position de l'attention change.

Par la suite, ce modèle reposant sur trois *features* s'est vu compléter avec le mouvement en tant que tel, permettant de poser des prédictions dans un environnement dynamique (Itti, 2004). L'hétérogénéité de la rétine a également été implémentée

afin de rendre compte de l'anatomie de l'œil, permettant une perception différente des *features* en fonction de leur localisation par rapport à la position de l'œil de l'observateur (Zelinsky (2008), Target Acquisition Model). De même, d'autres évolutions permettent de prendre en compte certains effets, tel que le biais de centralité et le masquage visuel (Le Meur et al., 2006).

De même, la cohérence de ces modèles avec les données de la physiologie ne cesse d'augmenter, et des applications de plus en plus nombreuses voient le jour, notamment en robotique et pour le traitement d'image. Par ailleurs, de nombreuses autres *features* ont été mises en évidence (*e.g.* la résolution spatiale, le flux optique, la symétrie, la profondeur), mais des lacunes persistent dans les connaissances fondamentales (Wolfe & Horowitz, 2004), or les implémentations nécessitent une base solide de connaissances. Ce sont donc les trois *features* introduites précédemment qui restent les plus répandues.

La carte de saillance Le modèle quantitatif de Itti et al. (1998) s'est construit sur la base de l'intensité, de la couleur et de l'orientation.

Dans le modèle théorique, les trois *features* sont initialement traitées par trois canaux distincts. Ainsi, des *features* de la même modalité sont en compétition pour l'accès à la carte de saillance, puis pour être sélectionnées (avec le mode *winner-takes-all*), tandis que les différentes modalités contribuent indépendamment à la carte de saillance.

Une carte de saillance est réalisée pour chaque caractéristique issue de l'information bottom-up, à plusieurs échelles, puis ces cartes sont combinées afin de donner une seule carte de saillance (Koch & Ullman, 1985). Ceci implique la présence de mécanismes de compétition locale entre les différentes cartes (Itti et al., 1998; Itti & Koch, 2000). Le modèle est ensuite doté d'une dynamique interne, avec l'inhibition du retour, permettant de générer des shifts attentionnels (voir Figure 1.4 pour une représentation schématique du modèle).

Limites des modèles bottom-up : leur validité en situation naturelle

D'un point de vue théorique, les modèles bottom-up sont par définition dépendants des entrées sensorielles uniquement, et sont donc inflexibles dans le sens où les prédictions seront toujours strictement identiques du moment que la scène visuelle ne varie pas. Or, les mouvements des yeux peuvent varier, alors même que l'environnement visuel est le même. C'est un des résultats principaux des travaux de Yarbus. Dans une de ses études (Yarbus, 1967), des photographies ont été présentées plusieurs fois aux participants. Les questions posées par rapport à ces photographies variaient, modulant ainsi la tâche du participant (*e.g.* questions : "Donner l'âge des personnes" ou "Se rappeler des positions des personnes et des objets dans la chambre"). Alors même que les photographies étaient strictement identiques (les mêmes entrées sensorielles), des patterns oculomoteurs différents ont été observés.

Cette étude, et celles qui ont suivi, tendent donc à mettre en évidence la nécessité de prendre en compte les processus top-down. Lors de situations naturelles, il semblerait

même que ceux-ci soient dominants par rapport aux entrées sensorielles (Hayhoe & Ballard, 2005; Land & Furneaux, 1997; Land, 2004).

L'importance du but de l'observateur a donc été mise en évidence en démontrant que les mouvements des yeux dépendent des instructions données, et donc de la tâche (Howard et al., 2011; Yarbus, 1967). A cela s'ajoute le fait que plus la tâche se complexifie, et moins le mouvement des yeux dépend des propriétés de la scène visuelle (Foulsham et al., 2011; Land & Tatler, 2009).

La plupart de ces modèles bottom-up sont pensés, testés et validés en référence à des situations spécifiques, la majorité du temps l'exploration d'une image avec un délai court et en *free viewing* (observation libre), donc sans objectif spécifiquement défini (Hwang et al., 2009). Or, de nombreux travaux de la littérature tendent à montrer que lorsqu'il s'agit d'une scène naturelle (*e.g.* une photographie), l'orientation du mouvement des yeux par la saillance visuelle (bottom-up) joue un rôle mineur (Henderson, 2007; Henderson et al., 2009; Wolfe et al., 2010), tandis que la sémantique des objets, la tâche et les connaissances *a priori* sont de meilleurs prédicteurs de la direction du regard (Ballard et al., 1995; Hayhoe et al., 2003; Henderson & Hollingworth, 1999; Land & Lee, 1994; Land et al., 1999). En effet, les modèles bottom-up rendent très peu compte des patterns de fixations dans ces situations écologiques, les prédictions des modèles basés sur les processus top-down sont alors bien meilleurs (Einhäuser et al., 2008; Nyström & Holmqvist, 2008; Tatler et al., 2005).

Lors d'une expérience en environnement virtuel, Rothkopf et al. (2007) ont fait varier la saillance visuelle de différents éléments de l'environnement, ainsi que la tâche exécutée par les participants. Ils observent que la proportion des fixations, leur durée et les zones fixées dépendent de la tâche, avec un rôle minime de la saillance visuelle (bottom-up). Le contexte sémantique semble également prédictif. Puis ils ont implémenté le modèle bottom-up de Itti & Koch (2000), qu'ils ont comparé à leurs données comportementales, et les prédictions quantitatives se sont montrées non satisfaisantes. Ces auteurs ont donc pu conclure que les traitements bottom-up ne sont pas de bons prédicteurs de la direction du regard humain dans un environnement naturel.

Des recherches sur les mécanismes neuraux valident également le rôle joué par les traitements top-down. Nous pouvons citer l'étude de Li et al. (2004). Ces auteurs ont réalisé une expérience sur des singes qui devaient effectuer sur les mêmes stimuli soit une bissection de ligne, soit une tâche d'acuité visuelle. Alors que le stimulus visuel est strictement identique, ils ont pu observer une activation différente au sein de V1 selon la tâche exécutée (voir Annexe C). V1 étant la première aire corticale recevant l'information visuelle, il est intéressant de noter que l'influence de la tâche y joue "déjà" un rôle dans le traitement de l'information. Cette observation expérimentale est renforcée par des études en IRMf qui ont montré l'existence d'activation top-down au niveau du système visuel (Corbetta & Shulman, 2002; Egner et al., 2008; Weidner et al., 2002).

Les modèles strictement bottom-up sont donc mal adaptés aux tâches naturelles (Jovancevic et al., 2006; Jovancevic-Misic & Hayhoe, 2009). C'est pourquoi de plus en plus d'auteurs vont introduire une composante top-down dans ces modèles afin de

produire de meilleures prédictions (Follet et al., 2010).

1.2.3. Les modèles top-down : modèles théoriques

Un modèle de l'attention basé sur les attentes

Summerfield & Egner (2009) proposent un modèle basé sur les attentes (*expectations*). Ces attentes induisent des processus top-down “involontaires” et reflètent les informations *a priori* en fonction de leur possibilité ou de leur probabilité d'occurrences dans un environnement sensoriel futur. Il existe deux hypothèses concernant l'utilisation de ces attentes : les attentes peuvent guider la prise d'information, ou les attentes peuvent faciliter l'interprétation des entrées visuelles. En effet, il a été observé qu'un objet est identifié plus rapidement lorsqu'il est présenté dans un contexte congruent que s'il l'est dans un contexte non-congruent (Bar, 2004).

Ces mécanismes top-down peuvent faciliter le traitement de l'information à différentes étapes. Pendant la phase d'anticipation, ils permettent d'anticiper les caractéristiques qui vont être présentes et leur position. Pendant la phase d'acquisition sensorielle, ils permettent l'accumulation de preuves, et augmentent le ratio signal sur bruit afin de permettre aux caractéristiques visuelles attendues d'émerger. En présence de bruit, ils augmentent la trace du signal et du bruit, diminuent le temps de détection, mais augmentent les fausses alarmes. Pour finir, ils diminuent le seuil de décision.

Ce modèle repose sur la détection des erreurs de prédiction. Il produit des prédictions concernant la scène visuelle, puis ces prédictions vont être comparées aux entrées sensorielles. Lorsqu'il n'y a pas d'écart, donc que les entrées sensorielles sont en accord avec les prédictions, la réponse visuelle est très faible, signalant seulement la validation des prédictions. A l'inverse, lorsqu'il y a un écart entre les entrées sensorielles et les prédictions, la réponse visuelle augmente proportionnellement à cet écart, telle une alarme, ce qui correspond à ce que Itti & Baldi (2009) ont appelé “surprise”.

Limites des modèles top-down : l'implémentation

Les modèles de l'allocation de l'attention permettant d'émettre des prédictions quantitatives sont historiquement l'apanage de ceux basés sur les processus bottom-up. Les processus top-down sont beaucoup plus complexes à implémenter du fait qu'ils dépendent des buts de l'observateur et des connaissances préalables, ils sont difficiles à quantifier et même à décrire de manière objective. En effet, afin de prendre en compte l'ensemble des éléments qui contribuent à l'attention top-down, il faudrait pouvoir modéliser toute l'expérience de la personne, tout ce qu'elle a stocké dans sa mémoire à long terme, mais également le cheminement de ses processus cognitifs qui aboutissent à une action telle que le regard.

Et même sans aller aussi loin, le simple fait de connaître précisément le but suivi par la personne est un travail ardu, alors même que ce but lui a été donné par consigne.

En effet, cela nécessite d'être certain de sa compréhension de la consigne, de son expérience à ce sujet, et de ses objectifs personnels. Par exemple, le seul fait d'être en train de passer une expérience, et *a fortiori* d'être en présence d'un expérimentateur ou de savoir que celui-ci enregistre son comportement, peut induire des objectifs supplémentaires qui peuvent influencer le comportement de cette personne (*e.g.* les travaux en psychologie sociale sur la soumission à l'autorité, dans la continuité des travaux de [Milgram \(1963\)](#)).

Les processus bottom-up, quant à eux, nécessitent principalement la prise en compte des caractéristiques de la scène visuelle et les caractéristiques de l'œil qui sont bien connues, identiques pour tous, et plus facilement quantifiables ([Hubel & Wiesel, 1962](#)), même s'il reste de nombreuses choses à comprendre ([Carandini et al., 2005](#)).

Un certain nombre de modèles ont été proposés, partant de modèles bottom-up, afin de profiter de leur capacité prédictive, en y ajoutant des modulations top-down, afin de se rapprocher de situation naturelle.

[Borji & Itti \(2013\)](#) ont proposé une revue des modèles prédisant l'allocation de l'attention, et ont recensé un grand nombre des modèles quantitatifs existants. Leur article montre le classement de ces modèles en fonction de différentes caractéristiques, et nous pouvons voir 52 modèles basés sur les processus bottom-up versus 10 basés sur les processus top-down, top-down étant ici généralisable aux effets de contexte et correspond à tout ce qui n'est pas directement associé à une entrée sensorielle. Ainsi sont classifiés les modèles suivants comme étant des modèles généraux de l'attention : les modèles de [McCallum \(1996\)](#) et de [Jodogne & Piater \(2007\)](#) fondés sur l'apprentissage par renforcement, plus précisément pour le second, sur la récursivité spatiale à partir de l'extraction de *features* ; le modèle de [Rao et al. \(2002\)](#) inspiré de la psychophysique et de la notion d'excentricité ; le modèle de [Ramström & Christensen \(2002\)](#) fondé sur la théorie des jeux ; le modèle de [Navalpakkam & Itti \(2005\)](#) qui ajoute un biais top-down afin d'augmenter la saillance d'un objet en fonction de ses caractéristiques visuelles ; le modèle de [Paletta et al. \(2005\)](#) qui permet la reconnaissance d'objet à partir d'information visuelle locale ; le modèle de [Walker & Malik \(2002\)](#) qui catégorise les objets à partir de la texture ; et le modèle de [Borji et al. \(2011\)](#) qui ajoute au modèle de [Itti et al. \(1998\)](#) une influence inhibitrice entre chaque étape de construction de la carte de saillance à l'aide de poids qui évoluent avec l'apprentissage. Deux problèmes se posent concernant ces huit modèles : i/ ils sont très fortement inspirés de modèles bottom-up de l'attention visuelle auxquels des influences top-down ont été ajoutées, ce qui limite par définition la possibilité de faire évoluer ces composantes top-down vers des modèles théoriques explicatifs de l'attention visuelle ; ii/ ils ne sont pas applicables à une situation dynamique. Les deux modèles restants sont les seuls modèles quantitatifs de l'attention visuelle applicables à une situation dynamique et avec une composante top-down d'après [Borji & Itti \(2013\)](#) : le modèle de [Butko & Movellan \(2009\)](#) et le modèle de [Sprague & Ballard \(2003\)](#). Le modèle de [Butko & Movellan \(2009\)](#) a pour objectif la détection d'objets. Il se fonde sur les travaux de [Najemnik & Geisler \(2005\)](#) qui ont proposé un modèle optimal du mouvement des yeux. Ce modèle n'est donc pas à proprement

parler un modèle de l'attention visuelle top-down. Le modèle de [Sprague & Ballard \(2003\)](#) fait donc exception et sera développé dans la Section 1.3.2.

Ainsi, comme c'est souvent répété dans la littérature et comme le proclament [Jovancevic-Misic & Hayhoe \(2009\)](#), aucun n'est réellement satisfaisant à l'heure actuelle : "Actuellement, aucun modèle du contrôle du regard ne peut rendre compte du contrôle du regard dans des environnements naturels et dynamiques. [...] la classe des modèles basés sur des propriétés du stimulus (*i.e.*, les modèles de saillance) ne peut pas expliquer les patterns oculomoteurs que nous observons. Bien qu'il y ait eu plusieurs tentatives pour modéliser les effets top-down pour le contrôle du regard, de telles tentatives prennent généralement la forme d'une pondération top-down d'une carte de saillance issue d'un filtrage bottom-up de l'image ([Wolfe, 1994](#); [Navalpakkam & Itti, 2006](#); [Torralba et al., 2006](#)) et ne s'attachent pas aux mécanismes qui déterminent si, et quand, un objet ou un emplacement est choisi par l'observateur comme une cible dans le cadre d'une séquence comportementale en cours"¹² [Jovancevic-Misic & Hayhoe \(2009\)](#), p 6237.

1.3. L'attention visuelle en situation naturelle

1.3.1. Qu'appelle-t-on une "tâche naturelle" ?

Afin d'étudier l'attention visuelle, un certain nombre de tâches sont utilisées de manière récurrente dans la littérature. Celles-ci peuvent se distinguer en deux grandes classes selon qu'elles permettent d'accentuer soit la validité interne des hypothèses (les tâches dites de laboratoire comme par exemple les tâches de détection, la recherche visuelle, ou même l'exploration libre), soit la validité externe des hypothèses (les tâches dites naturelles).

La validité interne, qui implique un meilleur contrôle des différentes variables testées, permet d'avoir une plus grande confiance dans les résultats obtenus puisque le lien entre les hypothèses *a priori* et les effets observés est plus direct. La validité externe, qui associe les hypothèses à une situation ou à une tâche plus proche de celle vécue au quotidien, permet une généralisation plus aisée de l'effet observé à la même situation hors expérimentation, et par la même, à d'autres situations voisines. A l'échelle de la recherche, les deux types de validité sont donc complémentaires et indispensables.

Un aspect qu'il nous semble intéressant de considérer afin de distinguer une tâche naturelle d'une tâche en laboratoire est la consigne. Plus celle-ci contraint la tâche (elle peut également être longue et détaillée), et plus nous pouvons en déduire que

12. "Currently, no model of gaze control can account for control of gaze in natural, dynamic environments. [...] the class of models based on stimulus properties (*i.e.*, saliency models) cannot explain the gaze patterns we observe. Although there have been several attempts to model top-down effects in gaze control, such attempts usually take the form of a top-down weighting of the saliency map provided by bottom-up filtering of the image ([Wolfe, 1994](#); [Navalpakkam & Itti, 2006](#); [Torralba et al., 2006](#)) and do not address the mechanisms that determine whether, and when, an object or location is chosen by the observer to be a target in the context of an ongoing behavioral sequence."

la tâche en question est non intuitive pour le participant et éloignée d'une tâche qu'il pratique au quotidien. Une tâche naturelle peut également se caractériser par le dispositif utilisé : plus le dispositif sera dit écologique, plus la tâche sera naturelle (*e.g.* chercher un objet dans une photographie versus dans un environnement virtuel).

A titre d'exemple pour le type de tâches naturelles qui ont été étudiées, nous pouvons citer les travaux de [Buswell \(1920\)](#), [Butsch \(1932\)](#), et [Weaver \(1943\)](#), qui se sont respectivement intéressés à la lecture à haute voix, à la dactylographie et à jouer du piano. Des travaux plus récents ont par exemple permis d'étudier la stratégie des mouvements oculaires lorsque le participant verse du thé ([Land et al., 1999](#)), lit sur une tablette ([Perrin et al., 2014](#)), ou doit effectuer un parcours pour chercher et rapporter un objet ([Foulsham & Kingstone, 2012](#)).

1.3.2. Des modèles théoriques et quantitatifs de l'attention visuelle

Un modèle basé sur l'incertitude et la récompense

Afin de rendre au mieux compte de l'attention visuelle, en ayant un modèle qui posséderait à la fois les avantages liés à un cadre théorique fort et à la possibilité d'être implémenté, l'objectif est de tendre vers un modèle mixte de l'attention visuelle.

Comme le soulignent [Jovancevic-Misic & Hayhoe \(2009\)](#), le modèle actuel qui semble le mieux répondre à ces différents objectifs est le modèle proposé par [Sprague et al. \(2007\)](#). Le modèle de [Sprague & Ballard \(2003\)](#), développé par la suite par [Sprague et al. \(2007\)](#), est un modèle du contrôle du regard lors d'une tâche visuo-motrice complexe avec de multiples buts en compétition. Il repose sur deux notions fondamentales : l'incertitude et la récompense. Chaque mouvement des yeux sert à réduire l'incertitude liée aux variables environnementales. Chaque action, incluant les mouvements des yeux, est choisie en fonction des bénéfices attendus à long terme. Les zones non regardées augmentent l'incertitude sur les variables associées, et donc indirectement diminuent le gain total anticipé. La récompense sera donc dépendante de l'estimation du coût de l'incertitude si une zone n'est pas regardée, donc si l'information présente n'est pas prélevée. C'est ce que les auteurs appellent la maximisation de la récompense. Ainsi, le modèle considère un ensemble de micro-comportements (notamment des comportements oculomoteurs, mais également pour se déplacer dans l'environnement) parmi lesquels il en choisit un à chaque pas de temps. Ces micro-comportements dépendent à la fois de l'environnement (à rapprocher de la composante bottom-up) et de la tâche (à rapprocher de la composante top-down).

Le cœur de ce modèle est l'aspect multi-tâche. En effet, la représentation théorique la plus répandue de l'allocation de l'attention visuelle suit schématiquement la représentation suivante : à une tâche est associée une information visuelle, et cette information est localisée dans une zone spatiale. Or, cette association entre une tâche et une information n'a de sens que si l'on prend en compte l'aspect multi-tâche, sans quoi aucune variabilité n'est introduite, aucun switch attentionnel, ce qui ne rendrait

pas compte de la réalité. De plus, les tâches de référence en laboratoire (et dans les modèles construits sur des données de laboratoire) sont souvent l'exploration libre (*free viewing*) ou la recherche d'objets (*search task*). Dans ce dernier cas, il y a une incertitude sur la zone spatiale associée à l'information, créant les *switchs* attentionnels. Sprague et Ballard s'intéressent à l'aspect multi-tâche, mais pour chaque tâche, la localisation de l'information est évidente, elle fait partie des connaissances de la personne. Le fait de connaître au préalable la localisation d'une information est central dans la notion de tâche naturelle : on ne cherche pas l'information dont on a besoin, on sait à l'avance où celle-ci se trouve.

Néanmoins, aucun modèle n'est pour le moment pleinement satisfaisant, comme nous l'avons vu précédemment, y compris celui proposé par Sprague et Ballard (Tatler, 2012), qui est généralement considéré comme étant le plus prometteur. Cependant, dans ce modèle, le pilier théorique est la notion de récompense sur le long-terme, qui nécessite un calcul complexe et l'estimation d'un grand nombre de paramètres, impliquant beaucoup de choix numériques qu'il n'est pas toujours possible de justifier. De plus, l'objectif premier de ce modèle est plus de simuler les comportements microscopiques du mouvement des yeux, fixation par fixation, que de prédire la prise d'information à un niveau macroscopique. Cependant, les comparaisons finales entre les sorties du modèle et les données se font au niveau macroscopique, avec des temps de regard. Comme nous allons le voir par la suite, c'est au niveau macroscopique que nous avons également voulu situer la comparaison avec les données. Or, les contraintes liées à ce modèle, sur le fait de fixer des paramètres pour lesquels les incertitudes peuvent être importantes, peuvent entraîner une multiplication des erreurs. Nous avons donc choisi de suivre le principe de parcimonie, et ne pas traiter la problématique à un niveau microscopique, quelle que soit l'étape.

Cependant, au delà de ce modèle, c'est l'aspect multi-tâche qui guide notre propos lors de ce travail. En effet, la recherche tendant de plus en plus à expliquer l'attention visuelle lors d'une tâche naturelle, comme nous l'avons vu précédemment, cet aspect multi-tâche devient de plus en plus central.

Un modèle basé sur les attentes et la valeur de l'information

Afin de comprendre comment l'information visuelle est sélectionnée lors d'une situation multi-tâche, beaucoup de modèles se sont basés sur ce que l'on appelle la stratégie optimale. Cela repose sur le fait qu'il existe une manière optimale de recueillir l'information visuelle nécessaire à la réalisation d'une tâche. Un expert dans la réalisation de cette tâche devrait donc tendre à adopter cette stratégie. Cette stratégie optimale de la distribution de l'attention visuelle dépend essentiellement de deux facteurs top-down : les Attentes, *Expectancy*, associées à une source d'information visuelle donnée, et sa Valeur pour la tâche, *Value* (Carbonell, 1966; Carbonell et al., 1968; Moray, 1986; Sheridan, 1970; Sheridan & Rouse, 1972; Tulga & Sheridan, 1980). L'encadré présente l'évolution de ces notions d'*Expectancy* et de *Value* et situe ce travail de thèse vis à vis de celles-ci.

Afin d'apporter une explication aux mouvements des yeux des pilotes de l'armée

de l'air américaine (USAF - US Air Force) observés par [Fitts et al. \(1950\)](#), [Senders \(1966\)](#) fut un des premiers à utiliser les aires d'intérêt (AOIs) afin d'opérationnaliser les modèles basés sur les attentes et la valeur. Il introduit également la notion de débit (*Bandwidth*) d'un signal lors d'une activité multi-tâche dynamique, qui correspond à la fréquence du renouvellement de l'information. Ce débit est alors considéré comme modulant les attentes liées à une information, et influencerait à ce titre le mouvement des yeux.

Dans la continuité de ces travaux, [Wickens et al. \(2001\)](#) ont proposé un modèle afin d'expliquer l'allocation de l'attention visuelle lors d'une situation multi-tâche. Ce modèle s'intitule SEEV, pour *Saliency, Effort, Expectancy, et Value*.

Wickens stipule que les attentes et la valeur de l'information modulent la composante top-down de l'attention visuelle. Dans son modèle, les attentes font référence à la quantité d'informations pertinentes attendues dans une AOI donnée. Si certaines informations pertinentes changent continuellement au fil du temps (avec un débit élevé, pour reprendre les termes de Senders), les attentes seront plus grandes, l'information devenant rapidement obsolète. La valeur fait référence à la pertinence d'un élément de l'information pour une tâche donnée.

Cependant, pour lui, les attentes et la valeur de l'information n'expliquent pas tout. En effet, de précédentes études portant sur les modèles rationnels optimaux se sont intéressées au regard des experts, des personnes formées à une tâche donnée ([Moray, 1986](#)). L'hypothèse était qu'un expert, un pilote d'avion par exemple, a un modèle optimal qui réduit au minimum le risque de manquer des informations importantes.

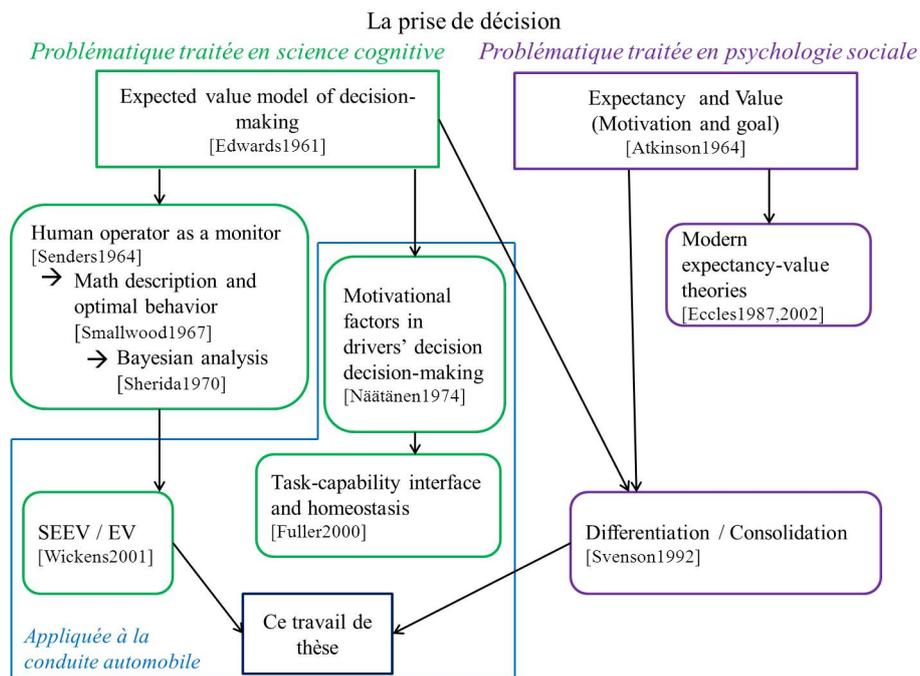
Il est donc important de comprendre les écarts entre les comportements observés et ces modèles optimaux, c'est-à-dire entre ces personnes expertes et des personnes connaissant la tâche mais n'étant pas expertes. Afin de prendre en compte ces écarts possibles avec une stratégie visuelle optimale, Wickens a donc ajouté à son modèle deux composantes bottom-up : la saillance et l'effort. La saillance fait référence à la saillance visuelle des objets dans la scène, et est considérée comme une source de biais dans le comportement visuel: un élément de faible importance pour la tâche peut être regardé à cause de sa forte saillance visuelle, ce qui conduit à un comportement non-optimal.

L'effort est associé au coût de la sélection d'une information. Il peut dépendre de la distance angulaire entre cette information et la position du regard à un moment donné. Par exemple, une saccade d'une zone d'intérêt à l'autre peut être considérée comme ayant un coût élevé, pouvant amener la personne à moins regarder cette zone alors même que les attentes liées aux informations qu'elle contient devrait conduire au contraire à plus de regards.

Nous avons choisi de nous baser sur ce modèle afin de répondre à la première partie de notre problématique (voir Chapitre 3).

“Expectancy” et “Value”

À noter que durant la même période, la plupart des modèles de la prise de décision ont également commencé à considérer ces deux composantes, *Expectancy* et *Value*, comme étant les principaux facteurs : [Edwards \(1961\)](#) parlait de valeur attendue (*expected value*), tandis que toute une théorie de la motivation reposant sur les attentes et la valeur de l’information a été proposée par [Atkinson \(1964\)](#), suivi puis réactualisée plus récemment par [Eccles & Wigfield \(2002\)](#). Les définitions sous-jacentes à ce vocabulaire divergent un peu de celles dans le domaine qui nous intéresse ici, mais cependant cela signifie que les notions d’attente et de valeur, au sens large, associées à une information ne sont pas restreintes à l’étude de l’attention visuelle.



Le graphique ci-dessus représente différents modèles, tous issues de la notion d’Expectancy et de Value, spécifiés par quelques mots clefs. Les flèches représentent le lien entre deux modèles, avec celui d’où part la flèche qui est celui qui a inspiré en partie le modèle suivant. Une référence principale est donnée pour chaque : [Edwards1961], [Edwards \(1961\)](#) ; [Senders1964], [Senders \(1964\)](#) ; [Smallwood1967], [Smallwood \(1967\)](#) ; [Sherida1970], [Sheridan \(1970\)](#) ; [Näätänen1974], [Näätänen & Summala \(1974\)](#) ; [Fuller2000], [Fuller \(2000\)](#) ; [Wickens2001], [Wickens et al. \(2001\)](#) ; [Atkinson1964], [Atkinson \(1964\)](#) ; [Eccles1987,2002], [Eccles \(1987\)](#) et [Eccles & Wigfield \(2002\)](#) ; [Svenson1992], [Svenson \(1992\)](#).

Une situation naturelle et multi-tâche : la conduite automobile

L'objectif de notre travail de thèse est d'explorer l'allocation de l'attention visuelle lors d'une tâche spécifique, la conduite automobile. Mais qu'est-ce qui caractérise une tâche de conduite ? Remarquons tout d'abord que la tâche de conduite possède de nombreux avantages pour étudier l'attention visuelle. Le rôle de la perception visuelle y est essentiel (Sivak, 1996), notamment pour des enjeux de sécurité associés à l'attention, ce qui explique que les études s'y rapportant foisonnent dans la littérature (Bao & Boyle, 2009; Land & Lee, 1994; Louveton et al., 2012; Owsley & McGwin Jr, 2010).

Le Chapitre 1 a permis de préciser quels processus de l'attention visuelle vont être considérés dans ce travail, à savoir les processus top-down de l'attention visuelle dite *overt*, de mettre l'accent sur les modèles à la fois théoriques et quantitatifs, et ceci dans une situation naturelle et multi-tâche. Il a également été mentionné que nous pouvions définir *a minima* l'attention comme étant le lien entre une tâche et l'information localisée nécessaire à cette tâche. C'est ce dernier point qui va attirer notre propos dans ce deuxième chapitre. Plus spécifiquement, nous allons approfondir ce lien tâche / information au travers de l'apprentissage d'une tâche, puis, plus spécifiquement, nous allons voir en quoi la tâche de conduite est naturelle et multi-tâche.

2.1. La conduite : une situation naturelle

2.1.1. Apprentissage d'une tâche

De nombreux modèles existent afin d'expliquer comment une tâche est apprise. Rasmussen (1983) propose notamment un modèle hiérarchique décrivant les différentes étapes des processus d'apprentissage. Son intérêt initial portait sur l'étude des erreurs de comportement, mais ce modèle peut être appliqué à la question de l'apprentissage afin d'expliquer plus généralement les performances humaines.

Il propose trois types de comportements organisés de manière hiérarchique : les comportements basés sur les compétences (*skills*), les comportements basés sur les règles (*rules*), et les comportements basés sur les connaissances (*knowledge*). Les comportements basés sur les compétences renvoient aux performances sensori-motrices, qui sont automatiques, et qui peuvent être uniquement contrôlées par les feedback issus de signaux d'erreur. Ils permettent de synchroniser les mouvements avec l'environnement. Ces comportements n'impliquent pas nécessairement d'attention consciente, il n'est donc pas toujours possible pour la personne de dire comment le contrôle s'effectue ni sur quelles informations il est basé (*e.g.* lire un article scientifique). Les comportements basés sur les règles renvoient à un contrôle issu des expériences antérieures réussies. Ils reposent sur le savoir-faire explicite, et peuvent être expliqués par la personne (*e.g.* corriger un article scientifique¹). Les comportements basés sur les connaissances renvoient à un but explicitement formulé, basé sur une analyse de l'environnement et de l'objectif. La personne considère différents plans, fait des prédictions sur chacun, et en sélectionne un (*e.g.* rédiger un article scientifique). Ces comportements sont représentés explicitement par un modèle mental.

Face à une situation nouvelle, le comportement sera d'abord basé sur les connaissances (référant à une phase cognitive). Avec la répétition de cette même situation, le comportement sera basé sur des règles qui vont être acquises (référant à une phase intermédiaire ou associative), puis basé sur des compétences, permettant ainsi une réponse de plus en plus automatique (*e.g.* apprendre à marcher). C'est pourquoi la notion de hiérarchie est prédominante.

2.1.2. Application à la conduite

La représentation minimale de l'attention visuelle, introduite précédemment, est un lien entre une tâche et une information localisée. Ainsi, apprendre à réaliser une tâche implique d'apprendre où est l'information utile à la réalisation de cette tâche. De ce fait, la tâche structure l'apprentissage et donc le comportement, ici le comportement oculomoteur. En d'autres termes, ceux de [Gibson et al. \(1979\)](#), afin d'apprendre une tâche nous allons chercher des invariants et les apprendre. C'est le cas en particulier de la tâche de conduite, seulement, les règles, les objectifs et le cadre de cette tâche ont été entièrement pensés par l'être humain afin de faciliter cette tâche. De plus, du fait des enjeux de la sécurité routière, les informations utiles à cette tâche, leur signification et leur localisation ont été et sont encore des sujets de recherche afin d'améliorer sans cesse leur accès et faciliter la tâche de conduite ([Shinar, 2007](#)). La conception des routes comporte une grammaire de manière à ce que la route soit lisible. L'ensemble de ces codes sont répertoriés et doivent être appris par les futurs conducteurs.

Ainsi, en se référant au modèle de Rasmussen précédemment décrit, la majorité des conducteurs dans la majorité des situations devraient baser leurs comportements

1. Les exemples donnés ici n'ont pas été choisis pour la capacité à apprendre la tâche, puisque le niveau de maîtrise / d'automatisme d'une tâche dépend de l'individu, mais pour illustrer chacun des trois comportements.

sur des compétences, ou *a minima* sur des règles, mais très rarement sur leurs connaissances. Le tableau 2.1, extrait de la thèse de [Bornard \(2013\)](#), permet d’illustrer ceci. Il met en relation les trois sous-tâches de [Michon \(1985\)](#) que nous détaillerons dans la partie suivante, et le modèle d’apprentissage de [Rasmussen \(1983\)](#) appliqué ici à la tâche de conduite. Des exemples de situations de conduite y sont présentés pour chacun des comportements décrit par [Rasmussen \(1983\)](#) en fonction de la sous-tâche de conduite. Nous pouvons remarquer que les exemples de la première ligne sont relativement rares, et seraient étiquetés comme des conditions spécifiques lors d’une expérimentation. Ce qui ressort est le fait qu’une grande majorité des tâches rencontrées lors d’une conduite quotidienne font appel à des comportements basés sur les compétences ou sur les règles (*e.g.* les trajets domicile-travail représentent environ 40% des trajets en France en semaine).

	Niveau Stratégique	Niveau Tactique	Niveau Opérationnel
Connaissance	Naviguer en site inconnu	Carrefour atypique et complexe	Conducteur novice
Règle	Choix entre routes familières	Dépassement de véhicule	Usage véhicule non familier
Compétence	Usage itinéraire quotidien	Négocier intersection familière	Contrôle de la trajectoire

Table 2.1.: Mise en relation des niveaux identifiés par [Michon \(1985\)](#) et [Rasmussen \(1983\)](#), les exemples présentés sont extraits de la thèse de [Bornard \(2013\)](#).

2.2. La conduite : une situation multi-tâche

2.2.1. Les différents types de sous-tâches de la conduite

Comparé au modèle de [Rasmussen \(1983\)](#), les modèles qui suivent sont des modèles cognitifs du comportement incluant la notion d’entrées perceptives, c’est-à-dire que le modèle fonctionne d’une certaine manière selon l’information visuelle extérieure, permettant ainsi de faire le lien avec l’attention visuelle.

Pour [Allen et al. \(1971\)](#), la tâche de conduite est divisée en différents niveaux de sous-tâches, chacun étant associé à un type d’attente en termes d’information : le contrôle, le guidage et la navigation. Les sous-tâches du contrôle consistent dans le contrôle immédiat du véhicule en réponse aux entrées sensorielles, aux trajectoires. Elles sont automatiques, rapides, et se situent au dessous du niveau de conscience, se rapprochant d’un automatisme sensori-moteur. Les sous-tâches de guidage consistent à négocier les situations de conduite telles que les intersections, le trafic, les obstacles. Elles sont liées à la situation et prennent en compte la nature et la structure de l’environnement, ainsi que les interactions avec les autres usagers. Les sous-tâches de

navigation consistent à choisir le but, sélectionner la route, et évaluer les coûts et les bénéfices. Elles dépendent de la préparation antérieure de l’itinéraire. Pour chacun de ces niveaux de sous-tâches, des informations visuelles spécifiques sont recueillies. Celles-ci sont détaillées dans le tableau 2.2.

Niveau de sous-tâche	Type de sous-tâche	Type d’informations requises
Allen ↔ Contrôle Michon ↔ Opérationnel	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle latéral <ul style="list-style-type: none"> ↔ remettre véhicule sur la voie ↔ suivre la route voulue ↔ en ligne droite ↔ en virage ↔ en suivi de véhicule • Contrôle longitudinal <ul style="list-style-type: none"> → la vitesse 	<ul style="list-style-type: none"> → point “proche” → point “éloigné” ↔ point de fuite ↔ point tangent ↔ véhicule devant → tableau de bord et flux visuel
Allen ↔ Guidage Michon ↔ Tactique	<ul style="list-style-type: none"> • Gérer l’aménagement, les interactions avec les autres usagers, et les obstacles de l’environnement 	<ul style="list-style-type: none"> → la signalisation, les usagers et l’environnement
Allen ↔ Navigation Michon ↔ Stratégique	<ul style="list-style-type: none"> • Préparation de l’itinéraire et planification • Choix de la direction pendant le déplacement 	<ul style="list-style-type: none"> → panneaux de direction, GPS

Table 2.2.: Sous-tâches de la tâche de conduite d’après [Allen et al. \(1971\)](#) et [Michon \(1985\)](#), et informations visuelles associées. Les notions de point “proche” et point “éloigné” ont été introduites par [Donges \(1978\)](#), le détail du point “éloigné” a été décrit par [Salvucci & Gray \(2004\)](#).

Les performances à ces trois niveaux de sous-tâche peuvent également être décrites en fonction de leur fenêtre temporelle : macro performance pour la planification et la gestion de l’itinéraire (tâche de navigation) qui peut prendre quelques secondes à plusieurs heures ; performance de situation pour la gestion des situations (tâche de guidage) qui peut prendre quelques secondes ; et micro performances pour le contrôle du véhicule qui est inférieur à une seconde.

[Michon \(1985\)](#) a par la suite proposé un cadre théorique en psychologie cognitive, incluant un modèle hiérarchique de la tâche de conduite. Les trois niveaux de sous-tâches composants celle-ci sont proches de ceux proposés par Allen (voir Table 2.2). La nomenclature a néanmoins changé, les sous-tâches de contrôle, de guidage et de navigation sont respectivement nommées sous-tâches opérationnelles ou de manœuvre, sous-tâches tactiques, et sous-tâches stratégiques.

Ainsi, ce qui est appelé communément “tâche” de conduite nécessite de nombreuses

sous-tâches impliquant leurs propres processus cognitifs, objectifs et information pertinentes. La tâche de conduite peut donc être considérée comme étant multi-tâche. Ce sont les interactions entre différentes sous-tâches qui seront étudiées dans ce travail de thèse.

2.2.2. L'importance de la sous-tâche "prise de décision"

Nous allons dans cette partie mettre l'accent sur une sous-tâche tactique en particulier : la prise de décision.

Salvucci (2006) a proposé un modèle computationnel utilisant l'architecture cognitive ACT-R de Anderson (1996), qui permet d'aller plus loin concernant la question de la nature de la tâche de conduite. Ce modèle repose sur un modèle appelé ETA (Byrne, 2001), comprenant trois composantes : la cognition incarnée, pour les traitements cognitif, perceptif, et moteur ; la tâche (ce que la personne veut faire), pour les sous-tâches opérationnelle, tactique, et stratégique (Michon, 1985) ; et les artefacts (instruments permettant de faire la tâche), pour le véhicule et l'interface entre l'humain et le véhicule.

Salvucci (2006) distingue deux types de connaissances : les connaissances déclaratives et les connaissances procédurales (Apt et al., 1986; Corbett & Bhatnagar, 1997). Une connaissance déclarative est composée d'unités de groupement (*chunk*) qui encodent des faits simples, des buts courants, et des informations de situations. Les unités de groupement sont associées à des paramètres symboliques qui encodent leur valeur. L'apprentissage correspond à une modification de ces paramètres. Une connaissance procédurale est composée de lois de production, renvoyant aux compétences procédurales manipulées par les compétences déclaratives. Ces lois de production génèrent une action spécifique pour une condition spécifique, modifiant ainsi la mémoire déclarative, et initiant un nouveau but.

Trois sous-tâches sont implémentées dans ce modèle : le contrôle, la surveillance, et la prise de décision. Dans un contexte de conduite automobile, le contrôle, lié à la perception de bas niveau, est apparenté aux sous-tâches opérationnelles de Michon (1985). Il existe deux types de contrôle. Le contrôle latéral repose, d'après Salvucci & Gray (2004), sur deux points, le point proche (*near point*), qui est un point fixe à 10 mètres devant le véhicule, et le point éloigné (*far point* ou *vanishing point*), qui permet d'anticiper les courbures de la route et qui se situe, en situation de ligne droite, deux secondes devant le véhicule ; en suivi de véhicule, sur le véhicule devant ; en situation de virage, sur le point tangent (Salvucci & Gray, 2004) (voir d'autres modèles de contrôle latéral dans Lappi (2014)). Le contrôle longitudinal repose sur l'accélération, calculée en estimant la vitesse de sa propre voiture et la précédente (*i.e.* la loi de poursuite).

La surveillance peut être définie comme une sous-tâche tactique au sens de Michon (1985). Elle est axée sur l'encodage de l'environnement et implique un rôle important de la mémoire déclarative afin de produire des prédictions immédiates. La prise de décision est également appariée aux sous-tâches tactiques de Michon (1985), axée sur les manœuvres basées sur nos connaissances. Elle utilise les informations réunies

durant le contrôle et la surveillance, notamment sur l'autoroute (qui est le cadre applicatif du modèle de [Salvucci \(2006\)](#)), dans le but de déterminer si, et quand, changer de voie.

Ce modèle imite les capacités humaines en intégrant des mécanismes perceptifs et moteurs qui évoluent en fonction de l'environnement. Il simule également certaines limites humaines, notamment les traitements perceptifs et moteurs se font en parallèle, mais les traitements cognitifs sont sériels (se traduisant par le fait d'être attentif à une chose à la fois). Cela rend compte de l'effet de la double tâche concernant les tâches secondaires pouvant être ajoutées à la tâche de conduite.

[Salvucci \(2006\)](#) a ainsi pu valider ce modèle, les résultats ayant montré son fort pouvoir prédictif pour l'angle du volant, la position sur la voie, les proportions de regard dans des zones pré-définies, l'angle de braquage, et la position latérale. Par contre, ce modèle semble avoir une très forte variabilité concernant les mouvements des yeux.

Ce modèle n'est pas axé sur la perception visuelle et l'attention directement mais plutôt sur les processus cognitifs sous-jacents. Il nous permet cependant de souligner l'importance de considérer chacun des trois niveaux de sous-tâche et de distinguer les informations utilisées pour chacune d'entre elles. La tâche de conduite est complexe et fait intervenir trois niveaux de sous-tâches pouvant regrouper chacune plusieurs processus cognitifs. A un moment donné, pour une action donnée, l'ensemble de ces sous-tâches peuvent être nécessaires simultanément.

2.2.3. Un modèle de la prise de décision

Dans des situations quotidiennes avec une pression temporelle, les décisions prises ne sont pas toujours optimales. Si une première décision est prise, permettant d'enclencher l'action appropriée, un contrôle visuel peut vérifier la validité de la décision avant que cette action ne soit terminée. Par exemple, un certain nombre de tâches avec le mouvement du bras ou des mains nécessitent un contrôle visuel, comme la saisie d'une cible statique ([Goodale, 2011](#)) ou l'interception d'une cible dynamique ([Brenner & Smeets, 2011](#)). Ce contrôle visuo-moteur est alors souvent considéré comme étant de bas niveau dans le sens où une nouvelle décision n'est pas prise dans les aires de haut niveau et n'accède pas à la conscience. Ceci représente un domaine très étudié dans la littérature ([Jeannerod, 1981](#); [Patla & Goodale, 1997](#); [Warren & Fajen, 2004](#)).

Cependant, ce type de contrôle visuo-moteur, qui apparaît dans de nombreuses situations de la vie réelle, comme lors d'un changement de voie en conduite ([Wallis et al., 2007](#)), n'est pas considéré dans la plupart des modèles de prise de décision, que ce soit dans les modèles généraux de la prise de décision ([Eccles & Wigfield, 2002](#); [Gigerenzer & Gaissmaier, 2011](#); [Kahneman, 2002](#)), mais également du côté de la décision perceptive ([Geisler, 2011](#); [Summerfield et al., 2012](#)), des tâches naturelles ([Sprague & Ballard, 2003](#)), avec de la pression temporelle ([Maule et al., 2000](#)) ou de la théorie de l'action ([Nenkov & Gollwitzer, 2012](#)).

L'apport du modèle Diff / Cons de la prise de décision Svenson (1992) a proposé une théorie de la prise de décision en termes de Différentiation et Consolidation (Diff / Cons), qui prend en compte ce délai entre la décision et l'action, permettant de modifier éventuellement la décision, en introduisant une évolution dans le temps du processus cognitif de décision divisé en deux phases (Svenson et al., 2009). La première décision est nommée "pré-décision" (*prior decision*). La première phase, qui conduit à cette pré-décision, correspond au processus de "différenciation" (D). Durant le processus D, l'information disponible est évaluée. Son objectif est de faire le meilleur choix possible compte tenu de la situation actuelle.

La seconde phase suit cette pré-décision. Elle correspond au processus de "consolidation" (C). Durant le processus C, la pré-décision est vérifiée au vu des informations visuelles disponibles afin de diminuer l'incertitude et renforcer / valider la décision, ou de modifier celle-ci, et conduit à la décision finale. Son objectif est de vérifier si l'information actuelle est conforme en augmentant progressivement la confiance dans cette pré-décision. Elle dure jusqu'à la réalisation complète de l'action ou jusqu'à ce que le niveau de confiance soit considéré comme suffisant.

Ces auteurs se concentrent principalement sur des aspects de psychologie sociale de la prise de décision, et traitent de l'impact des émotions, du stress et de l'attractivité, aspects non traités ici. Malgré la différence entre le modèle originel de Svenson et son utilisation dans le contexte de la conduite, ce modèle nous a semblé parfaitement adapté et pertinent en ce qui concerne la situation d'approche de carrefour, permettant de prendre en compte l'évolution des processus au cours du temps et de la tâche.

Nous avons choisi de nous fonder sur ce modèle afin de répondre à la seconde partie de notre problématique (voir Chapitre 3).

Diff / Cons et la théorie des phases d'action L'évolution dans le temps de la prise de décision est également décrite dans la théorie des phases d'action (Theory of Action Phases) de Gollwitzer et al. (1990) et Heckhausen & Gollwitzer (1987). Dans ce modèle, la prise de décision est divisée en deux phases : pré-décisionnelle et post-décisionnelle. Comme Nenkov & Gollwitzer (2012) le décrivent, la phase pré-décisionnelle est une phase de délibération qui conduit à un choix. Durant cette phase, l'attention est principalement dirigée vers l'information disponible dans la scène visuelle. Heckhausen & Gollwitzer (1987) décrivent les processus présents durant cette phase comme ayant "une réceptivité accrue à l'information disponible"², Nenkov & Gollwitzer (2012), p 107. La phase post-décisionnelle est une phase de planification de l'action qui conduit à la réalisation de cette action. En parlant de séquence de phases, les auteurs introduisent implicitement l'évolution temporelle de la tâche de prise de décision.

Par ailleurs, Nenkov & Gollwitzer (2012) soulignent le fait que chacune de ces deux phases implique un processus cognitif différent sans préciser lequel. En effet, la théorie des phases d'action ne considère pas la possibilité de changer de décision tant

2. "a heightened receptivity to available information"

La théorie

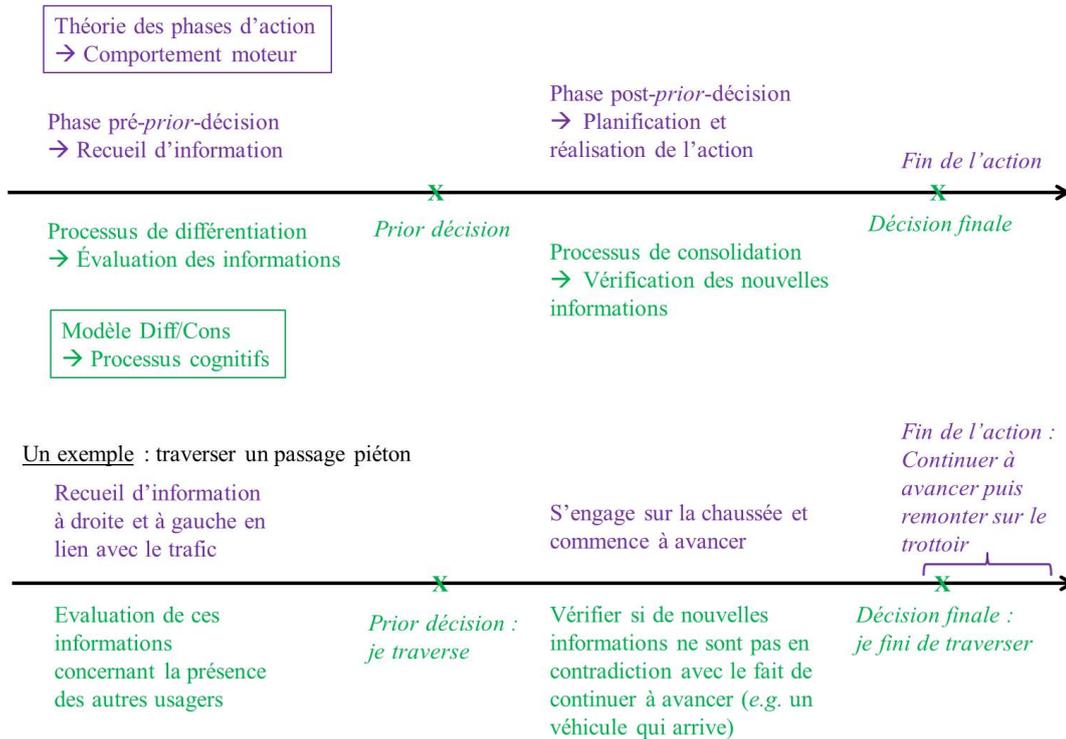


Figure 2.1.: En haut, superposition du modèle Diff/Cons de prise de décision de [Svenson \(1992\)](#) et de la théorie des phases d'action décrit par [Nenkov & Gollwitzer \(2012\)](#). En bas, un exemple de cette superposition avec la traversée d'un passage piéton. Les flèches noires indiquent le sens de l'évolution temporelle. L'accolade violette pour l'action finale indique que dans certains exemples, comme celui utilisé, la fin de l'action peut se situer après la décision finale (e.g. le piéton peut être sur la fin du passage piéton et ne plus vérifier si des voitures arrivent).

que l'action n'est pas complètement finie, ce que fait le modèle Diff/Cons en ajoutant la notion de pré-décision. Ainsi, ce qui est nommé décision dans la théorie des phases d'action correspondrait à la pré-décision du modèle Diff/Cons, et non pas à la décision finale, puisque cette dernière est concomitante avec la fin de l'action associée, et non au début de la planification. Nous proposons sur cette base le modèle présenté Figure 2.1, qui couple ces deux modèles. La phase pré-décisionnelle de recherche d'information serait associée à un processus D, conduisant à une pré-décision. Ensuite, la phase post-décisionnelle de planification de l'action débuterait, associée à un processus C de vérification, conduisant à une décision finale, associée à la fin de l'action.

2.3. Une situation : l'approche de carrefour

La conduite automobile est une activité multi-tâche incluant trois niveaux de sous-tâches pouvant chacune faire intervenir plusieurs processus cognitifs (Michon, 1985). Cependant, la plupart des études portant sur l'attention visuelle en conduite se concentrent sur une seule de ces sous-tâches. L'objectif de ces études est non pas l'aspect multi-tâche mais une meilleure compréhension de l'une d'entre elles, voire d'un processus spécifique à l'une d'entre elles. Certaines études, par exemple, se focalisent sur la gestion des interactions (sous-tâche tactique) en utilisant des vidéos comme support expérimental, le contrôle du véhicule (sous-tâche opérationnelle) étant ainsi inexistant (Labbett & Langham, 2006; Underwood et al., 2002, 2005). De même, le contrôle du véhicule est souvent minimisé, comme dans beaucoup d'expériences sur simulateur de conduite où les participants sont dans un véhicule déjà à l'arrêt à un carrefour, pour estimer le temps de collision par exemple (Caird & Hancock, 1994; Hancock & Manser, 1997; Manser & Hancock, 1996; McLeod & Ross, 1983), ou lorsque la consigne est de s'arrêter au carrefour avant d'exécuter leur tâche (Alexander et al., 2002; Bao & Boyle, 2009; Cantin et al., 2009). A l'opposé, d'autres études se focalisent sur la sous-tâche opérationnelle sans faire intervenir d'interaction avec les autres usagers (Donges, 1978; Land & Lee, 1994), ou avec des interactions minimales, comme par exemple pour les tâches de suivi de véhicule (Salvucci & Gray, 2004). La littérature centrée sur l'étude de la sous-tâche opérationnelle est d'ailleurs quantitativement plus importante que celle centrée sur les sous-tâches tactiques ou stratégiques (Lappi, 2014).

Même si la compréhension de l'attention visuelle et des informations requises pour chaque sous-tâche séparément est indispensable à une compréhension plus large de la tâche de conduite et du fonctionnement des processus attentionnels, il nous a semblé que la compréhension de la répartition de l'attention visuelle lorsque plusieurs sous-tâches sont simultanément nécessaires à la réalisation d'une même tâche était également indispensable. Cela d'autant plus si l'objectif est d'augmenter la validité externe afin d'aller vers des applications en passant par des modèles prédictifs quantitatifs. Ce n'est pas un hasard si un des modèles se rapprochant le plus de ces différents objectifs est celui proposé par Sprague et al. (2007), qui est avant tout articulé autour de cet aspect multi-tâche. Afin d'étudier l'aspect multi-tâche de l'attention visuelle, nous nous sommes attachés à une situation particulière de la conduite automobile : l'approche de carrefour.

2.3.1. Les caractéristiques de cette situation

Multi-tâche Dans la situation d'approche de carrefour, la sous-tâche tactique est très présente du fait que le conducteur est amené à gérer les interactions avec les autres usagers. La sous-tâche opérationnelle est également présente, ce qui est automatique à compter du moment où la personne conduit ; de même pour la sous-tâche de navigation, qui consiste à choisir par quelle voie sortir du carrefour.

Dangereuse et complexe La situation du carrefour peut-être considérée comme complexe car elle nécessite de gérer de nombreuses interactions. C’est en effet au carrefour que de nombreux accidents ou accrochages ont lieu (Al-Ghamdi, 2002). En France par exemple, 28 % des accidents mortels se produisent aux intersections urbaines et 13,3 % de tous les accidents mortels se produisent lors de collisions fronto-latérales (ONISR, 2012). On peut imaginer que les ressources attentionnelles limitées du conducteur peuvent contribuer à ces accidents (Treat et al., 1979). D’autre part, c’est une situation qui reste encore difficile à modéliser pour les simulations de trafic et la gestion des flux (Ketenci, 2013).

Simple et généralisable C’est une situation simple dans le sens où les règles sont claires et connues de tous. Il est très facile de faire en sorte que les participants aient une compréhension de la tâche que l’expérimentateur attend d’eux sans pour autant que ce dernier doive donner de consigne explicite si ce n’est de conduire comme à leur habitude. Les consignes plus précises peuvent être implicites, relayées par l’environnement, l’aménagement et la signalisation, ainsi le conducteur se retrouve dans une situation quasi-automatique, donc avec un comportement basé sur les règles, ou même les compétences, au sens de Rasmussen (1983). Ainsi, une généralisation assez aisée est permise, tout du moins avec une approche de carrefour dans la vie quotidienne des conducteurs.

Dynamique Cette situation est également intéressante par la pression temporelle qu’elle induit : à un lieu défini dans l’espace, le conducteur doit prendre une décision. Que ce soit de s’arrêter ou de passer au carrefour, un certain nombre d’informations auront dû être recueillies au préalable. La situation elle-même impose plusieurs sous-tâches, et les basculements de l’attention *overt* associés sont donc de même indispensables³. Cela donne tout son sens à l’aspect dynamique de la conduite, du fait que certaines de ces sous-tâches, et la tâche de conduite en elle-même, soient finies dans le temps.

2.3.2. Opérationnalisation de cette situation

Quelles sous-tâches ? Ce travail de thèse s’est focalisé sur l’approche de carrefour, mais plus spécifiquement, nous nous sommes intéressés à une sous-tâche tactique, la prise de décision, et une sous-tâche opérationnelle, le contrôle latéral (*i.e.* la trajectoire)⁴. Afin de s’assurer qu’aucune recherche d’information visuelle liée à la présence

3. Il y a dans la littérature un débat afin de déterminer si la recherche d’information se fait de manière sérielle ou parallèle. Notre travail considère seulement l’association suivante : une information, une zone, une tâche, qui, dans cette configuration, est nécessairement sérielle. Nous ne prenons donc pas position dans le cadre de ce débat

4. Le contrôle longitudinal (*i.e.* la vitesse) peut également être présent lorsque les participants s’arrêtent aux carrefours, mais les zones contenant les informations pertinentes à cette sous-tâche sont les mêmes que celles contenant les informations pertinentes pour le contrôle latéral, seule la zone du tableau de bord s’ajoute pour le contrôle longitudinal, mais ce point sera discuté dans la

d'une sous-tâche stratégique (*i.e.* navigation) ne soit présente, nous avons systématiquement considéré dans nos dispositifs expérimentaux des carrefours en croix avec comme consigne de traverser les carrefours ("aller toujours tout droit").

Ainsi, les informations visuelles nécessaires à la tâche d'approche de carrefour seront ici soit en lien avec la gestion des interactions au niveau du carrefour, donc tactique, soit en lien avec le contrôle du véhicule, donc opérationnel.

Cependant, nous n'avons pas, dans ce travail, traité de manière équivalente les sous-tâches tactique et opérationnelle. Ce travail est beaucoup plus centré autour de la sous-tâche tactique de prise de décision. En effet, la première partie de la problématique (voir Chapitre 3) s'intéresse aux effets des variables expérimentales par rapport à la sous-tâche tactique, ainsi qu'à l'interaction entre les deux sous-tâches tactique et opérationnelle. La deuxième partie de la problématique est centrée autour de la sous-tâche tactique de prise de décision. Cette asymétrie a été décidée ainsi car, d'une part la prise de décision est primordiale en conduite, et elle peut se généraliser à de nombreuses autres tâches ; d'autre part, la sous-tâche opérationnelle a déjà été très abondamment étudiée dans la littérature, notamment concernant le contrôle latéral, et les questions actuelles à son sujet nécessitent des études qui lui sont spécifiques (Mars & Navarro, 2012).

Quels processus attentionnels top-down ? Notre travail étant axé en priorité sur les traitements top-down de l'attention, il est important de souligner ici leur rôle dans la tâche de conduite. Comme nous avons pu le voir précédemment, il a été montré que dans des situations écologiques les modèles top-down de l'attention visuelle permettent de meilleures prévisions que les modèles bottom-up (Einhäuser et al., 2008; Li et al., 2004; Nyström & Holmqvist, 2008; Rothkopf et al., 2007; Tatler et al., 2005). Ceci est d'autant plus vrai lorsque la tâche est difficile, puisqu'alors le contrôle du regard lui-même dépend plus encore de la tâche et moins des propriétés visuelles de la scène (Foulsham et al., 2011; Land & Tatler, 2009). Concernant la conduite, qui est une tâche naturelle et complexe dans le sens où elle nécessite le recueil de beaucoup d'informations visuelles en même temps, nous faisons l'hypothèse que les facteurs top-down y sont dominants pour la compréhension du comportement du regard (Goodale, 2011; Kowler, 2011).

Concernant plus spécifiquement l'approche de carrefour, les principales composantes qui sont connues pour contribuer aux anticipations du conducteur dans cette situation sont : 1) l'aménagement du carrefour ; 2) les règles de priorité ; 3) le comportement actuel et à venir des autres usagers de la route (Björklund & Åberg, 2005; Helmers & Åberg, 1978). Bien que les traitements bottom-up puissent être impliqués dans la composante liée à l'aménagement, le rôle de l'attention top-down est évident pour les deux autres composantes. L'accent sera donc mis dans la suite du manuscrit sur ces deux facteurs : les règles de priorité et le comportement des autres conducteurs au carrefour.

discussion générale. De même la tâche de suivi de véhicule n'a pas été étudiée, et a été contrôlée par l'absence de véhicule devant le conducteur.

Problématique

3.1. Problématique générale

L'objectif de ce travail de thèse est de comprendre l'allocation de l'attention visuelle lors d'une situation multi-tâche avec les mouvements des yeux. La problématique posée se scinde en deux parties que nous noterons Question 1 (Q1) et Question 2 (Q2). La première partie consiste à se demander s'il est possible de distinguer l'allocation de l'attention visuelle à différentes sous-tâches tactique et opérationnelle sur la base de la recherche visuelle, donc des mouvements des yeux. La seconde partie consiste à se demander s'il est possible de faire de même mais pour les processus propres à une sous-tâche tactique, la prise de décision de s'arrêter ou non au carrefour, et ceci en prenant en compte leur dynamique temporelle, donc, les processus ici étudiés étant sériels, de distinguer les différentes phases de cette sous-tâche sur la base des mouvements des yeux. Ces deux parties, et les sous-questions que cela pose, peuvent être synthétisées comme suit.

- Q1 : Distinguer des sous-tâches tactique et opérationnelle en fonction de l'allocation de l'attention visuelle :
 - Q1.1 : Comment l'attention visuelle est-elle distribuée lorsque plusieurs sous-tâches sont nécessaires à la réalisation d'une même tâche ?
 - Q1.2 : Est-il possible d'émettre des prédictions quantitatives sur cette distribution ?
- Q2 : Distinguer différentes phases d'une sous-tâche tactique en fonction de l'allocation de l'attention visuelle :
 - Q2.1 : Comment l'attention visuelle est-elle distribuée au sein d'une même sous-tâche au cours du temps ?
 - Q2.2 : Est-il possible de prédire la présence de cette sous-tâche et ses phases ?

Ramenées à la situation étudiée, à savoir une approche de carrefour, ces différentes parties de la problématique peuvent être formulées comme suit.

- Q1 : Distinguer les sous-tâches de contrôle latéral (*contrôle de la trajectoire* et de prise de décision avec les mouvements des yeux :

- Q1.1 : Quelles sont les informations recueillies lorsque ces deux sous-tâches sont nécessaires, et quelle est la stratégie de sélection de l'information selon le poids de chacune d'elle ?
- Q1.2 : Est-il possible de prédire ces stratégies de manière quantitative ?
- Q2 : Distinguer les différents processus de la sous-tâche de prise de décision, les processus de différenciation et de consolidation par les mouvements des yeux :
 - Q2.1 : Comment l'exploration visuelle varie-t-elle en fonction de ces processus ?
 - Q2.2 : Est-il possible de prédire la présence de ces différents processus ?

Nous détaillons dans la suite de ce chapitre comment chacune de ces quatre sous-questions a été opérationnalisée. Nous introduisons ensuite le matériel expérimental qui a été utilisé afin de tester les différentes hypothèses.

3.2. Distinguer des sous-tâches par les mouvements des yeux [Q1]

3.2.1. Distribution de l'attention visuelle entre plusieurs sous-tâches [Q1.1]

Pour cette première partie de la problématique, nous avons décidé de nous fonder sur le modèle SEEV proposé par [Wickens et al. \(2003\)](#), qui stipule que l'allocation de l'attention dépend de deux facteurs top-down, les attentes associées à une information pertinente pour une sous-tâche et la valeur de cette information, et deux facteurs bottom-up, la saillance dans la scène visuelle et l'effort nécessaire pour aller recueillir une information. Ce modèle a été décrit dans le Chapitre 1 (voir Section 1.3.2).

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés seulement aux facteurs top-down de l'attention : les attentes, liées à la quantité d'information attendue dans une AOI ; et la valeur de l'information, c'est-à-dire la pertinence de cette information pour une tâche donnée. En se cantonnant à ces deux facteurs, nous allons donc nous focaliser sur une approche optimale de la prise d'information et de la distribution de l'attention visuelle. Cela va nous permettre à la fois de comprendre comment ces deux facteurs influencent l'attention visuelle en fonction des sous-tâches en jeu, mais également d'appréhender dans quelle mesure l'allocation de l'attention que nous allons observer est effectivement optimale, c'est-à-dire les écarts entre les comportements observés et les prédictions du modèle optimal. Nous verrons cependant que les facteurs bottom-up (*i.e.* la saillance et l'effort) peuvent être intéressants pour discuter certains résultats.

Les aires d'intérêt (AOI) Afin de pouvoir étudier la distribution de l'attention visuelle en fonction des deux sous-tâches tactique et opérationnelle, une aire d'intérêt (AOI) a été associée à chacune d'entre elle.

Pour la sous-tâche opérationnelle de contrôle du véhicule, de nombreuses études tendent à montrer que l'information prélevée se trouve sur la chaussée. Plus précisé-

ment, deux zones sont généralement considérées (voir Section 2.2.2 pour plus de précisions) : la zone de la chaussée proche du véhicule, *near point* ; et une zone éloignée, *far point* (Donges, 1978; Land & Horwood, 1995; Salvucci & Gray, 2004). Afin de regrouper toute l'information pertinente pour cette sous-tâche opérationnelle, l'AOI "Chaussée" a été définie, incluant l'ensemble de la chaussée de la voie sur laquelle le véhicule se déplace.

Pour la sous-tâche tactique de gestion des interactions en approche de carrefour, l'information pertinente pour la décision de s'arrêter est liée aux autres usagers que la trajectoire choisie amène à croiser, et elle se trouve sur les voies latérales du carrefour dans notre situation de carrefour en croix. L'AOI "Voies Latérales" a donc été définie.

Le fait d'avoir choisi une situation pour laquelle un type d'information est pertinent pour chaque sous-tâche, et que ces informations se situent dans des AOIs distinctes permet d'éviter un grand nombre de problèmes liés aux chevauchements des AOIs (voir Lappi (2014) pour un exemple de chevauchement des AOIs dans le contexte de la conduite).

Les variables expérimentales Afin d'explorer la distribution de l'attention en fonction des sous-tâches, les facteurs Attentes et Valeur ont été manipulés. La sous-tâche opérationnelle a été considérée comme une sous-tâche présente du moment où la personne conduit, communément appelée tâche en cours ou *ongoing task* dans la littérature ; tandis que la sous-tâche tactique dépend des variables liées à la situation¹, et se rapproche plus de ce qui se nomme tâche discrète ou *interrupting task* (Wickens et al., 2015). Les manipulations expérimentales sont donc ici attachées à la sous-tâche tactique. Cependant, l'attention visuelle étant limitée (on ne peut regarder qu'une seule AOI à la fois), les manipulations d'une sous-tâche peuvent impacter l'attention dans l'AOI associée à l'autre sous-tâche. La présence et la taille de cet effet indirect dépend de l'attention totale nécessaire pour effectuer l'ensemble des deux sous-tâches².

Dans ce sens, deux variables ont été choisies afin de moduler les Attentes et la Valeur de l'information contenue dans l'AOI Voies Latérales. La Valeur de l'information dépend de la règle de priorité du carrefour avec des conditions où la voie empruntée par le conducteur est soit une voie secondaire avec un Stop ou un Cédez le Passage, soit une voie Prioritaire (voir Figure 3.1). Ainsi, l'information associée à la présence des autres usagers n'a pas la même pertinence en fonction de la règle de priorité pour la sous-tâche tactique de prise de décision.

Les Attentes liées à l'information dépendent du débit (*Bandwidth*) de l'information. Cette notion de débit, introduite par Senders et réemployée par Wickens, a été modulée par la densité de trafic sur les voies latérales, comme cela a été fait précédemment par Horrey et al. (2006) et Werneke & Vollrath (2012).

1. Nous précisons bien que ceci est un parti pris dans cette étude, lié à la situation choisie, l'approche de carrefour. Un grand nombre d'études portent sur la sous-tâche opérationnelle et les variations de regards lorsque la difficulté de celle-ci est modulée.

2. De façon schématique, si $AOI1 + AOI2 = 100\%$, une augmentation de l'attention nécessaire dans l'AOI1 impacte l'AOI2 ; ce qui sera moins le cas si le total est inférieur à 100%.

Stop	Cédez le passage	Prioritaire
Le conducteur doit s'arrêter et laisser passer les usagers prioritaires.	Le conducteur doit laisser passer les usagers prioritaires, mais n'est pas obligé de s'arrêter.	Le conducteur est prioritaire et ne doit laisser passer aucun usager non prioritaire.
		

Figure 3.1.: Panneaux de signalisation utilisés afin d'indiquer la présence d'un stop, d'un cédez le passage ou d'une voie prioritaire.

Les prédictions Une augmentation de la densité du trafic sur les voies latérales devrait augmenter le renouvellement des informations visuelles pertinentes dans cette zone (*i.e.* le débit de l'information) et ainsi contribuer à des attentes plus grandes vis-à-vis de cette AOI pour la tâche de prise de décision.

Par ailleurs, la règle de priorité devrait avoir un fort impact sur le comportement du conducteur, puisque de cette règle dépend le fait qu'il devra s'arrêter ou non au carrefour. Dans la condition avec un Stop, la décision de s'arrêter est imposée par la réglementation. De plus, le comportement associé n'implique pas d'interaction directe avec les autres usagers. La valeur associée aux informations présentes dans la zone Voies Latérales devrait donc être faible pour la tâche tactique.

Dans la condition Prioritaire, au contraire, c'est la décision de ne pas s'arrêter qui est imposée. Cependant, le comportement associé implique cette fois-ci des interactions éventuelles avec les autres usagers, car même si ces derniers ont l'obligation de laisser la priorité, le risque de collision existe. De plus, la règle, ici de ne pas s'arrêter, est tout à fait transgressable si jamais un danger se présente, contrairement à celle de s'arrêter. Pour ces deux raisons, la valeur associée à l'information sur la voie latérale devrait être plus élevée que dans la condition avec un Stop pour la tâche tactique.

Dans la condition Cédez le Passage, la décision n'est pas imposée et dépend fortement de l'information présente sur la voie latérale. C'est donc dans cette condition que la valeur de l'AOI devrait être la plus élevée pour la tâche tactique.

Concernant l'AOI Chaussée associée à la sous-tâche opérationnelle, la règle de priorité et la densité du trafic ne devraient pas avoir d'impact direct sur sa valeur ni sur les attentes associées.

Les prédictions sont donc des proportions de temps de regard plus long dans l'AOI Voies Latérales dans la condition Cédez le Passage que dans la condition Prioritaire, et dans la condition Prioritaire que dans la condition Stop. Par ailleurs, les proportions de temps de regard dans cette même AOI devrait augmenter avec le trafic.

Principales prédictions pour la première partie de la problématique :

- Stratégie optimale d'exploration : Temps de regard dans les AOI Voies Latérales (VL) + Chaussée (C) = 100% des temps de regard ;
- Temps de regard dans l'AOI Voies Latérales :
 - Cédez le Passage > Prioritaire > Stop ;
 - ↑ avec la densité de trafic.

3.2.2. Des prédictions quantitatives pour chacune des sous-tâches [Q1.2]

Le modèle quantitatif *Expectancy - Value*

Nous voulions pouvoir émettre des prédictions quantitatives concernant l'allocation de l'attention visuelle. Du côté de la psychologie cognitive, comme nous l'avons vu précédemment, peu de modèles existent. Nous nous sommes tournés vers l'ergonomie, qui produit de nombreux modèles prédictifs concernant l'allocation de l'attention visuelle en situation multi-tâche. Cependant, très peu sont appliqués à la tâche de conduite. Un grand nombre a été produit sur la base de stratégies optimales d'exploration visuelle, dont nous parlions précédemment. Cela porte donc souvent sur des situations où un comportement optimal peut être déterminé de manière quasi-objective, comme bien souvent une tâche de surveillance (*monitoring*).

Par exemple, les pilotes d'avion doivent prendre en compte un grand nombre d'informations sur différents capteurs, et doivent adopter une action appropriée lorsque certains indices dépassent un seuil. Ils ont donc à leur disposition des aires d'intérêt contenant chacune une information spécifique, et auxquelles sont associées une valeur (que me dit ce capteur ?) et un débit (à quelle fréquence dois-je regarder ce capteur pour que mon information soit à jour ?). En formulant les choses ainsi, cela a permis des études approfondies de l'exploration visuelle dans ce type de situations, permettant par la suite aux ingénieurs d'améliorer la conception des cockpits ([Moray, 1986](#)).

C'est dans la continuité de ces travaux que Wickens *et al.* ont proposé le modèle SEEV présenté précédemment. Mais ils ont également proposé un autre modèle, *Expectancy - Value*, cette fois-ci uniquement fondé sur la stratégie optimale, donc avec seulement les facteurs d'Attentes et de Valeur. En effet, ils se sont intéressés à des pilotes formés (ou des conducteurs automobiles) considérés comme des experts et pour qui les facteurs de saillance et d'effort n'ont plus d'impact : l'expert a intégré un modèle interne de la tâche, ce qui conduit à une stratégie d'échantillonnage optimale ([Horrey et al., 2006](#); [Wickens et al., 2001, 2003](#)). Un objectif important de ces études était de pouvoir comparer les stratégies réelles et optimales. A noter que dans un certain nombre de situations, les stratégies des experts se sont effectivement avérées quasi-optimales.

Plus exactement, ce qu'ont proposé ces auteurs, c'est un cadre pour la construction d'un modèle quantitatif des proportions de temps de regard en fonction des sous-tâches en cours. Ce modèle permet d'établir un lien entre les paramètres (les

Attentes et la Valeur de l'information), les variables expérimentales et l'allocation de l'attention visuelle (pourcentage de temps de regard dans chacune des AOIs).

Construction du modèle

Nous avons voulu utiliser ce modèle dans le même cadre expérimental que celui présenté précédemment pour répondre à la Question 1.2, “est-il possible d'émettre des prédictions quantitatives sur la distribution de l'attention ?”. Les variables expérimentales sont donc les mêmes, à savoir la règle de priorité et la densité de trafic.

A partir de ce modèle théorique fondé sur les Attentes et la Valeur, Wickens a donc proposé une méthode de construction d'un modèle quantitatif des stratégies visuelles optimales pour une situation multi-tâche donnée. Afin de s'inscrire dans le cadre proposé par Wickens, il faut déterminer deux choses :

- Chaque sous-tâche doit être décrite et associée à une AOI ; cela a déjà été réalisé dans la section précédente, avec la sous-tâche opérationnelle de contrôle du véhicule associée à l'AOI Chaussée, et la sous-tâche tactique de gestion des interactions associée à l'AOI Voies Latérales ;
- Le modèle quantitatif doit être construit en déterminant une matrice dédiée à chacun des trois paramètres de Débit (*bandwidth*), de Pertinence (*relevance*) et d'Importance (*priority*)³.

Les Attentes vont être ainsi opérationnalisées par le débit de l'information présente dans une AOI. Le débit correspond aux attentes liées à la fréquence d'actualisation de l'information dans cette AOI (Wickens et al., 2003). A l'origine, ce concept a été pensé pour s'adapter à des changements discontinus, comme dans le cas des cadrans pour les pilotes. Nous l'avons adapté et utilisé avec des changements continus, en reprenant les prédictions de la section précédente : plus la densité du trafic augmente, plus les attentes liées à l'AOI Voies Latérales augmentent, tandis que l'AOI Chaussée offre les mêmes prédictions quelque soit cette densité.

La valeur de l'information est opérationnalisée par le produit de deux facteurs : la Pertinence et l'Importance (Wickens et al., 2003). L'Importance fait référence à la relation entre les différentes sous-tâches en fonction de leur contribution respective à l'objectif général qui est dans notre cas de se déplacer en sécurité. La Pertinence fait référence à la pertinence des informations contenues dans une AOI donnée pour une sous-tâche.

Il est important de noter que ce modèle quantitatif est constitué de paramètres qui ont un sens, une interprétation pratique. Pour chacun de ces trois paramètres, Wickens a proposé de hiérarchiser les conditions expérimentales en se fondant sur des connaissances spécifiques en rapport à la situation étudiée, puis de remplir les matrices correspondantes avec des nombres entiers consécutifs afin d'obtenir un modèle quantitatif approximatif.

Ensuite, le pourcentage de temps de regard dans les AOIs est calculé en deux étapes. Dans un premier temps, une valeur intermédiaire, appelée *scan*, est calculée :

3. Nous avons préféré utiliser “Importance” plutôt que la traduction “priorité” afin d'éviter toutes confusions avec la variable règle de priorité et sa modalité, Prioritaire.

$$Scan(AOI) = \sum_T Dbit \times Pertinence \times Importance; \quad (3.1)$$

avec T pour la sous-tâche.

Puis les valeurs des *scans* sont normalisées de manière à ce que la somme des temps de regard (*dwell time*) de chaque AOI soit égale à 100%:

$$DwellTime(AOI) = \frac{Scan(AOI)}{\sum_j Scan(AOI_j)}. \quad (3.2)$$

A noter que l'hypothèse sous-jacente, façonnée par la manière de concevoir un modèle optimal, est que la personne sera toujours en train de regarder une AOI pertinente pour une des sous-tâches, sachant que l'ensemble des AOIs ne recouvre pas l'ensemble de la scène visuelle dans les études menées par Wickens et ses collaborateurs (Wickens et al., 2001, 2003).

Première matrice : le Débit Le débit d'information dans l'AOI Voies Latérales est d'autant plus important que le trafic l'est, tandis que le débit d'information ne dépend pas du trafic dans l'AOI Chaussée. Nous avons donc attribué pour l'AOI Voies Latérales les valeurs 1, 2 et 3 aux densités de trafic respectives : Nulle, Intermédiaire et Élevée. Pour l'AOI Chaussée, nous avons pris la moyenne de ces trois valeurs, 2, que nous avons attribuée à chacune des trois conditions de trafic (voir Table 3.1).

1ère matrice			2ème matrice			3ème matrice
Débit	VL	C	Pertinence	VL	C	Importance
Nulle	1	2	ST Oper. (Stop)	0	2	2
Inter.	2	2	ST Oper. (Priorité)	0	2	2
Élevée	3	2	ST Oper. (C. le P.)	0	2	2
			ST Tact. (Stop)	1	0	1
			ST Tact. (Priorité)	2	0	1
			ST Tact. (C. le P.)	3	0	1

Table 3.1.: Les matrices de le Débit, la Pertinence et l'Importance permettant de calculer les temps de regard d'après le modèle de Wickens. VL : l'AOI Voies Latérales, C : l'AOI Chaussée, ST Oper. : sous-tâche opérationnelle (contrôle du véhicule), ST Tact. : sous-tâche tactique (gestion des interactions), C. le P. : Cédez le Passage, Inter. : Intermédiaire.

Deuxième matrice : la Pertinence La Pertinence de l'AOI pour une tâche est une manière simplifiée d'exprimer le risque pour la réalisation de cette tâche dans le cas où l'information associée à cette AOI ne serait pas prélevée. L'AOI Chaussée est pertinente pour la sous-tâche de contrôle du véhicule, tandis que l'AOI Voies Latérales

l'est pour la gestion des interactions. La Pertinence de l'AOI Chaussée ne dépend pas de la règle de priorité, alors que la Pertinence de l'AOI Voies Latérales en dépend, puisque le risque associé ne sera pas le même selon le panneau. L'information contenue dans cette AOI est la plus pertinente en condition de Cédez le Passage et la moins pertinente en Stop. En effet, contrairement aux conditions Stop et Prioritaire, la décision de s'arrêter ne se déduit pas directement de la signalisation lors d'un Cédez le Passage. Les informations de l'AOI Voies Latérales sont donc plus importantes pour le conducteur. Si l'on compare à présent les conditions Stop et Prioritaire, avec la même logique que précédemment, les informations contenues dans l'AOI Voies Latérales devraient être plus importantes en Prioritaire du fait des interactions qu'impliquent la décision de ne pas s'arrêter. En suivant ce raisonnement, les valeurs 3, 2 et 1 ont respectivement été attribuées aux conditions de Cédez le Passage, Prioritaire et Stop pour la tâche tactique, et 2 à chacune de ces trois conditions pour la tâche opérationnelle (voir Table 3.1). Les informations contenues dans l'AOI C n'étant pas pertinentes pour la sous-tâche tactique, et celles dans l'AOI VL ne l'étant pas pour la sous-tâche opérationnelle, les valeurs 0 leur ont été attribuées.

Troisième matrice : l'Importance Nous avons considéré la sous-tâche de contrôle latéral comme étant la sous-tâche de base, celle qui existe quoi qu'il arrive (sauf à l'arrêt, ce qui ne sera jamais le cas dans les données analysées). Plus précisément dans la situation d'approche de carrefour, si la sous-tâche tactique nécessite trop de ressources attentionnelles, le conducteur peut décider d'arrêter le véhicule au carrefour, quelle que soit la signalisation, et ainsi reporter la sous-tâche tactique. Nous avons donc attribué à la sous-tâche opérationnelle une valeur plus élevée qu'à la sous-tâche tactique. Ainsi dans le modèle quantitatif, nous avons mis 2 pour la sous-tâche de contrôle du véhicule, et 1 pour la sous-tâche tactique (voir Table 3.1).

La combinaison de ces trois matrices à l'aide des équations 3.1 et 3.2 a permis d'émettre des prédictions en termes de pourcentage de temps de regard par AOI. Les valeurs obtenues sont présentées dans la Table 3.2.

		Cédez le passage			Prioritaire			Stop		
		E	I	N	E	I	N	E	I	N
Préd.	C	52	57	64	62	67	73	76	80	84
	VL	48	43	36	39	33	27	24	20	16

Table 3.2.: Les pourcentages de temps de regard pour chacune des conditions de règle de priorité et de densité de trafic (Élevée : E, Intermédiaire : I, Nulle : N) dans les AOIs pertinentes (C et VL) prédits par le modèle (Préd.) quantitatif.

3.3. Distinguer différentes étapes temporelles d'une sous-tâche par les mouvements des yeux [Q2]

3.3.1. Les différentes phases d'une sous-tâche : la prise de décision [Q2.1]

Nous avons voulu explorer dans quelle mesure il était possible de déterminer le processus cognitif en jeu à partir du mouvement des yeux, de même que précédemment avec les sous-tâches, mais à présent au niveau des phases successives d'une même sous-tâche. Pour cela, nous nous sommes focalisés sur la sous-tâche de prise de décision, qui durant l'approche de carrefour consiste à choisir comment gérer les interactions avec les autres usagers.

Afin de répondre à cette seconde partie de la problématique, nous allons nous fonder sur le modèle Diff/Cons de [Svenson \(1992\)](#) présenté dans le Chapitre 2 (voir Section 2.2.3). Ce modèle de prise de décision stipule qu'un premier processus, le processus de Différentiation (D), permet de recueillir suffisamment d'informations pertinentes pour prendre une pré-décision. Ce processus est ensuite suivi d'un processus de Consolidation (C) qui permet de recueillir des informations afin de valider ou non la pré-décision, et conduit à la décision finale. La décision qui a été étudiée durant l'approche de carrefour est la décision de s'arrêter ou non (NoGo vs. Go) au niveau de carrefour.

Dans ce qui suit, nous allons spécifier les processus D et C lors d'une tâche spécifique de prise de décision, l'approche de carrefour avec la décision de s'arrêter ou non au carrefour, et discuter de ce que cela implique pour les mouvements des yeux. La question sera alors de savoir s'il est possible de discriminer ces processus de prise de décision sur la base de patterns oculomoteurs spécifiques.

Lorsqu'aucune décision n'est requise, l'activité en cours sera décrite comme étant une activité de base (*baseline* - B), en opposition à D et C. En effet, nous considérons que D et C ont des coûts cognitifs associés à la tâche de prise de décision qui viennent s'ajouter à cette activité B, laquelle inclut ainsi les autres processus cognitifs potentiellement actifs.

Le modèle Diff / Cons appliqué aux trois règles de priorité La nature de la décision Go / NoGo au carrefour est modulée par la règle de priorité avec les mêmes modalités que lors de la première partie de la problématique : un Stop, un Cédez le Passage ou un Prioritaire (voir Figure 3.2 schématisant l'ensemble de ces prédictions en terme de processus).

Dans la condition Stop, la pré-décision NoGo est imposée par la signalisation. De plus, l'action de s'arrêter n'implique aucune interaction immédiate avec les autres usagers de la route. La probabilité d'avoir une collision et d'être amené à devoir changer la nature de la pré-décision est très faible. Autrement dit, la confiance du conducteur dans sa pré-décision est élevée, le processus C n'est donc quasiment pas nécessaire. Le processus attentionnel associé à cette situation de prise de décision

devrait donc tendre vers B.

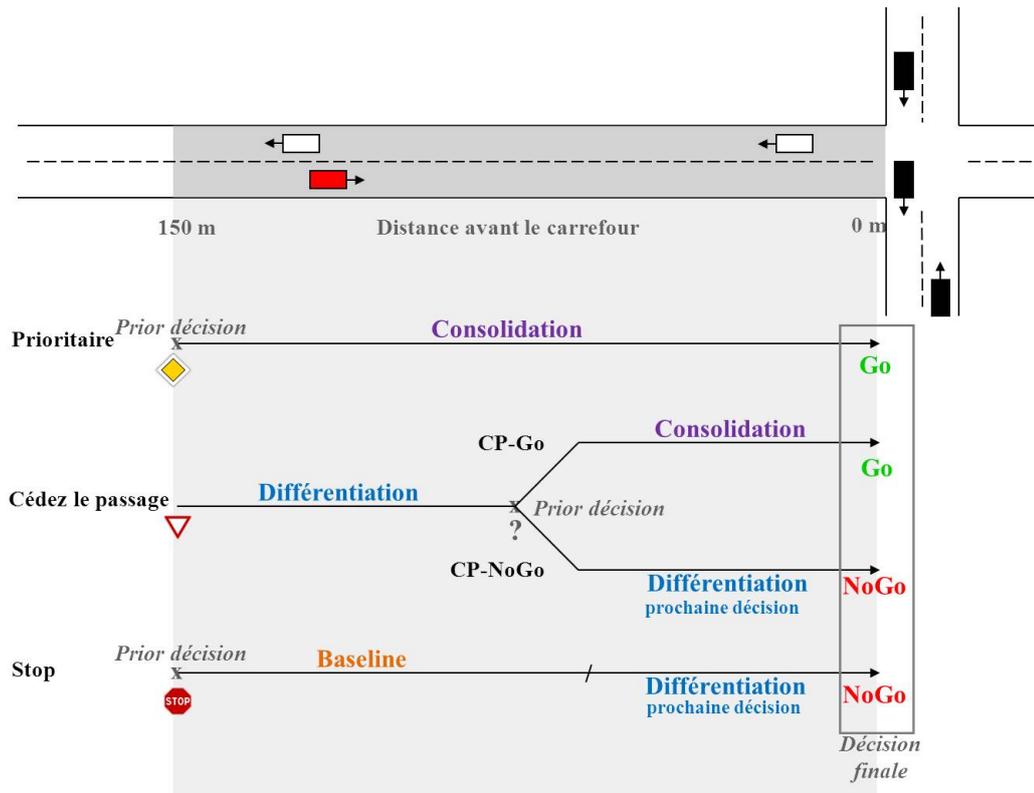


Figure 3.2.: Une approche de carrefour et les prédictions en terme de processus cognitifs. En haut : une vue aérienne des 150 derniers mètres avant l'entrée du carrefour (correspondant à la portion analysée lors de l'étude en simulateur de conduite) ; le véhicule du participant est en rouge, les véhicules liés au trafic (modulés par le facteur de densité de trafic) sont en noir, et les véhicules contrôles, permettant une plus grande immersion, sont en blanc. En bas : les prédictions concernant la pré-décision et la décision finale, et les processus associés en fonction des trois conditions de règle de priorité et du comportement d'arrêt (Go ou NoGo).

Dans la condition Prioritaire, la pré-décision de ne pas s'arrêter est également imposée par la signalisation. Cependant, l'action associée de passer implique un certain niveau de risque de collision, notamment si les autres usagers ne respectent pas la priorité. Durant l'approche du carrefour, l'information concernant le comportement des autres conducteurs permet donc d'augmenter le niveau de confiance et de consolider la pré-décision. Le processus associé à cette situation de prise de décision devrait donc être C.

Dans la condition de Cédez le Passage, la pré-décision n'est pas imposée, le premier processus devrait donc être D. Puis, si la pré-décision est de s'arrêter (NoGo), le

processus D devrait être remplacé par B. Si la pré-décision est de passer sans s'arrêter (Go), le processus D devrait être suivi du processus C.

Lien entre les phases Diff / Cons et l'exploration visuelle de la scène La recherche visuelle se caractérise par des scanpaths⁴, composés de séquences de fixations et de saccades (Goldberg & Kotval, 1999). Chapman & Underwood (1998) ont montré que la durée des fixations diminue et l'amplitude des saccades augmente lorsque la recherche visuelle s'intensifie (voir également Crundall & Underwood (2011); Rayner (1998)). Nous parlerons en termes d'exploration visuelle dans la suite du manuscrit afin de rendre compte de ce phénomène : une augmentation de l'exploration visuelle signifiera une augmentation de l'amplitude des saccades et une diminution des durées de fixation.

Afin de décider s'il faut s'arrêter ou non, les informations visuelles recueillies, permettant d'estimer la vitesse, la distance et les écarts (*gaps*) pour les véhicules s'approchant, sont notamment construites à partir de la couleur, la forme, la texture, et le taux d'expansion (Hancock et al., 1991). Ces informations sont supposées être utiles à la fois pour les processus D et C. Ce qui différencie ces processus s'exprime non en terme de nature de l'information mais de quantité d'information recueillie pour une information de même nature (l'information recueillie par les processus C et D est la même, mais est recueillie plus ou moins souvent en fonction du processus). Pour utiliser le vocabulaire de Sprague & Ballard (2003), l'information est pertinente pour la tâche de prise de décision, mais elle permet de diminuer plus ou moins l'incertitude. Ainsi, la possibilité de diminuer l'incertitude est plus élevée durant le processus D que durant le C. C'est pourquoi l'exploration visuelle devrait être la plus importante durant le processus D. Ce processus devrait donc se caractériser par des amplitudes de saccade plus importantes que lors du processus C, et à l'inverse, des durées de fixation moins importantes.

Nous posons donc l'hypothèse que la présence des processus D, C et B devrait se traduire par une hiérarchie de l'exploration visuelle, qui devrait être plus active en D qu'en C, et en C qu'en B. Cette hiérarchie suppose les prédictions suivantes : des durées de fixations plus courtes et des amplitudes de saccades plus grandes durant D que durant C, et durant C que durant B.

Si l'on met ces prédictions en regard de celles présentées précédemment concernant les règles de priorité et les processus en jeu, cela donne les hypothèse suivantes : dans la condition Stop, une exploration visuelle faible (B) ; dans la condition Prioritaire, une exploration visuelle modérée (C) qui devrait tendre à diminuer au fur et à mesure de l'accumulation de certitude concernant la décision finale ; dans la condition Cédez le Passage, une exploration importante (D), suivie d'une exploration visuelle faible (B) lorsque la décision est de s'arrêter, ou d'une exploration modérée (C) lorsque la décision est de passer sans s'arrêter.

4. Les scanpaths sont des indicateurs qui prennent en compte l'évolution dans le temps en opposition aux fixations et aux saccades qui sont spécifiques à un moment défini (Le Meur & Baccino, 2013).

Cependant, une seconde décision suit la décision de s'arrêter : quand redémarrer. Cette nouvelle décision devrait être prise lorsque le conducteur est à l'arrêt. Néanmoins, le conducteur en fin d'approche de carrefour dans la condition Stop n'a plus que la tâche de contrôle et peut donc commencer à anticiper la décision à venir. Nous proposons donc une hypothèse alternative stipulant qu'un processus D peut être présent dans un deuxième temps dans les conditions Stop et Cédez le Passage si la pré-décision est de s'arrêter. Ainsi, les prédictions seraient les suivantes :

- une exploration visuelle faible correspond à des durées de fixation plus grandes et des amplitudes de saccade plus petites que lors d'une exploration visuelle importante ;
- dans la condition Stop, une exploration visuelle faible (B), suivie d'une exploration visuelle importante (D) ;
- dans la condition Prioritaire, une exploration visuelle modérée (C) qui devrait tendre à diminuer au fur et à mesure de l'accumulation de certitude concernant la décision finale ;
- dans la condition Cédez le Passage, une exploration importante (D), suivie d'une nouvelle exploration importante (D) lorsque la décision est de s'arrêter, ou d'une exploration modérée (C) lorsque la décision est de passer sans s'arrêter.

3.3.2. Prédire la présence d'une sous-tâche [Q2.2]

Une des techniques utilisées afin d'émettre des prédictions quantitatives est la classification. Les méthodes statistiques de classification sont utilisées depuis plus de vingt ans dans de nombreux domaines, mais elles ne le sont que récemment pour l'analyse des mouvements oculaires. Lors d'une expérience, [Greene et al. \(2012\)](#) ont fait une étude où ils proposaient différentes tâches pour un même stimulus. Ils ont obtenu des scanpaths, puis ils ont utilisé un classifieur (un SVM - *Support Vector Machine*) pour prédire la tâche à partir des mouvements oculaires (avec un résultat négatif). [Henderson et al. \(2013\)](#) ont repris la même question avec un protocole et des tâches différentes. Leur classifieur a réussi à distinguer des tâches de recherche visuelle et de mémorisation. Suite à ces travaux, nous nous sommes demandées s'il était possible d'utiliser un classifieur pour prédire une tâche à partir du mouvement des yeux, mais dans une situation dynamique.

Au delà de cette question, l'utilisation de classifieurs comporte de nombreux avantages. Ils permettent notamment de prendre en compte un très grand nombre de types de mesure simultanément. Certains classifieurs attribuent en plus un poids à chacune des mesures en fonction de leur contribution au modèle qui donne les prédictions. Cela nous permet de vérifier que les mesures utilisées dans les autres analyses étaient les plus pertinentes, ou s'il serait intéressant d'explorer l'effet des variables sur de nouvelles mesures.

Pour revenir plus précisément à la question posée, elle se décompose comme suit :

- Est-ce qu'un classifieur serait capable de prédire la présence de la sous-tâche de décision associée au processus D conduisant à la pré-décision ? Cela permettrait de prédire si les données ont été recueillies dans une condition où la décision est

imposée - Prioritaire et Stop - ou dans une condition où la décision n'est pas imposée - CP - par la règle de priorité.

- Existe-t-il un type de classifieur plus adapté aux données oculométrique ? (*i.e.* un classifieur fournit-il de meilleures prédictions que les autres ?)
- Est-ce qu'un classifieur serait capable de prédire la présence des trois processus de la prise de décision (C, D et B) ?

Il existe deux types de classifieur : les classifieurs supervisés ont pour objectif de classer les données en fonction d'exemples qui lui ont été fournis, les classes étant choisies en amont ; les classifieurs non-supervisés ont pour objectif de classer ces mêmes données selon des classes définies par le classifieur. Dans ce dernier cas, les classes sont dépendantes des données d'entrées et sont "choisies" par le classifieur. Les classifieurs non-supervisés constituent une méthode exploratoire, tandis que les classifieurs supervisés permettent de tester la pertinence du choix des classes. Étant donné que nous voulions émettre des prédictions selon des classes pré-établies sur la base d'hypothèses, seul des classifieurs supervisés ont été considérés. Leur fonctionnement général est présenté de manière simplifiée dans l'encadré.

Fonctionnement d'un classifieur supervisé :

Un "label" (ici, la tâche, décision imposée ou non) est associé à chaque "donnée" (une "donnée" étant l'ensemble des variables dépendantes (VD) associées à un essai, par exemple, l'amplitude des saccades et la durée des fixations). La démarche comporte ensuite deux étapes. Le classifieur va d'abord "apprendre" : à partir d'un ensemble de données labellisées, il propose un modèle, c'est-à-dire un opérateur capable de classer toute nouvelle donnée dans l'une des classes (chaque classe correspond à un label, ici, soit décision imposée, soit décision non imposée). La seconde étape consiste à tester ce modèle sur de nouvelles données (sans fournir le label), et à évaluer la qualité des prédictions. Avec deux classes, une classification au hasard donnera 50% de succès, et donc un bon classifieur doit prédire le label avec un taux supérieur à 50%.

Décision imposée ou non ? Pour la première question, le label n'avait que deux modalités : décision imposée (regroupant tous les essais en condition Prioritaire ou Stop) et non imposée (regroupant tous les essais en condition CP) par la règle de priorité. Les mesures oculométriques données en entrée étaient les suivantes : nombre de fixations (relatif), durée des fixations, pente de la durée des fixations, nombre de saccades (relatif), durée des saccades, pente de la durée des saccades, amplitude des saccades, pente de l'amplitude des saccades, durée des clignements, nombre de clignements (relatif), diamètre pupillaire. A ces mesures ont été ajoutées des données comportementales issues du simulateur : vitesse, pente de la vitesse, accélération (pédale), pente de l'accélération, freinage (pédale), pente du freinage.

Un classifieur plus adapté ? Pour la deuxième question, trois types de classifieurs ont été choisis pour tester la première question : un *Support Vector Machines* (SVM) (Vapnik, 1995), un *Random Forest* (RF) (Breiman, 2001) et un *k-Nearest Neighbors* (k-NN) (Cover & Hart, 1967). Ces classifieurs se définissent par la manière dont ils

apprennent et dont ils créent le modèle prédictif.

Pour le SVM, dans le cas où les données sont non-linéairement séparables comme ici, on utilise une fonction de décision non linéaire (voir Figure 3.3, au centre). L'idée sous-jacente est de tenter de trouver une projection (mapping) de l'espace d'entrée vers un autre espace de représentation (feature space) dans lequel les données sont linéairement séparables. Cela se nomme l'extension. Le SVM utilise alors un noyau (kernel) qui divise l'espace des données avec un hyperplan séparateur. Dans cette étude, nous avons utilisé un noyau Gaussien type RBF (Radial Basis Function). Après avoir normalisé les données, deux paramètres devaient ensuite être choisis afin de définir le noyau. Le premier - le gamma - définit la largeur de la gaussienne selon l'équation suivante : $\Gamma = 1/\sigma^2$. Le second - la constante C - est souvent appelée la constante de compromis (tradeoff). Elle permet d'indiquer l'importance que l'on accorde aux erreurs commises sur l'ensemble de l'apprentissage par rapport au fait de maximiser la marge. Elle peut être interprétée comme une tolérance au bruit du classifieur. Pour ces analyses, les valeurs de ces deux paramètres étaient respectivement de 2^{-4} et 2^5 .

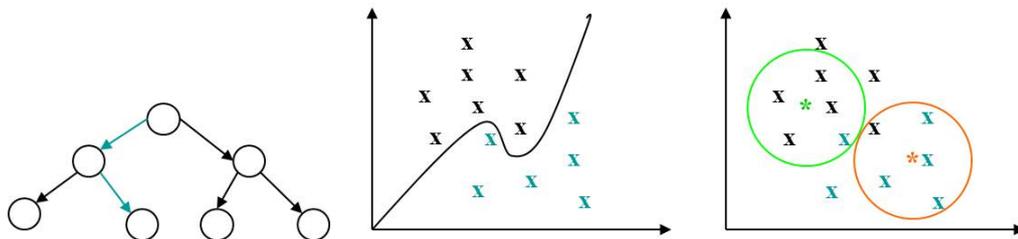


Figure 3.3.: Représentation simplifiée des modèles construits par trois types de classifieur : à gauche, le modèle à arbre de décision du RF ; au milieu, le modèle par hyper-plan séparateur du SVM ; à droite, le modèle au plus proche voisin du k-NN.

Le RF utilise des arbres de décision et choisit le meilleur (voir Figure 3.3, à gauche). Il fonctionne selon le même principe que le SVM en cherchant un hyperplan séparateur. Néanmoins, le SVM est conçu pour traiter des espaces de grande dimension et prend pour cela l'ensemble des mesures ; le RF n'a pas cette spécificité, et attribue un poids à chacune des VD. Ce poids permet par la suite de connaître la contribution de chacune de ces mesures dans le modèle final. Le paramètre à estimer est le nombre de forêts, ici égal à 50.

Le k-NN fonctionne au plus proche voisin (voir Figure 3.3, à droite). Pour chaque nouvelle donnée, il calcule la distance de similarité avec l'ensemble des données d'apprentissage. Il ordonne ensuite ces valeurs, choisit les plus petites, et prend le label majoritaire qu'il attribue à cette nouvelle donnée. Le nombre de valeurs choisies correspond au paramètre k, préalablement défini (plus il y a du bruit dans les données, et plus le k aura une valeur petite). Dans notre cas, nous avons testé les valeurs entre 1 et 30, et c'est $k = 10$ qui fonctionnait au mieux.

Quel processus est présent ? Pour la troisième question, le label était le processus de prise de décision. Étant donné que la condition n'était pas équivalente à un processus cognitif, nous avons testé une association simplifiée entre la Position, la Situation et les processus (voir Table 3.3), qui dérive des processus attendus comme étant dominants en accord avec nos hypothèses dans cette étude. Afin d'utiliser la même méthodologie que [Greene et al. \(2012\)](#), le classifieur utilisé était un SVM. Les mesures données en entrée étaient plus ciblées sur les données analysées précédemment, à savoir les amplitudes de saccade et leur pente, les durées de fixation et leur pente.

	Stop	Prioritaire	CP-Go	CP-NoGo
Avant	B	C	D	D
Après	D	C	C	D

Table 3.3.: Afin de tester les prédictions du SVM, les trois processus cognitifs ont été associés aux facteurs de Situation et de Position (les modalités Avant et Après, en fonction de la position de la pré-décision dans la condition CP-Go, donc avant ou après celle-ci) : Baseline (B), Consolidation (C) et Différentiation (D).

3.4. Synthèse des hypothèses et démarche expérimentale

Le détail des données utilisées et comment elles seront traitées sera introduit au fur et à mesure pour chacune des études et des questions, celles-ci étant liées à des spécificités du matériel utilisé.

3.4.1. En simulateur

Afin de répondre aux deux parties de la problématique, une expérience en simulateur de conduite a été menée. Le simulateur de conduite permet une validité externe importante tout en conservant une certaine validité interne. En effet, du fait de l'aspect automatique de la tâche de conduite, et avec une phase d'entraînement pour la prise en main de celui-ci, les patterns comportementaux observés en simulateur sont comparables à ceux observés en situation réelle ([Underwood et al., 2011](#)). La généralisation des observations en simulateur à la situation réelle de conduite est donc tout à fait faisable.

D'un autre côté, le simulateur permet d'isoler des comportements, que ce soit en restreignant la tâche de conduite à une situation particulière ou en épurant/sélectionnant les informations présentes dans l'environnement, afin d'avoir une confiance dans le lien observations / hypothèses proche de celle d'autres expériences

en laboratoire. Cette étude permet de tester directement les hypothèses émises en lien avec l'ensemble de la problématique (Q1 et Q2), avec les questions théoriques (Q1.1 et Q2.1) comme quantitatives (Q1.2 et Q2.2).

3.4.2. En situation réelle

Une seconde expérience a été menée en situation réelle de conduite. Dans ce type d'expérience, les conditions de passation sont au plus proche de la vie quotidienne, permettant une validité externe quasi-maximale. La validité interne est quant à elle plus faible, les différents contrôles expérimentaux ayant une marge de manœuvre assez faible. Comme nous le verrons dans le Chapitre 5 dédié à cette étude, une grande partie des contrôles expérimentaux se feront au moment du pré-traitement des données.

Cette étude permet de reprendre la question Q1, avec de nouvelles données et en y introduisant l'aspect dynamique, d'une manière un peu différente de la façon dont est posé la Q2. L'objectif principal était de confronter nos hypothèses, et les modèles qui y ont conduit, à des données quasi-similaires à celles que nous pourrions observer chez un conducteur lambda lors de ses déplacements au quotidien, et non de faire une comparaison simulateur / situation réelle à proprement parler, même si la question sera abordée dans la discussion générale.

Cette étude, de part sa nature, a un côté plus exploratoire que la précédente. Elle permet, comme nous le disions, d'aborder la Q1 sous un angle différent, de discuter des patterns oculomoteurs et des discriminations possibles en fonction des sous-tâches qui ressortent malgré le bruitage des données, autrement dit, les effets qui sont particulièrement robustes. Elle permet également de réfléchir à nouveau en terme d'applications, sachant que certaines seraient à mettre en œuvre dans ce type de situation, avec ce type de données. Les aspects quantitatifs et prédictifs de la problématique (Q1.2 et Q2.2) ne seront néanmoins pas testés par rapport aux données recueillies avec cette étude.

3.4.3. Des mesures adaptées à chacune des études

La Table 3.4 permet de mettre en regard les questions abordées dans la problématique et les mesures permettant d'y répondre dans chacune des deux études. En effet, l'aspect théorique de la problématique repose sur trois questions principales (nous avons ici séparé la seconde partie de la problématique en deux sous-questions, les aspects dynamiques étant analysés avec des mesures spécifiques), et chacune nécessite des mesures adaptées afin d'y répondre. Les aspects prédictifs (Q1.2 et Q2.2) de la problématique ne sont traités que pour l'étude en simulateur de conduite et reposent sur les mêmes mesures que les aspects théoriques (Q1.1 et Q2.1) de la problématique. Ils n'apparaissent donc pas dans cette Table. De plus, les contraintes propres aux deux études, une en simulateur de conduite, l'autre en situation réelle de conduite, n'offrent pas les mêmes possibilités quant aux choix des mesures.

Ainsi, la première question, s’articulant avec le modèle des attentes et de la valeur de l’information, est de se demander quelles sont les informations visuelles pertinentes pour chacune des sous-tâches nécessaires à la tâche et comment s’articulent ces sous-tâches, afin de déterminer si des stratégies, optimales ou non, de recueil de l’information sont spécifiques à ces sous-tâches et à la situation. Les zones visuelles contenant cette information potentiellement pertinente étaient les branches latérales des carrefours, pour la sous-tâche de gestion des interactions, et la route devant le conducteur, incluant le point de fuite, pour la sous-tâche de contrôle du véhicule. Pour répondre à cette partie de la problématique, les proportions de temps de regard dans les différentes zones de la scène visuelle (*i.e.* AOIs Voies Latérales et Chaussée) ont été analysées pour l’étude en simulateur de conduite. La construction manuelle d’AOIs en situation réelle n’étant pas envisageable, les mesures permettant de répondre à cette question étaient les angles horizontaux du regard et de la tête, avec l’hypothèse sous-jacente qu’un angle important par rapport à l’axe du véhicule, signifiait que le conducteur allait chercher de l’information sur les voies latérales (*i.e.* plus la position du regard ou de la tête s’éloignait vers la droite ou vers la gauche).

La seconde partie de la problématique, reposant plus sur le modèle de la prise de décision, et son aspect dynamique, était composée de deux questions : comment l’information visuelle est-elle recueillie selon les différentes étapes de la sous-tâche de prise de décision ; et comment ce recueil d’information évolue avec le temps ? Les mesures en simulateur de conduite permettant de répondre à la première question étaient les durées de fixation et les amplitudes de saccade, mais également les transitions entre deux AOIs, permettant de spécifier l’exploration visuelle de la scène. La deuxième question traitant de l’aspect dynamique a pu être quantifiée par l’analyse de l’évolution des durées de fixation et des amplitudes de saccades, afin de déterminer quand celles-ci augmentaient ou diminuaient (*i.e.* ce sont donc leurs pentes qui ont été analysées). Pour l’étude en situation réelle de conduite, les amplitudes horizontales, donc la différence en degré entre deux positions successives du regard, ont permis de même d’approcher la notion d’exploration visuelle. Pour la question de l’évolution temporelle, ce sont les effets de la variable d’intérêt de la position au carrefour pour les différentes mesures présentées (angle de la tête, angle du regard, et amplitude horizontale) qui ont permis d’étudier l’aspect dynamique.

La Table 3.4 suggère un lien un peu rigide entre les questions posées et les différentes mesures. Dans les faits, les interprétations proposées pourront s’appuyer également sur des résultats observés avec d’autres mesures. Par exemple, les transitions seront principalement discutées en lien avec la première partie de la problématique, et les angles du regard permettront d’appuyer une partie de la discussion en rapport avec la seconde partie de la problématique, sur les résultats observés dans l’étude en situation réelle de conduite.

	Les questions posées	En simulateur	En réel
Q1	Quelles sont les informations visuelles recueillies ? <ul style="list-style-type: none"> • Les informations recueillies sont-elles pertinentes pour l'une des deux sous-tâches tactique et opérationnelle ? • Quelle est la proportion de ces sous-tâches ? 	La proportion de temps de regard dans les AOIs Voies Latérale et Chaussée.	Les angles de la tête et du regard sur l'axe horizontal.
Q2	De quelle manière ces informations sont-elles recueillies ? <ul style="list-style-type: none"> • Le type d'exploration indique le type de processus pour la sous-tâche tactique de prise de décision. 	Les transitions entre AOIs, la durée des fixations et l'amplitude des saccades.	Les amplitude horizontales.
	Comment évolue l'exploration avec le temps ? <ul style="list-style-type: none"> • Quelle est la dynamique des processus de la prise de décision ? 	L'évolution des durées de fixation et des amplitudes de saccade durant l'approche de carrefour.	La variable d'intérêt Position qui permet de connaître l'évolution des autres mesures en fonction de leur position.

Table 3.4.: Synthèse des questions soulevées par les deux parties de la problématique (première colonne ; Q1 en haut, et Q2 en bas en deux parties avec une distinction pour la composante dynamique qui nécessite des mesures spécifiques), associées aux mesures (variables dépendantes présentées dans la deuxième et la troisième colonne) qui permettent d'y répondre en fonction de chacune des deux études, en simulateur de conduite et en situation réelle.

Étude sur simulateur de conduite

Ce chapitre présente l'étude menée sur simulateur de conduite ainsi que le matériel associé. Les résultats obtenus sont d'abord présentés en lien avec le modèle EV, puis avec les prédictions quantitatives émises dans le Chapitre 3 (première partie de la problématique). Les résultats sont ensuite présentés en lien avec le modèle Diff/Cons, puis avec les classificateurs (seconde partie de la problématique). L'ensemble de ces résultats seront discutés dans le Chapitre 6. L'environnement virtuel, le scénario, et l'ensemble des nécessités liées au simulateur de conduite, ont été pensés puis réalisés grâce à Fabrice Vienne, Jacky Robouant, Stéphane Caro et Isabelle Aillerie (IFST-TAR).

Les deux parties de cette étude, correspondant aux deux parties de la problématique, sont présentées dans deux articles de revues : la première partie en lien avec le modèle EV est actuellement en cours de publication dans la revue *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* (Lemonnier et al., 2015), et la seconde partie en lien avec le modèle Diff/Cons a été publiée dans la revue *Journal of Eye Movement Research* (Lemonnier et al., 2014).

4.1. Matériel et méthode

4.1.1. Participants

Trente quatre participants ont pris part à cette expérience (29 hommes et 5 femmes). Ils ont été recrutés majoritairement au sein de l'IFSTTAR. Leur vision était normale ou corrigée à la normale. Ils avaient tous leur permis depuis au minimum trois ans ($M = 15$, $ET = 12$). Leur âge moyen était de 34 ans ($ET = 12$). L'expérience avait été approuvée par le comité d'éthique de l'IFSTTAR.

4.1.2. Matériel et instrumentation

Le simulateur de conduite

L'environnement virtuel et le scénario L'environnement virtuel a été créé avec le logiciel Realax. Il était affiché à l'échelle 1:1, et était projeté afin d'être ajusté au point de vue du participant (1,15 m au dessus du sol virtuel). Il représentait une route de deux fois une voie dans un environnement rural. La route était en ligne droite et croisait à angle droit une nouvelle route, également à deux fois une voie, à chaque kilomètre (voir Figure 4.1, en haut). Les carrefours étaient annoncés 150 m en amont par un panneau de signalisation, prévenant les participants du régime de priorité au carrefour : cédez-le-passage, stop ou prioritaire. Les marquages au sol au niveau des carrefours étaient congruents avec les panneaux de signalisation.

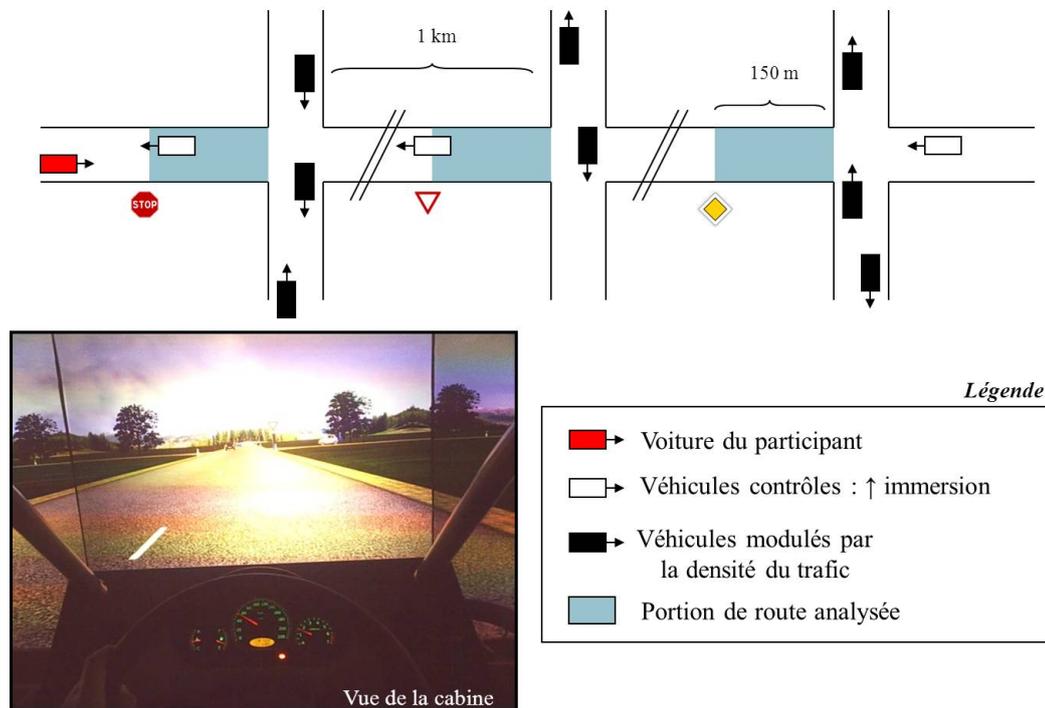


Figure 4.1.: En haut, le scénario représentant schématiquement l'environnement traversé par le participant, et en bas, une photo de l'environnement virtuel vue depuis la position du participant.

L'environnement était très simple visuellement (voir Figure 4.1, en bas à gauche) et quasi-identique pour chaque essai (les seules différences étaient liées aux conditions de règle de priorité et de densité de trafic). L'objectif était, d'une part, de minimiser l'impact de la saillance visuelle, et d'autre part, d'éviter une exploration visuelle liée à une curiosité éventuelle par rapport à l'environnement.

Un logiciel de simulation de conduite (ARCHISIM) a été utilisé afin d'introduire

du trafic dans cet environnement virtuel. Au carrefour, des véhicules étaient simulés sur les deux voies coupées par la route empruntée par le participant, et se déplaçaient à 90 km/h environ (25 m/s). L'ensemble des véhicules simulés respectait les règles de priorités aux carrefours (*e.g.* lors d'un carrefour en cédez le passage, les véhicules simulés sur les voies latérales s'arrêtaient si le participant était proche de l'entrée du carrefour, puis redémarrèrent après son passage). Trois niveaux de densité de trafic ont été implémentés : aucun véhicule, un nombre intermédiaire de véhicules (les véhicules étaient en moyenne espacés de 250 m les uns des autres, avec un écart de temps de 10 s), et beaucoup de véhicules (les véhicules étaient en moyenne espacés de 100 m les uns des autres, avec un écart de temps de 4 s).

En cas de collision avec un autre véhicule, la voiture du participant passait au travers de celui-ci sans que ce soit visible (en effet, les véhicules traversaient alors l'arrière du véhicule conduit par le participant, donc étaient non visibles pour celui-ci).

En outre, certaines voitures virtuelles ont été ajoutées sur la route du conducteur, dans la direction opposée, afin de rendre la tâche de conduite plus réaliste et moins monotone. A aucun moment le participant n'avait un véhicule devant lui sur sa voie.

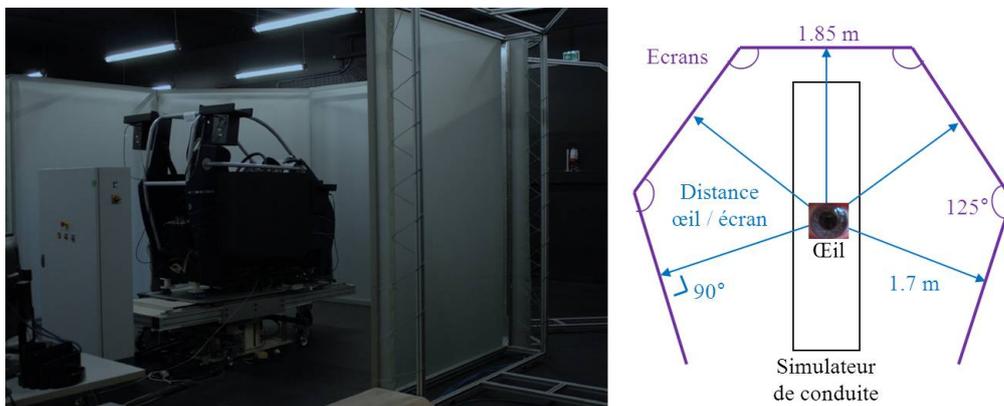


Figure 4.2.: Aménagement du simulateur de conduite au centre des cinq écrans.

Cet environnement virtuel était affiché avec cinq vidéo-projecteurs sur cinq écrans. Chaque écran était de 1,85 mètres de large sur 2,55 mètres de haut (résolution : 1024×1280 pixels ; taux de rafraîchissement : 60Hz, compatible avec le taux de mise à jour de la simulation de 60Hz). L'ensemble des cinq écrans formaient un angle de 275°, au centre duquel était situé le simulateur de conduite (voir Figure 4.2). La distance entre la tête des participants et les écrans à 90° était de 1,70 m.

La cabine Le simulateur de conduite incluait une boîte de vitesse, un volant avec retour d'effort, trois pédales, un tableau de bord avec la vitesse du véhicule et la vitesse du moteur, et un modèle d'un moteur à combustion.

Un système de restitution sonore synchronisé avec le simulateur a été ajouté.

Il restituait les bruits d'accélération, de freinage, et du reste du trafic. Son rôle était d'augmenter le réalisme de la simulation et d'aider les participants à avoir une meilleure appréhension de la vitesse de leur véhicule.

L'oculomètre

L'oculomètre utilisé était de type tête-porté (un "Eye Tracking Glasse" de l'entreprise allemande SensoMotoric Instruments - SMI, poids : 75 g). Il incluait une caméra de scène (résolution : 1280×960 pixels, 24 fps) et deux caméras pour enregistrer le regard du conducteur dans un champ de 80° à l'horizontal et 60° à la vertical. Ce système estimait la position du regard avec une précision de 0.5° (d'après les fabricants de SMI) et avec un taux d'échantillonnage de 30 Hz. L'oculomètre était calibré à l'aide de trois points d'étalonnage situés sur l'écran central.

Les données oculométriques ont été traitées à l'aide du logiciel BeGaze (logiciel SMI, version 3.1.77). Les fixations sont calculées avec un algorithme basé sur la dispersion, dont les paramètres étaient : 80 ms pour la durée minimum d'une fixation et 100 pixels pour la dispersion maximale (4.69°). Le calcul des saccades était ensuite dérivé des fixations calculées par BeGaze. Les mouvements de la tête n'ont pas été enregistrés.

Synchronisation

Au total, deux ordinateurs permettaient de gérer l'environnement virtuel, deux de gérer le simulateur et un de gérer l'oculomètre. Ces cinq ordinateurs étaient synchronisés avec le logiciel "Absolute Time Server".

Les photos présentées dans la Figure 4.3 illustrent une personne installée dans le simulateur de conduite, équipée de l'oculomètre, et conduisant dans l'environnement virtuel utilisé pour les passations.

4.1.3. Procédure

Dans un premier temps, le déroulement de l'expérience était expliqué au participant, puis celui-ci signait une fiche synthétisant les explications présentées précédemment. Il était informé des conditions de passation et de sa liberté d'y mettre fin à tout moment, et signait une attestation de consentement éclairé. Dans un second temps, le participant était installé dans le simulateur de conduite où l'expérimentateur l'équipait de l'oculomètre. L'oculomètre était ensuite calibré avec trois points d'étalonnage situés sur l'écran central.

Le participant commençait alors la phase d'apprentissage, lui permettant de se familiariser avec le simulateur de conduite et le port de l'oculomètre, et de vérifier qu'il était confortablement installé. Cette phase permettait également à l'expérimentateur de vérifier visuellement la calibration, la position du regard étant estimée en temps réel sur l'ordinateur dédié à l'oculomètre. La phase d'apprentissage était constituée d'un ensemble de virages, confrontant ainsi le participant à une situation de contrôle



Figure 4.3.: Photo du simulateur de conduite conduit par une personne portant l'oculomètre et conduisant dans l'environnement virtuel.

du véhicule simulé plus complexe que lors de la phase expérimentale où la route empruntée ne comportait aucun virage. Des plots orange étaient disposés sur le bord de la chaussée, et la tâche du participant était d'arrêter le véhicule de façon à ce que l'avant de la voiture coïncide avec la position du plot. Il lui était demandé de répéter l'opération au minimum trois fois, suite à quoi il pouvait recommencer jusqu'à se sentir à l'aise avec la manœuvre. Cette tâche permettait de se familiariser avec le freinage, l'estimation des distances et la vitesse, qui sont tous trois difficiles à estimer lors de la prise en main d'un simulateur. Or la manœuvre de freinage était centrale durant les phases expérimentales, où les participants étaient amenés à s'arrêter régulièrement au niveau des carrefours.

Ensuite, la phase expérimentale débutait. La calibration de l'oculomètre était vérifiée tout au long de l'expérience, et était corrigée si nécessaire. La tâche donnée au participant était de conduire comme il le ferait dans la réalité et, à chacun des carrefours, d'aller toujours tout droit, tout en respectant la signalisation et en évitant

les accidents.

Un essai commençait 700 mètres avant un carrefour, et se finissait 300 mètres après celui-ci. L'expérience était composée de 45 essais contre-balancés, incluant trois règles de priorité, trois niveaux de trafic et cinq répétitions. Ces essais étaient répartis en trois blocs, de 15 essais chacun, d'une durée moyenne de 17'26" (ET = 3'46"). Le participant conduisait sans s'arrêter entre deux essais d'un même bloc, les carrefours s'enchaînant alors au sein d'un même environnement. La simulation était par contre stoppée entre deux blocs, et le participant pouvait alors faire une pause s'il le souhaitait. La nature des essais dans chaque bloc était fixée, avec un maximum de deux répétitions par bloc. L'ordre de présentation des trois blocs, ainsi que l'ordre des essais au sein de chacun des blocs, était contre-balancé entre les participants. A la fin de l'expérience, la calibration était à nouveau vérifiée avec trois points. L'expérience durait en moyenne une heure.

4.2. Q1 : Distinguer des sous-tâches avec les mouvements des yeux.

4.2.1. Les aires d'intérêt

Dans cette partie sont présentées les aires d'intérêt (Area Of Interest - AOI ; voir Figure 4.4 pour un exemple sur une image). Elles ont été définies afin de rassembler les zones contenant les informations visuelles pertinentes pour les sous-tâches étudiées.

Pour la sous-tâche opérationnelle (contrôle du véhicule), la chaussée de la voie empruntée par le conducteur a été considérée comme une seule AOI en matière de contrôle du véhicule. Cette AOI a été étiquetée "Chaussée" (C).

Pour la sous-tâche tactique (interaction avec les autres usagers durant l'approche du carrefour), l'AOI considérée regroupe les deux portions de route à droite et à gauche du carrefour, donc les deux branches latérales de celui-ci. Cette AOI a été étiquetée "Voies Latérales" (VL).

Une troisième AOI a été considérée : le Tableau de bord (T). Le contrôle du véhicule comprend les informations relatives à la position latérale du véhicule, mais également une information liée à la position longitudinale, à savoir la vitesse. Ce dernier paramètre est estimé en partie à l'aide des informations en vision périphérique (Lappe et al., 1999), mais l'indicateur de vitesse est aussi une source importante d'information à ce sujet. Cependant, une partie des fixations dans cette AOI était liée à la difficulté qu'aurait le participant à estimer la vitesse du véhicule simulé. De plus, les prédictions émises sur les proportions de regard dans l'AOI C étaient associées à la sous-tâche opérationnelle de contrôle latéral, et non longitudinal. C'est pourquoi nous n'avons pas confondues les AOI T et C, et nous les avons maintenues séparées afin de pouvoir fournir une interprétation adaptée au profil de fixations observé dans chacune d'entre elles.

Pour finir, une AOI dite "Autre" (A) a été ajoutée afin de couvrir l'ensemble de l'environnement visuel. Elle incluait l'ensemble des regards qui ne se trouvaient dans



Figure 4.4.: Une image extraite de la caméra de scène de l'oculomètre sur laquelle sont représentées les AOIs. La zone encadrée en orange correspond à l'AOI Chaussée (C), la bleue à l'AOI Voies Latérales (VL), la violette au Tableau de bord (T), et le reste de l'environnement à l'AOI Autre (A).

aucune des trois autres AOIs. Cette AOI incluait également le panneau de signalisation présent au niveau du carrefour (à noter que le panneau de signalisation en amont du carrefour ne se situait à aucun moment dans le champ visuel pour les données analysées, celles-ci débutant 150 mètres avant le carrefour, donc après ces premiers panneaux).

4.2.2. Analyse des données

L'analyse des données a été restreinte au 150 derniers mètres avant chaque carrefour. Plus précisément, cette portion de route commençait 150 mètres avant le début du carrefour et s'arrêtait un mètre avant celui-ci. De plus, lorsque la vitesse du participant passait en dessous de 1m/sec (3.6km/h), les données correspondantes, et toutes celles qui suivaient, étaient également retirées (*e.g.* si le conducteur s'arrêtait trois mètres avant l'entrée du carrefour, ou plus exactement si sa vitesse passait en dessous des 1m/sec trois mètres avant le carrefour, les données enregistrées après cette position n'étaient pas analysées).

Les AOIs ont été faites manuellement image par image sur la vidéo de scène (voir

Figure 4.4). Toutefois, en raison de quelques problèmes avec la qualité des données¹ et de la durée nécessaire pour encoder les AOI image par image², seulement certains participants et certains essais ont été sélectionnés :

- Sur les 34 participants initiaux, 20 ont été sélectionnés. Ce sous-groupe de participants était constitué de 15 hommes et 5 femmes, d'un âge moyen de 34 ans (ET = 11), et de 5 ans d'expérience moyenne en conduite (ET = 12) ;
- Sur les 45 essais initiaux, 27 ont été choisis au hasard avec la contrainte d'en conserver trois par condition (au lieu de cinq) et neuf par blocs (au lieu de 15).

Pour chaque essai, deux séries de données ont été enregistrées : les durées de fixation dans chacune des AOIs, donnant la proportion de temps que passe le participant à regarder une AOI ; et les transitions, donnant la proportion de saccades d'une AOI à l'autre.

Dans un premier temps, les durées de fixation ont été examinées. Les temps de regard dans une AOI correspondait à la somme des durées de fixation dans cette AOI, et ceci pour chaque essai. Les temps de regard étaient ensuite normalisés pour chaque essai, ainsi la somme des temps de regard des différentes AOIs pour un essai donné était égale à 100%. Cela a permis de contrôler le fait que la durée des essais était variable, puisque dépendante de la vitesse des conducteurs.

Des analyses de la variance (ANOVA) ont été réalisées avec la densité de trafic et la règle de priorité comme facteur intra-sujet pour chacune des trois AOIs : C, VL et T³. Ces analyses portaient sur les données extraites durant les 150 derniers mètres avant l'entrée du carrefour. De plus, des analyses équivalentes ont été conduites sur les AOIs C, T et A sur des données issues d'une portion de route de 150 mètres, débutant 150 mètres après le carrefour. Ces analyses complémentaires permettent d'avoir des conditions contrôles. Durant cette section de route, seule la sous-tâche opérationnelle de contrôle du véhicule était présente, puisque le conducteur roulait alors en ligne droite sans obstacle ni interaction avec d'autres usagers.

Dans un second temps, les transitions ont été analysées, uniquement sur la portion de route avant le carrefour. Pour chaque essai, une matrice de transition a été extraite à l'aide du logiciel BeGaze⁴. De ces matrices, une nouvelle variable dépendante a été construite : les transitions de l'AOI VL vers l'AOI C, et inversement, ont été ajoutées, puis normalisées en fonction de la durée de chaque essai. Des ANOVAs ont été menées avec la densité de trafic et la règle de priorité comme facteur intra-sujet sur le nombre de transitions par seconde.

1. Malgré les contrôles de calibrage durant l'expérimentation, certains problèmes de précision concernant la position du regard dans la vidéo de scène sont apparus pour certains participants. Ces défauts de précision n'ont donc pas permis la définition des AOIs pour les essais concernés et les données concernées ont été rejetées. Cependant, ces défauts de précision ne gênent en rien l'analyse des durées de fixation et des amplitudes de saccades conduite par la suite.

2. Le temps de traitement pour cette étape d'analyse a été restreint à 4h par participant.

3. Nous verrons dans la partie résultat que le nombre de regards dans l'AOI A pour cette condition a été jugé insuffisant pour permettre une analyse statistique des données.

4. Une matrice est un tableau avec comme entrée verticale et horizontale les différentes AOIs. Dans chaque case est indiqué le nombre de transitions de l'AOI en entrée verticale vers l'AOI en entrée horizontale.

Pour l'ensemble des analyses, le seuil de significativité a été fixé à .05, mais, afin d'être cohérent avec Johnson (2013), les valeurs exactes de p seront données jusqu'au seuil de .001. Lorsque les analyses étaient conduites sur un plan à mesures répétées incluant des facteurs à trois modalités ou plus, les degrés de liberté ont été corrigés en utilisant les estimations Greenhouse-Geisser de sphéricité. Dans ce cas, les valeurs données pour p correspondront à celles du test de Greenhouse-Geisser.

4.2.3. Résultats

Analyses des temps de regard par AOI

Les comportements d'arrêt La Table 4.1 permet de vérifier dans un premier temps la cohérence entre les facteurs expérimentaux (la règle de priorité et la densité de trafic) et les comportements d'arrêt. Les participants se sont systématiquement arrêtés à chaque carrefour en Stop, et ont systématiquement traversé les carrefours Prioritaires sans marquer d'arrêt. En CP, le nombre de comportements d'arrêts augmente proportionnellement avec la densité de trafic. Les comportements observés sont donc cohérents avec les facteurs expérimentaux.

Densité de trafic	NoGo			Go		
	CP	Prio.	Stop	CP	Prio.	Stop
Nulle	2	0	60	58	58	0
Inter.	35	0	59	23	60	0
Élevée	56	0	60	3	59	0

Table 4.1.: Le nombre d'essai avec un comportement d'arrêt au carrefour (NoGo) et sans arrêt (Go), en fonction de la règle de priorité (Cédez le passage : CP ; Prioritaire : Prio ; Stop) et de la densité de trafic (Nulle, Intermédiaire : Inter ; Élevée). Le nombre total d'essais analysés était de 533.

Pour l'approche de carrefour L'objectif principal de cette partie était de comprendre comment les deux facteurs expérimentaux, la règle de priorité et la densité de trafic, impactaient l'allocation de l'attention dans les différentes AOIs en fonction des deux sous-tâches tactique et opérationnelle, et ceci durant l'approche de carrefour. Pour cela, une ANOVA 3×3 a été menée sur les temps de regard avec la règle de priorité (Cédez le passage, Stop et Prioritaire) et la densité de trafic (Nulle, Intermédiaire et Élevée) comme facteurs intra-sujet. Ces analyses ont été réalisées séparément pour les AOI C, VL et D. Aucune analyse n'a été conduite pour l'AOI A. En effet, très peu de regards dans cette AOI ont été trouvés pour la section de route avant le carrefour : seulement 1.30% des essais incluaient des fixations dans l'AOI A. Nous avons estimé que ce corpus de données était trop faible pour mener des analyses statistiques. Néanmoins nous les décrivons.

Les moyennes et les écart-types pour l'approche de carrefour en fonction de la règle de priorité et de la densité de trafic pour chaque AOI sont présentées dans la Table 4.2, et les données sont illustrées dans la Figure 4.5.

Règle de priorité	Densité de trafic	C	VL	T	A
Cédez le passage	Élevée	62.84	36.20	0.96	0.00
	Intermédiaire	58.40	40.18	1.42	0.00
	Nulle	57.53	39.56	2.91	0.00
Prioritaire	Élevée	55.53	39.84	3.86	0.77
	Intermédiaire	53.53	40.74	5.73	0.00
	Nulle	73.67	22.01	4.32	0.00
Stop	Élevée	84.79	13.40	1.70	0.11
	Intermédiaire	82.28	13.90	3.19	0.63
	Nulle	84.92	10.88	3.38	0.82
Moyenne		68.17	28.52	3.05	0.26

Table 4.2.: Les moyennes de pourcentage des temps de regard dans chacune des AOIs en fonction de la règle de priorité et de la densité de trafic durant l'approche de carrefour.

L'AOI Chaussée Concernant l'AOI C, un effet significatif a été trouvé pour le facteur règle de priorité, $F(2,38) = 54.64$, $MSE = 208.2$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.742$, et pour le facteur densité de trafic, $F(2,38) = 6.34$, $MSE = 124.0$, $p = 0.004$, $\eta^2 = 0.250$. Un effet d'interaction a également été trouvé, $F(4,76) = 10.61$, $MSE = 88.1$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.358$.

Les temps de regard étaient plus importants dans la condition Stop que dans la condition Prioritaire sans trafic, et plus importants dans cette dernière que dans les autres conditions (Cédez le passage et Prioritaire avec du trafic). Aucune différence n'a été observée entre la condition Cédez le passage et Prioritaire pour les conditions avec une densité de trafic Intermédiaire et Élevée (contrastes planifiés : $F(1,19) = 3.30$, $p = 0.085$).

L'AOI Voies Latérales Concernant l'AOI VL, un effet significatif a été trouvé pour le facteur règle de priorité, $F(2,38) = 46.59$, $MSE = 248.8$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.710$, et pour le facteur densité de trafic, $F(2,38) = 8.02$, $MSE = 110.1$, $p = 0.004$, $\eta^2 = 0.297$. Un effet d'interaction a également été trouvé, $F(4,76) = 8.26$, $MSE = 88.7$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.303$.

Les temps de regard étaient moins importants dans la condition Stop que dans la condition Prioritaire sans trafic, et moins importants que dans les autres conditions. Aucune différence n'a été observée entre les conditions de Cédez le passage et Prioritaire pour les densité de trafic Intermédiaire et Élevée (contrastes planifiés : $F < 1$, ns).

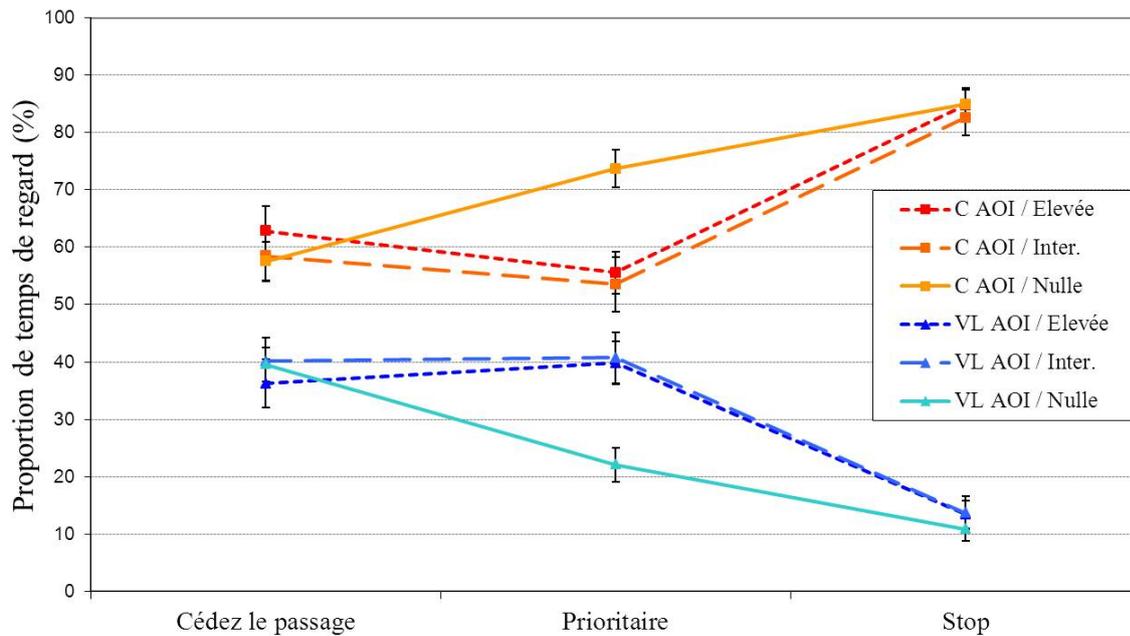


Figure 4.5.: Pourcentage de temps de regard dans chaque condition de règle de priorité (Cédez le passage, Stop et Prioritaire) et de densité de trafic (Élevée, Intermédiaire et Nulle) pour les AOIs C (Chaussée) et VL (Voies Latérales) durant l'approche de carrefour.

L'AOI Tableau de bord Concernant l'AOI T, un effet significatif a été trouvé pour la condition règle de priorité, $F(2,38) = 7.11$, $MSE = 17.6$, $p = 0.006$, $\eta^2 = 0.272$, mais pas pour la condition densité de trafic, $F < 1$, ns. Aucune interaction n'a été observée, $F < 1$, ns.

Les temps de regard étaient plus importants dans la condition Prioritaire que dans les conditions Stop et Cédez le passage (contrastes planifiés : Prioritaire vs. Stop, $F(1,19) = 5.66$, $p = 0.028$; Prioritaire vs. Cédez le passage, $F(1,19) = 9.39$, $p = 0.006$; Stop vs. Cédez le passage, $F(1,19) = 3.35$, $p = 0.083$; Table 4.2).

Pour la section de route après le carrefour Une section de 150 mètres, débutant 150 mètres après le carrefour, a été considérée comme une section de référence ne comportant qu'une seule sous-tâche : la sous-tâche opérationnelle de contrôle du véhicule. Les analyses ont été menées en fonction de la règle de priorité et la densité de trafic comme facteur intra. Une ANOVA a été conduite pour les AOIs C, T et A (l'AOI VL n'étant pas présente durant cette section de route). En effet, nous avons trouvé des fixations dans l'AOI A dans 42.67% des essais, permettant de conduire des analyses statistiques.

Concernant les AOIs C et A, aucun effet significatif n'a été observé, ni pour la règle de priorité, ni pour la densité de trafic. Concernant l'AOI T, un effet significatif

Règle de priorité	Densité de trafic	C	T	A
Cédez le passage	Élevée	79.85	13.36	6.80
	Intermédiaire	79.98	10.54	9.47
	Nulle	80.72	11.67	7.61
Prioritaire	Élevée	80.59	8.09	11.32
	Intermédiaire	83.71	8.02	8.28
	Nulle	84.92	4.57	10.51
Stop	Élevée	78.62	13.42	7.96
	Intermédiaire	80.36	13.26	6.38
	Nulle	78.94	11.49	9.57
Moyenne		80.85	10.49	8.65

Table 4.3.: Les moyennes de pourcentage des temps de regard dans chacune des AOIs en fonction des facteurs expérimentaux durant la section de route sans sous-tâche tactique de gestion des interactions (après de carrefour).

a été trouvé pour la règle de priorité, $F(2,38) = 6.10$, $MSE = 100.7$, $p = 0.011$, $\eta^2 = 0.243$, mais pas pour la densité de trafic, et aucun effet d'interaction n'a été observé.

Pour l'AOI T, les temps de regard étaient moins importants dans la condition Prioritaire que dans les conditions Stop et Cédez le passage (contrastes planifiés : Prioritaire vs. Stop, $F(1,19) = 8.49$, $p = 0.009$; Prioritaire vs. Cédez le passage, $F(1,19) = 5.71$, $p = 0.027$; Stop vs. Cédez le passage, $F(1,19) = 0.34$, $p = 0.569$; Table 4.3).

Comparaison des deux sections de route : analyses post-hoc Le principal intérêt dans le fait de comparer les deux sections, l'approche de carrefour et après le carrefour (en ligne droite), résidait dans l'évolution des temps de regard pour l'AOI C en fonction de la règle de priorité. En effet, l'AOI C correspondait à la sous-tâche opérationnelle de contrôle du véhicule, considérée comme la sous-tâche par défaut, toujours présente du moment que l'on conduit.

D'après la Figure 4.6, il semblerait qu'il n'y ait pas de différence entre les sections de route Avant et Après le carrefour pour la condition Stop. Afin d'explorer cette observation, une ANOVA 2×3 a été conduite sur les temps de regard dans l'AOI C pour les sections (2 - avant et après le carrefour) et la règle de priorité (3) comme facteur intra-sujet.

Un effet significatif a été trouvé pour le facteur section, $F(1,19) = 23.47$, $MSE = 203.1$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.553$, et une interaction a été trouvée avec la règle de priorité, $F(2,38) = 45.39$, $MSE = 50.0$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.705$. Plus spécifiquement, des différences ont été observées entre l'approche de carrefour et après le carrefour pour les conditions Cédez le passage et Prioritaire, et pas pour la condition Stop (contrastes planifiés : Cédez le passage, $F(1,19) = 32.32$, $p < .001$; Prioritaire, $F(1,19) = 54.11$, $p < .001$; Stop, $F(1,19) = 2.72$, $p = 0.115$).

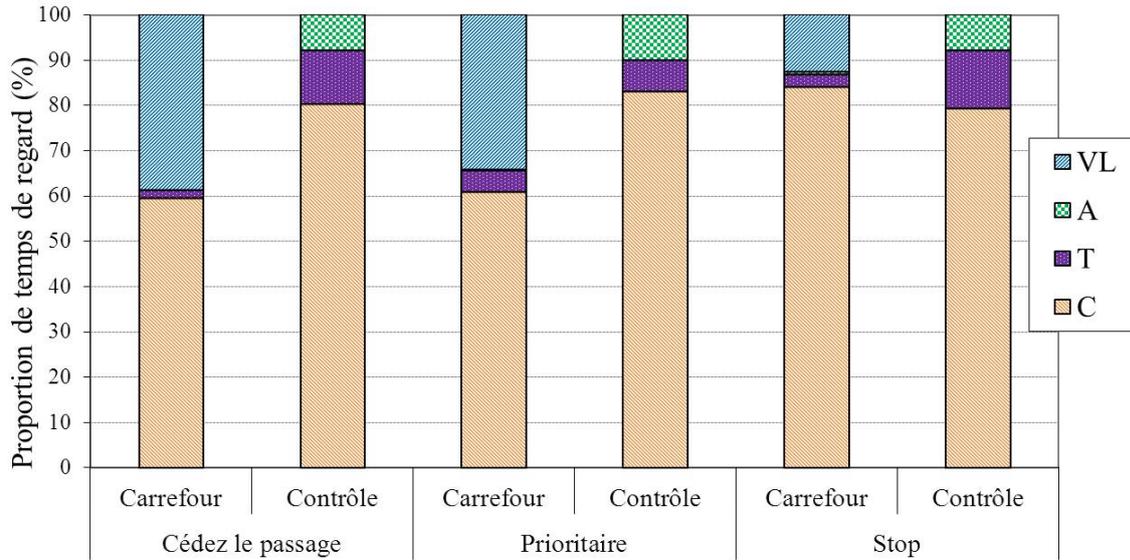


Figure 4.6.: Comparaison des pourcentages de temps de regard dans chaque AOI en fonction des conditions de règle de priorité. “Carrefour” correspond à l’approche des 150 derniers mètres avant le carrefour ; “Contrôle” à 150 mètres après la traversée du carrefour. Les abréviations des AOIs sont les suivantes : C pour Chaussée, VL pour Voies Latérales, T pour Tableau de bord, et A pour Autre.

Les transitions

Le nombre de transitions par seconde entre les AOIs VL et C a été considéré comme reflétant l’intensité de l’exploration visuelle. Une ANOVA 3×3 a été conduite sur les moyennes de ces transitions, avec la règle de priorité et la densité de trafic comme facteur intra-sujet.

Un effet significatif a été trouvé pour le facteur règle de priorité, $F(2,38) = 49.18$, $MSE = 0.07$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.721$, et pour le facteur densité de trafic, $F(2,38) = 7.78$, $MSE = 0.04$, $p = 0.002$, $\eta^2 = 0.291$. Un effet d’interaction a également été trouvé, $F(4,76) = 11.08$, $MSE = 0.35$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.369$ (Figure 4.7).

Les contrastes planifiés ne montrent aucun effet de la densité de trafic pour les conditions Stop et CP, et une différence significative uniquement entre la condition de densité de trafic Nulle et les deux autres conditions avec du trafic en Prioritaire (Intermédiaire vs Nulle : $F(1,19) = 0.31$, $p = 0.003$). Des différences significatives ont été observées entre les trois conditions de règle de priorité pour les conditions de densité de trafic Intermédiaire et Elevé (CP vs Stop : $F(1,19) = 25.71$, $p < .001$; CP vs Prioritaire : $F(1,19) = 27.03$, $p < .001$), avec plus de transitions dans la condition Prioritaire ($M = 0.84$, $SD = 0.85$) que dans la condition CP ($M = 0.51$, $SD = 0.18$), et plus dans la condition CP que dans la condition Stop ($M = 0.41$, $SD = 0.87$).

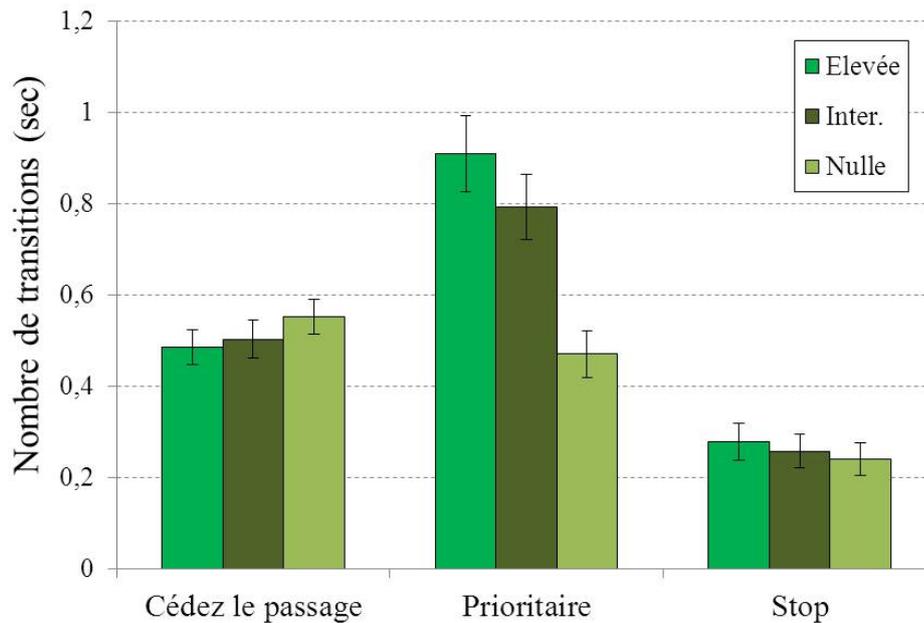


Figure 4.7.: Le nombre de transitions par seconde entre les AOIs VL et C en fonction de la règle de priorité et de la densité de trafic.

Le modèle prédictif

La Table 4.4 montre que les ordres de grandeur des temps de regard entre les prédictions issues du modèle présenté Section 3.2.2 sur la base du modèle EV et les données sont assez proches : les différences entre les valeurs prédites et les valeurs observées se situent entre 0.7% et 12.2% (M=5.8%). Le modèle ne prévoyait pas de fixation dans les AOI T et A (regroupé sous le terme de Résidu pour les fixations obtenues dans les données), ce qui est également proche du comportement observé : le pourcentage maximal de temps de regard pour les résidus est de 5.7% dans la condition Prioritaire avec une densité de trafic Intermédiaire, et la moyenne des résidus est de 3.3%.

4.2.4. Synthèse des résultats

Les prédictions qualitatives

La Figure 4.5 montre que, quelle que soit la condition, les proportions des temps de regard dans l'AOI C forment un pattern inversé à ceux observés pour l'AOI VL. Cette complémentarité des proportions de temps de regard vient du fait que ces deux AOIs regroupent la plupart des fixations durant l'approche de carrefour : entre 94.27% et 99.04% selon la condition.

Les fixations restantes, dans les AOIs D et A, peuvent être liées à d'autres aspects de la tâche de conduite (*e.g.* contrôle de la vitesse avec le tableau de bord) ou

		Cédez le passage			Prioritaire			Stop		
		E	I	N	E	I	N	E	I	N
Écart	C	11	1	7	6	13	1	9	2	1
	VL	12	3	4	1	7	5	10	6	5
Données	C	63	58	58	56	54	74	85	82	85
	VL	36	40	40	40	41	22	13	14	11
	Res.	1	1	3	5	6	4	2	4	4
Préd.	C	52	57	64	62	67	73	76	80	84
	VL	48	43	36	39	33	27	24	20	16

Table 4.4.: Les pourcentages de temps de regard pour chacune des conditions de règle de priorité et de densité de trafic (Élevée : E, Intermédiaire : I, Nulle : N) dans les AOIs pertinentes (C et VL) ou à un autre emplacement de la scène (Résidu : Rés.), dans les données observées (Donnée) et d’après les prédictions du modèle (Préd.). Les valeurs absolues des différences entre les données et les prédictions sont également présentées (Écart).

sans rapport avec cette tâche de conduite (*e.g.* coup d’œil sur le paysage). Le cadre expérimental n’a conduit qu’à très peu de fixations hors des AOIs essentielles lors des 150 derniers mètres avant le carrefour, malgré un paysage monotone et aucun danger à proprement parler. À noter que des temps de regard importants dans les AOIs reliées aux sous-tâches de conduite et très peu dans l’AOI A dénote également un engagement des participants pour la tâche.

Les données en temps de regard n’ont pas montré de différence entre les conditions de densité de trafic Intermédiaire et Élevée, de sorte que l’effet observé pour les densités de trafic serait uniquement dû à la condition de densité Nulle. Après avoir retiré la condition de densité de trafic Nulle, aucune différence n’est apparue entre les conditions Cédez le passage et Prioritaire pour les temps de regard, seulement pour la condition Stop, avec moins de temps de regard dans l’AOI VL, comparé aux autres conditions de règle de priorité.

Les temps de regards et les transitions ont permis de mettre en évidence des effets complémentaires : alors que les temps de regard ne présentent pas de différences entre les conditions Cédez le passage et Prioritaire une fois les densités de trafic Nulles retirées de l’analyse, les transitions vers une nouvelle AOI sont plus nombreuses dans la condition Prioritaire que dans la condition Cédez le passage (Figure 4.7).

Pour les données recueillies dans la portion de route après l’intersection, environ 80% des temps de regards se trouvaient dans l’AOI C, ce qui est du même ordre de grandeur que dans la portion en approche de carrefour pour les conditions Stop (84%), et supérieur aux conditions Cédez le passage et Prioritaire (respectivement 60 et 61%).

Les informations contenues dans l’AOI T peuvent aider à la régulation de la vitesse, de sorte que nous pouvons nous attendre à ce que le conducteur regarde cette AOI

d'autant plus que sa vitesse sera élevée. En effet, les temps de regard et la durée des essais semblent inversement proportionnels, avec des temps de regard dans l'AOI T plus important dans les conditions Prioritaire (4.6%, par rapport à 1.8 et 2.8% respectivement dans les conditions Cédez le passage et Stop) et des durées d'essai plus courtes dans les conditions Prioritaire (8.2 sec, par rapport à 19.4 et 15.1 sec respectivement dans les conditions Cédez le passage et Stop).

Les prédictions quantitatives

Les ordres de grandeur (Table 4.4) suggèrent une certaine validité des hypothèses concernant la matrice Importance, ainsi que de l'impact de la règle de priorité sur les matrices de Pertinence. Cependant, certains écarts par rapport aux données ont été trouvés dans les sorties du modèle : il semble que quelque chose ait été manqué en ce qui concerne la densité de trafic. En effet, la densité de trafic ne semble pas avoir d'impact sur les temps de regard (Voir Table 4.3), mis à part dans la condition Prioritaire pour laquelle la condition de densité Nulle comporte des différences avec les deux autres conditions de densité de trafic.

Les différences observées comme étant les plus faibles entre les données et les prédictions étaient : pour la condition Cédez le passage, la condition de densité Intermédiaire ; pour la condition Stop, la condition de densité Nulle ; et pour la condition Prioritaire, la condition de densité Élevée. Si la matrice de Pertinence était correcte et la matrice Débit était la seule en cause pour expliquer les différences observées entre les prédictions et les données, les meilleurs ajustements quelle que soit la règle de priorité auraient dû être observés dans la condition de densité Intermédiaire pour laquelle une valeur moyenne avait été attribuée dans la matrice Débit (4). Or, ce n'est le cas que pour la condition Cédez le passage, pas pour les conditions Stop et Prioritaire.

Nous pouvons supposer que les estimations initiales relativement grossières des paramètres de la matrice Pertinence avaient été sous-estimés ou sur-estimés. La pertinence dans la condition Cédez le passage semble correcte. Dans la condition Stop, l'erreur du modèle augmente lorsque la densité de trafic diminue. Étant donné que la sous-tâche associée à l'AOI C ne change pas, la pertinence de l'AOI VL avait peut-être été sur-estimée pour cette condition. Dans la condition Prioritaire, un effet avait été observé pour la densité de trafic sur les temps de regard, ce qui apparaissait également dans les prédictions du modèle. Cependant, aucune différence n'avait été observée entre les conditions de densité Intermédiaire et Élevée. Si la pertinence de l'AOI VL avait été bien estimée par le modèle, la valeur moyenne des prédictions pour ces deux densités de trafic devrait être similaire à celle observée. Or, ce n'est pas le cas. Nous expliquons cela comme une sous-estimation de la pertinence de l'AOI VL pour la condition Prioritaire.

Que peut-on retenir de cette analyse des résultats du modèle ? Nous sommes partis d'hypothèses qualitatives à propos de poids relatifs des sous-tâches tactique et opérationnelle durant une approche de carrefour en fonction de la règle de priorité à celui-ci. Ces hypothèses ont permis de construire un modèle prédictif des temps

de regard, en suivant le cadre décrit par Wickens : la Pertinence de l'AOI VL était de 1, 2 et 3 respectivement pour les conditions Stop, Prioritaire et Cédez le passage. Une analyse des prédictions a suggéré que, dans ce premier modèle, la Pertinence de cette AOI était sur-estimée pour la condition Stop et sous-estimée pour la condition Prioritaire. Nous avons re-testé en utilisant de nouvelles valeurs pour la Pertinence dans un modèle modifié : 0.5, 2.5 et 3 respectivement pour les conditions Stop, Prioritaire et Cédez le passage. La différence moyenne entre les nouvelles prédictions et les données est alors de 4.9% (ET = 3.7) ; tandis qu'avec le précédent modèle cette moyenne était de 5.8% (ET = 4).

La comparaison entre les prédictions et les données observées a donc permis de mettre en évidence que le modèle quantitatif de la matrice Pertinence était trop grossier. C'est un bénéfice intéressant de l'utilisation du cadre proposé par Wickens : cela aide dans la compréhension d'un rapport quantitatif entre les différentes modalités, alors que nos hypothèses initiales traitées dans la première partie étaient exprimées selon un rapport qualitatif. Ainsi, les écarts du modèle par rapport aux données sont intéressants puisque le modèle inclut une logique pour chacun des coefficients (sous-hypothèse), les écarts alertent donc sur certaines faiblesses liées à cette logique théorique sous-jacente : si un coefficient est sur- ou sous-estimé dans le modèle, cela signifie quelque chose sur les paramètres d'Attente et de Valeur (Expectancy - Value) dans la situation expérimentale.

4.3. Q2 : Distinguer différentes étapes d'une sous-tâche par les mouvements des yeux.

4.3.1. Analyse des données

De même que précédemment, les hypothèses étaient centrées sur l'approche de carrefour. Les analyses étaient donc également restreintes aux 150 derniers mètres avant le carrefour. Les variables dépendantes étaient les durées de fixation et les amplitudes de saccade. En plus des valeurs moyennes de ces variables, les hypothèses ont également été testées sur l'évolution de ces variables avec l'approche de carrefour. Pour cela, les coefficients angulaires entre deux valeurs successives (*i.e.* la pente) réparties par tranches de 10 mètres ont été calculés pour les amplitudes de saccade et les durées de fixation⁵. Ces pentes étaient ensuite considérées comme des données et moyennées par condition afin de pouvoir être analysées. Ils traduisent le taux d'augmentation ou de diminution moyen des amplitudes de saccade ou des durées de fixations en fonction de la distance au carrefour. Nous les avons nommés préférentiellement "pente". Ces pentes étaient étroitement liées à l'évolution des processus au cours du temps.

5. Par exemple, pour un participant lors d'un essai à la position 150 - 140 mètres avant le carrefour, l'amplitude des saccades moyenne était de 3.3°, puis de 2.3° à la position 140 - 130 mètres. Le coefficient angulaire, donc la pente, était négatif et d'une valeur absolue de 1° sur 10 mètres. Cette valeur de -1° était ensuite considérée comme une donnée, une variable dépendante, à part entière.

Afin de tester les prédictions à propos des mouvements des yeux en fonction des processus de la tâche de prise de décision, au sens du modèle de [Svenson \(1992\)](#), des analyses préliminaires étaient nécessaires pour construire deux facteurs : la Situation et la Position.

Le facteur Situation décrit les différentes situations de prise de décision dans lesquelles les participants se sont trouvés durant l'approche de carrefour. Il dépendait conjointement de la règle de priorité et de l'anticipation du comportement d'arrêt. La règle de priorité reprend le facteur expérimental utilisé dans la partie précédente, à savoir les conditions Cédez le passage, Prioritaire et Stop. Le comportement d'arrêt a été annoté *a posteriori* en fonction des données comportementales, selon que le participant se soit arrêté ou non. Un comportement NoGo (associé au choix de s'arrêter) était attendu dans la condition Stop et un comportement Go (associé au choix de ne pas s'arrêter) dans la condition Prioritaire. Dans la condition Cédez le passage, des comportements Go et NoGo étaient attendus. En effet, les trois densités de trafic nous permettaient d'espérer une modulation de ce comportement comme suit : dans la condition de densité Nulle, des comportements Go ; dans la condition de densité Élevée, des comportements NoGo ; et dans la condition de densité Intermédiaire, des comportements Go et NoGo⁶. Les modalités de la variable Situation étaient donc Stop avec un comportement NoGo, Prioritaire avec un comportement Go, Cédez le passage avec un comportement NoGo (CP-NoGo) et Cédez le passage avec un comportement Go (CP-Go). Des analyses descriptives ont été conduites afin de contrôler que la règle de priorité et la densité de trafic induisaient bien les comportements d'arrêt attendus.

Le facteur Position avait deux modalités, la phase Avant et la phase Après la pré-décision dans la condition Cédez le passage. Ces deux phases dépendaient donc du moment de la pré-décision. Afin d'identifier ce moment, les données ont été réparties en dix groupes en fonction de la position du conducteur par rapport au carrefour. Chaque groupe de données correspondait à un segment de route de 15 mètres. Nous avons postulé que lorsque le conducteur accélérât significativement durant une condition CP-Go ou freinait significativement durant une condition CP-NoGo, les priors décisions de ne pas s'arrêter ou de s'arrêter étaient respectivement prises. Des tests de Newman-Keuls ont été utilisés afin de déterminer des changements significatifs dans les données de pression sur la pédale d'accélération et de frein, en comparant les 10 segments de route deux à deux, pour la condition CP-Go. Le premier changement significatif a permis de séparer les données selon un point de coupure.

Ensuite, le même point de coupure des données a été appliqué aux données des autres conditions afin d'obtenir deux jeux de données équivalents : avant la pré-décision avec trois modalités de la Situation, Cédez le passage, Stop et Prioritaire ; et après avec quatre modalités, CP-NoGo, CP-Go, Stop et Prioritaire. Pour chacune des deux sections, Avant et Après, deux analyses de la variance à un facteur ont été

6. A noter que le facteur expérimental de densité de trafic n'est pas considéré directement dans cette partie comme une variable d'intérêt, il permet seulement d'observer des comportements Go et NoGo en Cédez le passage. Il n'apparaît donc pas dans les analyses.

conduites sur les valeurs moyennes et sur les pentes (quatre analyses au total).

Les durées de fixation et les amplitudes de saccade qui étaient supérieures de plus de deux écart-types aux valeurs moyennes (respectivement supérieures à 0,8s et 52.28°) ont été filtrées, ce qui retire 4.07% des fixations et 5.26% des saccades. D'autre part, les amplitudes de saccade n'étaient pas distribuées selon la loi normale. Une transformation logarithmique a été appliquée avant les analyses statistiques, permettant d'obtenir une distribution normale. Le seuil de significativité était fixé à .05, et, de même que précédemment, les valeurs de p étaient données lorsque $p > .001$.

4.3.2. Analyses préliminaires

Les deux facteurs permettant de tester les hypothèses opérationnelles ont été définies *a posteriori*. Le premier était la Situation, avec les conditions Cédez le passage, conditionnellement à la pré-décision NoGo ou Go, Stop associé à la pré-décision NoGo et Prioritaire associé à Go. Le second facteur était la Position par rapport au carrefour, Avant et Après, définis selon la pré-décision Go ou NoGo dans les conditions de Cédez le passage.

Le facteur Situation

Le lien a été exploré entre, d'un côté le facteur Situation, et d'un autre côté, le comportement d'arrêt, la règle de priorité et la densité de trafic (voir Table 4.5). Comme attendu, aucun comportement d'arrêt n'a été observé pour la condition Prioritaire. Pour quelques essais, les participants ne se sont pas arrêtés dans la condition Stop (13 essais sur 483) ; ces essais ont été retirés des analyses. Dans la condition Cédez le passage, il y avait 216 essais avec un comportement d'arrêt et 274 sans comportement d'arrêt. Ces deux valeurs sont du même ordre de grandeur et sont clairement reliées à la densité de trafic, montrant que les différentes densités de trafic ont conduit à moduler la pré-décision, Go ou NoGo.

Densité de trafic	NoGo			Go		
	CP	Prio.	Stop	CP	Prio	Stop
Nulle	7	0	153	155	163	10
Inter.	73	0	157	93	162	2
Élevée	136	0	160	26	163	1

Table 4.5.: Le nombre d'essais avec (NoGo) ou sans (Go) comportement d'arrêt au carrefour en fonction de la règle de priorité (Cédez le passage : CP ; Prioritaire : Prio ; Stop) et la densité de trafic (Nulle ; Intermédiaire : Inter. ; Élevée). Le nombre total d'essais était de 1461.

Le facteur Position

Des tests de Newman-Keuls ont été conduits afin de comparer la pression moyenne sur la pédale d'accélération, pour chaque paire de segments de 15 mètres pour la condition Cédez le passage (voir Annexe E). Les premières différences significatives ont été observées en comparant les données du septième segment de route (45-60 m) avec le premier ($p = 0.025$), le deuxième ($p = 0.025$), le troisième ($p = 0.013$) et le quatrième ($p = 0.019$). Ce résultat est consistant avec la courbe de la pédale d'accélération : la pression sur cette pédale augmente fortement à partir de 60 mètres avant le carrefour (voir Figure 4.8).

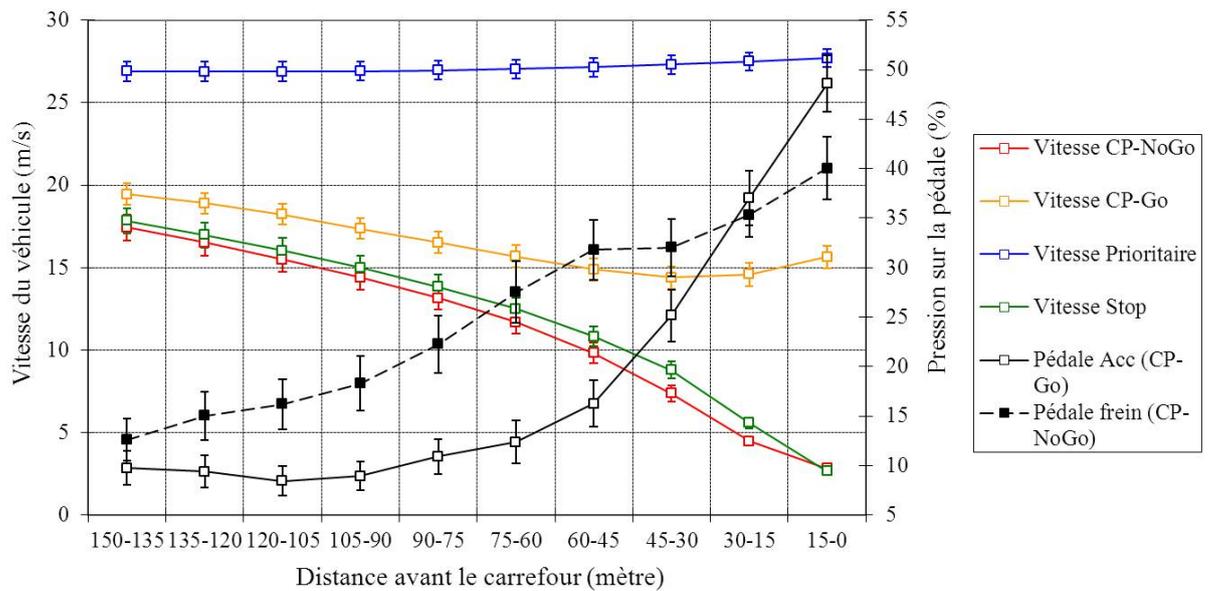


Figure 4.8.: L'axe de gauche représente la vitesse moyenne pour chacune des quatre conditions de Situation (la règle de priorité et le comportement d'arrêt), l'axe de droite représente la pression moyenne exercée sur les pédales d'accélération (Acc - pour les conditions CP-Go) et de frein (pour les conditions CP-NoGo) exprimée en pourcentage (100% correspond au fait d'appuyer au maximum sur la pédale et 0% au fait de ne pas du tout appuyer sur la pédale).

Des tests de Newman-Keuls ont également été conduits avec la pression sur la pédale de frein pour la condition CP-NoGo (voir Annexe E). Des changements significatifs apparaissent à partir du cinquième segment (75-90 mètres) en le comparant avec le premier ($p < .001$), le deuxième ($p = 0.013$) et le troisième ($p = 0.045$) segment. Le changement est néanmoins moins net (voir Figure 4.8), c'est pourquoi nous avons décidé de séparer les données sur la base du changement observé pour la pression sur la pédale d'accélération, donc après le sixième segment à 60 mètres

avant le carrefour.

Les six premiers segments de route, incluant les données recueillies entre 150 et 60 mètres avant le carrefour, ont été regroupés dans la section Avant ; et les quatre derniers, incluant les données recueillies dans les 60 derniers mètres avant le carrefour, ont été regroupés dans la section Après.

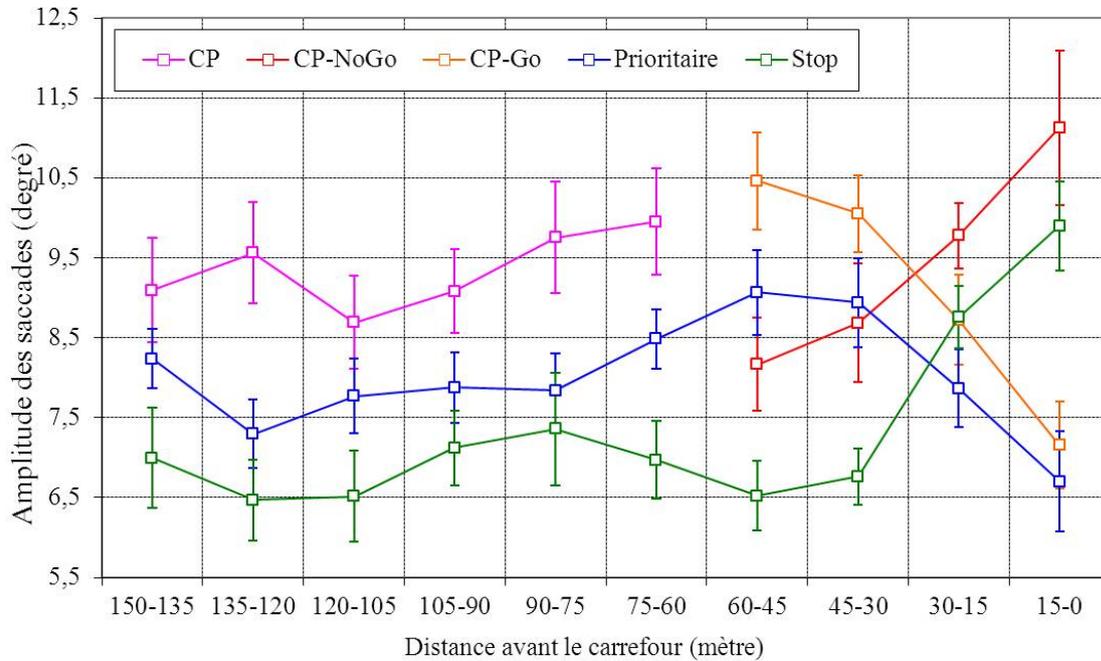


Figure 4.9.: Valeurs moyennes des amplitudes de saccade en fonction de la Position et de la Situation.

Interaction entre ces deux facteurs

Dans les analyses statistiques présentées dans la Section 4.3.3, le facteur Situation a été testé pour chacune des deux modalités du facteur Position séparément, les modalités du facteur Situation n'étant pas symétriques : CP, Stop et Prioritaire pour Avant ; et CP-Go, CP-NoGo, Stop et Prioritaire pour Après. Afin d'étudier en amont la consistance du point de séparation à 60 mètres et des modalités créées Avant et Après, une ANOVA a été conduite sur les facteurs de Position et de Situation pour tester l'interaction. Les modalités CP-NoGo et CP-Go de la section Après ont été généralisées à Avant (*e.g.* un essai labellisé CP-NoGo pour la section Après était également labellisé CP-NoGo pour la section Avant), uniquement pour cette analyse.

Un effet d'interaction a été observé, $F1(3,99) = 16.61$, $MSE = 0.01$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.335$; $F2(3,99) = 83.85$, $MSE = 0.129$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.718$ (voir Annexe F pour plus de détails concernant cette analyse). Ce résultat met en évidence une certaine

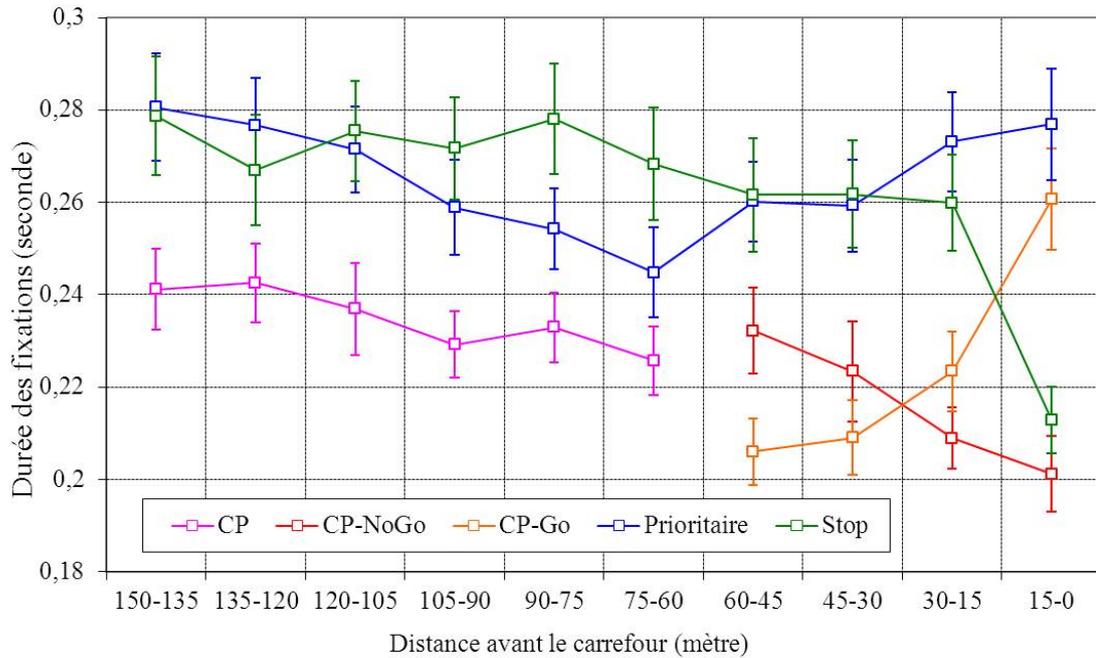


Figure 4.10.: Valeurs moyennes des durées de fixation en fonction de la Position et de la Situation.

consistance des modalités de Position créées, mettant en évidence la consistance des données entre le comportement moteur et oculomoteur (voir Figure 4.9 pour les amplitudes de saccade et Figure 4.10 pour les durées de fixations).

4.3.3. Résultats

Pour chacune des deux sections Avant et Après, quatre ANOVAs ont été conduites pour les amplitudes de saccade (en degré) et les durées de fixations (en seconde), sur les valeurs moyennes (F_V) et sur les moyennes des pentes (F_P). Dans la section Avant, trois modalités étaient présentes pour la Situation : Cédez le passage, Stop et Prioritaire. Dans la section Après, quatre modalités étaient présentes : CP-NoGo, CP-Go, Stop and Prioritaire.

Les moyennes et les écart-types sont présentés dans la Table 4.6 et les données sont illustrées dans la Figure 4.11.

La section de route “Avant”

Les analyses sur l’amplitude des saccades ont montré un effet significatif sur les valeurs moyennes, $F_V(2,66) = 27.365$, $MSE = 0.006$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.453$, avec les amplitudes plus grandes dans la condition Cédez le passage que dans la condition

Position : Section de route Avant				
		Stop	Prioritaire	CP
AS	M	7.014	8.031	9.535
	ET	2.280	1.601	2.811
	M-pente	1.087	0.974	1.976
	ET-pente	6.254	5.037	7.121
DF	M	0.279	0.271	0.239
	ET	0.057	0.049	0.044
	M-pente	0.007	-0.076	-0.042
	ET-pente	0.094	0.082	0.089

Position : Section de route Après					
		Stop	Prioritaire	CPGo	CPNoGo
AS	M	8.222	8.412	9.146	9.592
	ET	1.881	2.035	2.423	1.569
	M-pente	12.268	-7.759	-10.398	11.780
	ET-pente	12.452	15.615	10.000	20.518
DF	M	0.254	0.277	0.226	0.222
	ET	0.050	0.049	0.040	0.043
	M-pente	-0.173	0.042	0.181	-0.108
	ET-pente	0.181	0.177	0.208	0.165

Table 4.6.: Les moyennes des amplitudes de saccade (AS) et des durées de fixations (DF) en fonction des facteurs Position et Situation. Les données présentées sont les valeurs moyennes (M ; en degrés pour les AS et en secondes pour les DF) et les pentes moyennes (M-pente ; en degrés/15m pour AS et en secondes/15m pour DF), avec les écart-types associés (ET pour les valeurs moyennes et ET-pente pour les pentes moyennes). La table du haut concerne la section de route Avant, et celle du bas, la section Après.

Prioritaire, et plus grande dans cette dernière que dans la condition Stop. Aucun effet significatif n'a été observé sur les pentes moyennes, $F_P(2,66) = 0.955$, $MSE = 0.043$.

Les analyses sur la durée des fixations ont montré un effet significatif pour les valeurs moyennes, $F_V(2,66) = 21.765$, $MSE = 0.001$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.397$, avec des durées plus courtes dans la condition Cédez le passage que dans les conditions Prioritaire et Stop, sans différence significative entre ces deux dernières. Un effet significatif a également été trouvé pour les pentes moyennes, $F_P(2,66) = 7.524$, $MSE = 0.008$, $p = 0.001$, $\eta^2 = 0.186$. Les pentes étaient négatives dans la condition Cédez le passage et Prioritaire, et proche de zéro dans la condition Stop.

La section de route "Après"

Les analyses sur l'amplitude des saccades ont montré un effet significatif pour les valeurs moyennes, $F_V(3,99) = 11.552$, $MSE = 0.006$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.259$, avec des amplitudes plus petites dans les conditions Prioritaire et Stop que dans les con-

ditions CP-NoGo et CP-Go. Un effet significatif a également été observé pour les pentes moyennes, $F_P(3,99) = 110.089$, $MSE = 0.206$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.769$. Les pentes étaient positives dans les conditions Stop et CP-NoGo, et négatives dans les conditions Prioritaire et CP-Go.

Les analyses sur la durée des fixations ont montré un effet significatif pour les valeurs moyennes, $F_V(3,99) = 26.044$, $MSE = 0.001$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.441$, avec des fixations plus courtes dans les conditions CP-NoGo et CP-Go que dans la condition Stop, et plus courtes dans la condition Prioritaire qu'en Stop. Un effet significatif a également été observé pour les pentes, $F_P(3,99) = 26.344$, $MSE = 0.032$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.444$. Les pentes étaient positives dans les conditions CP-Go et Prioritaire, plus importantes dans la condition CP-Go, et négatives dans les conditions CP-NoGo et Stop.

Évolution des pentes entre la section “Avant” et “Après”

La Table 4.6 semble indiquer que les pentes étaient plus raides dans la section Après (pour les amplitudes de saccades : M-pente = 0.0928 degrés/15m, ET-pente = 0.0791 degrés/15m ; pour les durées de fixation : M-pente = 0.0027 secondes/15m, ET-pente = 0.0024 secondes/15m), que dans la section Avant (pour les amplitudes de saccade : M-pente = 0.0392 degrés/15m, ET-pente = 0.0343 degrés/15m ; pour les durées de fixation : M-pente = 0.0017 secondes/15m, ET-pente = 0.0014 secondes/15m). Cette différence suggère une relative stabilité des processus durant la section Avant, tandis que la raideur des pentes indiquerait un changement de processus durant la section Après.

Les prédictions des classifieurs

L'ensemble des analyses faites avec des classifieurs, ainsi que tout le travail en amont de discussion et préparation, et leur interprétation, l'ont été en collaboration avec Jean-Philippe Tarel puis avec Abderrahmane Boubezoul (LEPSiS - IFSTTAR).

L'ensemble des mesures oculométriques et comportementales sur le simulateur⁷ ont été données comme entrée à trois types de classifieur : un *Support Vector Machine* (SVM), un *Random Forest* (RF) et un *k-Nearest Neighbors* (k-NN). Les modèles construits par chacun de ces classifieurs devaient prédire si la décision était imposée (Prioritaire et Stop) ou non imposée (CP) par la règle de priorité.

En comparant les prédictions aux données, le hasard étant à 50%, les performances suivantes ont été observées : 67.17% pour le RF, 70% pour le SVM et 78.65% pour le k-NN (voir la Figure 4.12 pour une représentation schématique du modèle créé par le k-NN, le classifieur ayant le meilleur taux de prédictions correctes). Le RF est un

7. Données issues de l'oculomètre : nombre de fixations (relatif), durée des fixations, pente de la durée de fixation, nombre de saccades, durée des saccades, pente de la durée des saccades, amplitude des saccades, pente de l'amplitude des saccades, durée des clignements, nombre de clignements (relatif), diamètre pupillaire. Données issues du simulateur : vitesse, pente de la vitesse, accélération (pédale), pente de l'accélération, freinage (pédale), pente du freinage.

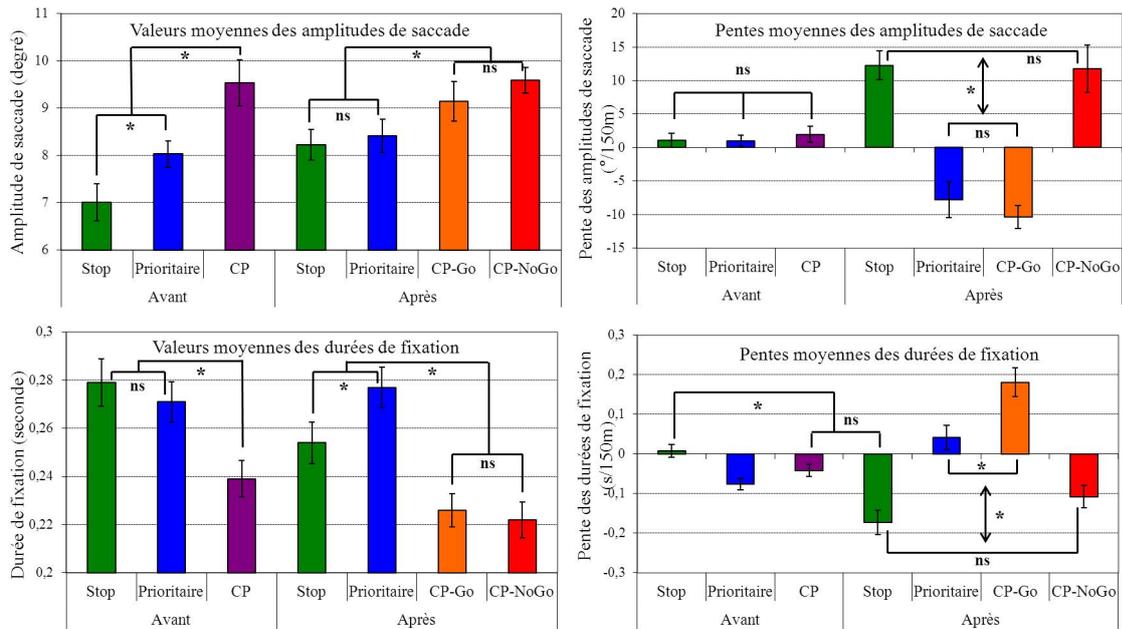


Figure 4.11.: Les valeurs et les pentes moyennes des amplitudes de saccade et des durées de fixation en fonction des facteurs de Situation et de Position.

type de classifieur qui attribue à chacune des mesures leur poids dans la construction du modèle. Ainsi, les trois mesures qui ont le plus contribué étaient : le nombre de saccades, les durées de fixation et les amplitudes de saccade (voir Figure 4.13).

Dans un second temps, les mesures de durée de fixation et d'amplitude de saccade, ainsi que leur pente, ont été données comme entrée à un SVM. Le modèle construit permettait de prédire le processus de prise de décision dominant selon l'association simplifiée entre processus, Situation et Position présentée dans la Table 4.7.

	Stop	Prioritaire	CP-Go	CP-NoGo
Avant	B	C	D	D
Après	D	C	C	D

Table 4.7.: Afin de tester les prédictions du SVM, les trois processus cognitifs ont été associés aux facteurs de Situation et de Position : Baseline (B), Consolidation (C) et Différentiation (D).

Le taux de bonnes prédictions observées était de 58.81% pour prédire le processus cognitif, ce qui est au dessus du niveau du hasard (33%). Nous avons également observé que l'utilisation des tendances (pentes) en plus des valeurs moyennes augmente le pouvoir prédictif du modèle : sans les pentes, le taux de prédiction était de 48.37%.

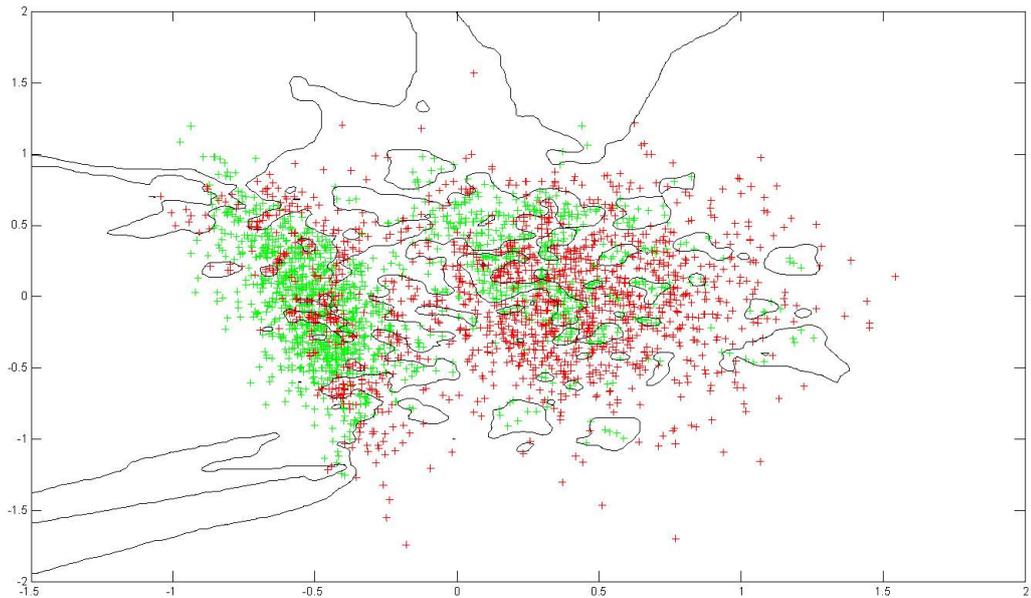


Figure 4.12.: Représentation schématique en deux dimensions des données dans l'espace du classifieur k-NN. Les axes ont été choisis selon une analyse de type ACP (Analyse en Composantes Principales) ; dans le modèle il y a beaucoup plus de dimensions. Les lignes continues noires correspondent à la séparation faite entre les deux classes prédites par le classifieur, ici projetées dans un espace restreint à 2D (ce qui explique que certaines frontières semblent étranges). La couleur représente les deux classes, avec la tâche de prise de décision présente (vert) ou absente (rouge).

Avec ce même jeu de données, nous avons également testé les prédictions complémentaires suivantes :

- 7.57% pour prédire le participant (le hasard était à 2.94%) montrant des modèles de comportement oculomoteur idiosyncratique,
- 46.30% pour la Situation (le hasard était à 25%),
- 71.25% pour la Position (le hasard était à 50%).

4.3.4. Synthèse des résultats

Dans la section de route Avant, les amplitudes de saccade les plus grandes et les durées de fixation les plus courtes se trouvaient dans la condition Cédez le passage, correspondant au processus D, ce qui est congruent avec l'hypothèse d'une exploration visuelle plus importante durant ce processus. La différence entre la condition Prioritaire, processus C, et la condition Stop, processus B, avec de plus grandes amplitudes dans C, peut être due à un niveau de risque subjectif plus important dans la condition Prioritaire, en lien avec l'absence d'interaction associée à la décision NoGo

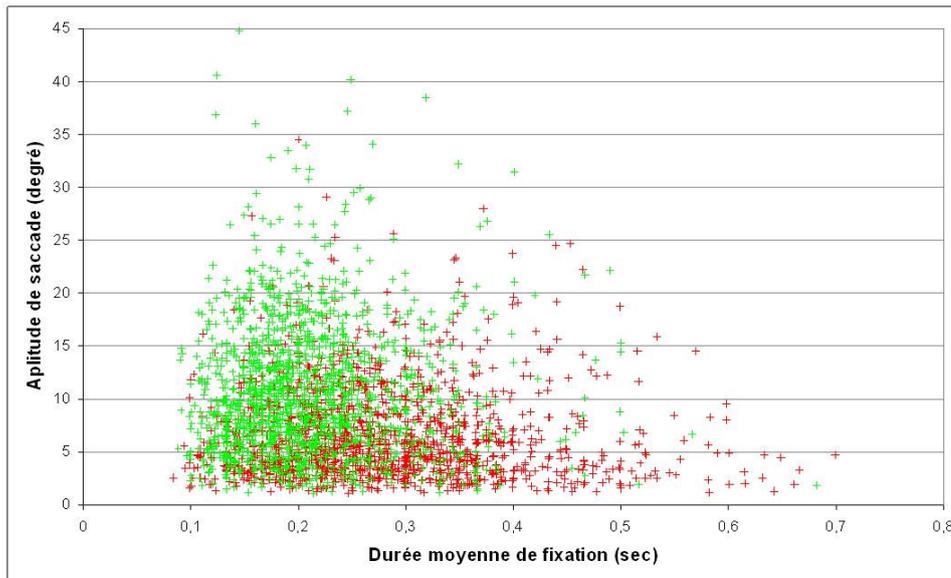


Figure 4.13.: Représentation des données dans un espace à deux dimensions correspondant à l’amplitude des saccades et la durée de fixation (ces deux variables faisant partie de celles qui ont le plus contribué aux prédictions du classifieur RF). La couleur représente les deux classes, avec la tâche de prise de décision présente (vert) ou absente (rouge).

dans la condition Stop : avec un faible niveau de risque, les processus sont proches de la baseline.

Dans la section de route Après, les fixations observées étaient plus courtes pour la condition Stop que pour la condition Prioritaire, ce qui est congruent avec l’anticipation de la prochaine décision à prendre dans la condition Stop, avec un nouveau processus présent, D. Pour les amplitudes de saccade et les durées de fixation, aucune différence n’a été trouvée sur les valeurs moyennes entre les conditions CP-Go et CP-NoGo. La Figure 4.9 montre que les courbes se croisent, ce qui suggère que les pentes sont plus pertinentes pour décrire le comportement oculomoteur dans ce cas. En effet, les pentes des amplitudes de saccade et des durées de fixation évoluent dans le même sens pour les conditions Stop et CP-NoGo d’un côté, et Prioritaire et CP-Go d’un autre côté. Cela peut signifier une augmentation de l’exploration visuelle, traduisant une amplification des processus D dans les deux premières conditions (Stop et CP-NoGo), et une diminution de l’exploration visuelle dans les deux autres conditions (Prioritaire et CP-Go).

Étude avec un véhicule instrumenté

5.1. Matériel et méthode

Cette étude a été réalisée au Département Laboratoire de Saint Briec (DLBB) du CETE de l'Ouest (aujourd'hui Direction Territoriale Ouest du Cerema), en collaboration avec Lara Désiré, à l'aide du Véhicule d'Observation de l'Interaction du Conducteur avec l'Infrastructure et l'Environnement de la route (VOICIE). Ce véhicule instrumenté a été entièrement développé au sein du DLRB sous la supervision de Lara Désiré (Désiré, 2010), et l'ensemble de la préparation de l'expérience ainsi que les passations ont été menées conjointement avec cette dernière, de même que l'extraction des données qui a suivi. Cette étude a permis le recueil d'un grand nombre de données qui recouvrent à la fois les problématiques liées à l'étude présentée dans le cadre de cette thèse, mais également les problématiques d'une étude menée par Lara Désiré, centrées sur l'étude du recueil d'information visuelle lors de manœuvres tourne-à-droite à des carrefours en T.

5.1.1. Participants

Trente quatre participants ont pris part à l'expérience. Ils ont été recrutés au sein du DLRB ou de la Direction Départementale du Territoire et de la Mer des Côtes d'Armor. Tous les participants avaient une vision normale ou corrigée à la normale, et le permis B depuis au moins 6 ans.

Suite à l'extraction et au dépouillement des données, certains participants ont dû être retirés des données en vue des analyses, pour des raisons liées à une trop grande perte de données lors de l'enregistrement, de défaillance du matériel, ou à des causes liées à l'environnement (météo), induisant une fiabilité dans les données trop faible. Dans les analyses, seuls 14 participants ont pu être conservés. Ces participants, dont 3 femmes, avaient en moyenne 44 ans (ET = 11 ans), le permis B depuis 25 ans (ET = 13 ans), et estimaient conduire en moyenne 311 km par semaine (ET = 229 km).

5.1.2. Le véhicule instrumenté

Le véhicule instrumenté était une Renault Clio III à transmission manuelle, équipée de cinq portes.

L'oculomètre

L'oculomètre était un Smart Eye Pro 5.9 déporté, qui a un taux d'échantillonnage de 60 Hz. Il était composé du matériel suivant :

- quatre caméras monochrome (XC HR50 ; Sony) disposées sur le tableau de bord, qui permettaient de filmer le visage du conducteur sous quatre angles différents (voir Figure 5.1 A et Figure 5.3). Ce sont ces caméras qui permettaient le recueil des informations sur la position de la tête et la direction du regard ;
- deux lampes infra-rouges et deux surfaces rétro-réfléchissantes également disposées sur le tableau de bord et dirigées vers le conducteur (voir Figure 5.1, B). Ces sources lumineuses permettaient aux caméras de détecter le reflet cornéen afin d'en déduire la direction du regard ;
- trois caméras de scène (WAT-902H3 SUPREME CCIR ; Watec) fixées sur un même support, lui-même fixé sous le rétroviseur intérieur (voir Figure 5.1, C). Ces caméras étaient dirigées vers l'extérieur du véhicule afin de filmer la scène avant. Les champs de ces trois caméras se recouvraient, et ont ensuite été fusionnés à l'aide du logiciel Panorama Builder (SmartEye) afin d'obtenir un panorama recouvrant un champ de 216° à l'horizontal et de 60 ° à la verticale (résolution : 1080×300 pixels), dans lequel le point de regard était projeté (voir Figure 5.2) ;
- un ordinateur (SST-SG01-B ; SylverStone Technology) placé dans le coffre du véhicule. Cet ordinateur était équipé de deux cartes d'acquisition vidéo, du logiciel Smart Eye Pro 5.9, et du logiciel SceneRecorder.

L'oculomètre permettait donc de recueillir la direction de la tête et celle des yeux, dans le repère du véhicule. Pour cela, un modèle de tête était tout d'abord construit par le logiciel de Smart Eye, puis la direction du regard était calculée.

Les données véhicule

Des données comportementales autres que celles des yeux et de la tête étaient également enregistrées grâce au Dispositif de Recueil des données Conducteur (DIRCO ; développé par le LIVIC, IFSTTAR, et réalisé par la société Lolitech). Ce dispositif est composé d'un PC d'acquisition et de trois capteurs, chacun permettant le recueil d'un très grand nombre de données. Les principales données enregistrées sont présentées ci-dessous pour chacun des trois capteurs.

- Les données issues du bus CAN du VOICIE qui ont été exploitées : date d'enregistrement (ms), compte-tour moteur (tr/min), vitesse longitudinale moyenne (km/h), accélération longitudinale calculée ($m.s^{-2}$), angle du volant (degré).
- Le GPS a été utilisé pour pointer les zones étudiées sur Google Maps et couplé à un logiciel développé en interne au Cerema. Cela a permis de définir ces zones

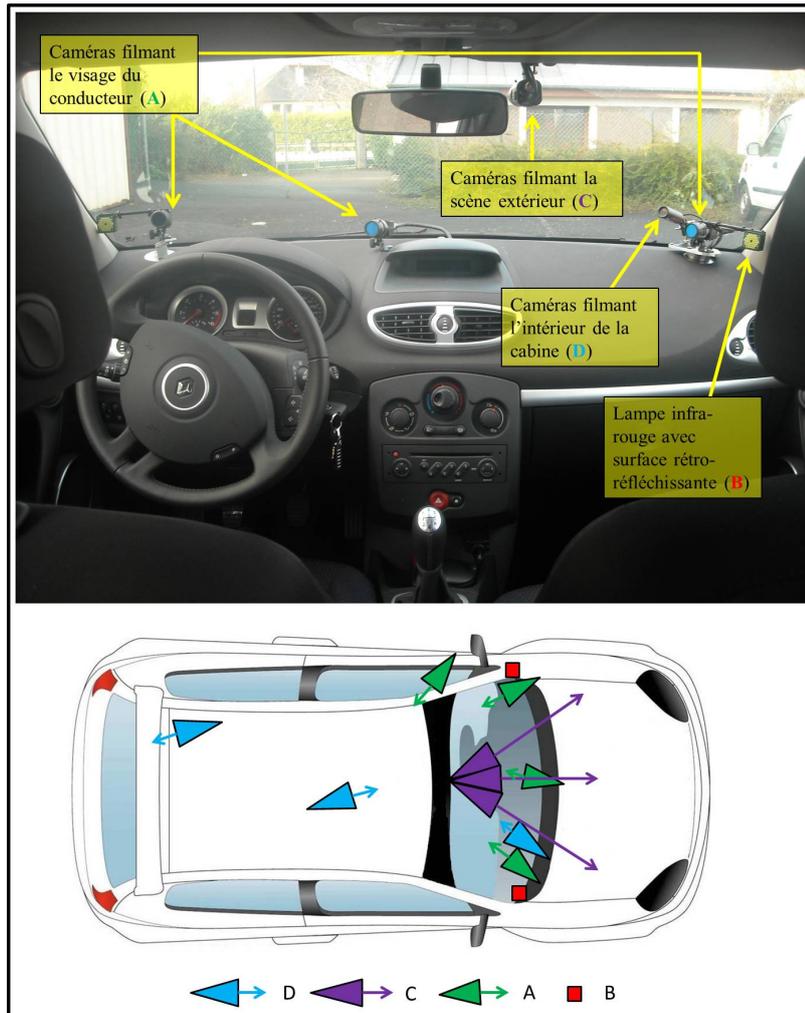


Figure 5.1.: En haut, une photographie de l'intérieur du véhicule instrumenté, en bas, un schéma vu de dessus de ce même véhicule (adapté de Désiré (2010)). L'emplacement d'une partie du matériel lié à l'oculomètre est indiqué, à savoir les caméras filmant le visage des participants (A), des lampes infra-rouge et surfaces rétro-réfléchissantes (B), et des caméras filmant l'extérieur du véhicule (C - sur la photo, une seule caméra est représentée, cette caméra a été remplacée par un trépied de 3 caméras comme indiqué sur le schéma afin de couvrir une plus grande surface du champ visuel). La position des caméras permettant de filmer l'intérieur de la cabine, ainsi que l'environnement extérieur à l'arrière, est également indiqué (D). La Figure 5.3 permet d'avoir une vue plus détaillée de ces caméras.

dans les données (notamment la zone d'approche du carrefour).



Figure 5.2.: Exemple d'une image extraite d'un panorama construit lors de l'approche d'un des carrefours de l'étude à partir des trois caméras de scène. Le disque vert indique la position du regard.

L'ensemble de ces capteurs était géré par un ordinateur installé dans le coffre (voir Figure 5.3, en bas). Le taux d'échantillonnage était de 25 Hz.



Figure 5.3.: Photos de l'intérieur du véhicule instrumenté : en haut à gauche, les deux caméras de gauche filmant la tête ; en haut à droite, la caméra de droite filmant la tête, avec une lampe infra-rouge, et une caméra filmant l'intérieur de la cabine ; en bas, deux vues de l'intérieur de coffre avec les ordinateurs gérant l'ensemble du dispositif d'enregistrement des données comportementales.

En plus de ces capteurs, trois caméras étaient disposées dans le véhicule. Ces trois caméras (4Kam Wideboy ; 4KSport) ont toutes environ 147 degrés d'angle de vue et une résolution de 520 lignes. Leur position permettait de filmer : les mains du conducteur (et ses actions sur le volant et la boîte de vitesse) et une partie de la scène avant ; le conducteur vu de face ainsi que le passager avant ; la scène arrière du véhicule (voir Figure 5.1, D).

Pour finir, un microphone (e912S BK ; Sennheiser) était également présent dans le véhicule, placé entre les deux sièges avant.

La synchronisation

Afin que l'ensemble des enregistrements, gérés d'un côté par l'ordinateur dédié à l'oculomètre et de l'autre par l'ordinateur dédié au DIRCO, soient synchronisés, un troisième ordinateur était également présent dans le coffre du véhicule. Cet ordinateur était équipé du logiciel The Observer XT (NOLDUSTM) qui gérait le lancement des logiciels d'acquisition des données oculométriques (SceneRecorder et SmartEyePro 5.9 ; SmartEye), le lancement du logiciel d'acquisition des vidéos issues des caméras intérieures et du son (MediaRecorder, Noldus Information Technology) et l'envoi d'un signal ON/OFF au PC du DIRCO. Cette configuration a permis une synchronisation automatique des données issues du DIRCO (bus CAN, centrale inertielle et GPS) avec la vidéo et le son de l'intérieur du véhicule. Concernant les données issues de l'oculomètre, la vidéo panoramique avec la position du regard incrustée et les données de mouvement de la tête et de synchronisation du regard sont synchronisées. La synchronisation des données de l'oculomètre avec les données du DIRCO et de la vidéo intérieure a été faite à l'aide du logiciel The Observer XT Observer¹.

5.1.3. Le circuit

Le circuit choisi sur le réseau routier départemental des Côtes d'Armor visait à faire circuler les participants sur des carrefours en croix à régime de priorité stop, cédez le passage ou prioritaire. Sur ce circuit, 19 zones ont été retenues pour l'étude des stratégies visuelles en approche de carrefour en croix (voir Annexe G pour l'explication de comment les zones ont été sélectionnées). Deux zones différentes pouvaient faire référence au même carrefour, traversé soit par un autre axe (pas la même règle de priorité), soit à un autre moment de l'expérience (voir la Table 5.1 pour la liste des carrefours et des zones associées, et la Figure 5.4 pour une cartographie du circuit). Il y avait sept carrefours différents à proprement parler. Ces 19 zones incluaient sept franchissements en voie prioritaire (pour deux zones, les usagers des axes perpendiculaires avaient un stop, pour les cinq autres, ils avaient un cédez le passage), sept

1. Les caméras filmant l'intérieur du véhicule ont permis une vérification manuelle de la synchronisation entre la vidéo panoramique gérée par l'ordinateur dédié à l'oculomètre et la vue de la scène avant filmée et gérée par l'ordinateur dédié au DIRCO (*i.e.* synchronisation manuelle dans un premier temps, avec des comportements tel que l'arrêt du véhicule, puis synchronisation manuelle plus fine avec des comportements tel que une main posée sur le volant).

traversées en voie non prioritaire avec un cédez le passage, et cinq traversées non prioritaire avec un stop.

Zone	Passage	Règle de priorité	Densité de trafic
2	2	Stop	Faible
4	4	Cédez le passage	Faible
4	6	Cédez le passage	Faible
2	7	Stop	Faible
2	8	Prioritaire	/
6	11	Prioritaire	/
6	12	Cédez le passage	Élevée
6	13	Cédez le passage	Élevée
7	14	Cédez le passage	Élevée
10	17	Stop	Faible
7	19	Prioritaire	/
6	20	Prioritaire	/
15	24	Stop	Élevée
15	27	Prioritaire	/
16	28	Cédez le passage	Faible
16	29	Cédez le passage	Faible
16	32	Prioritaire	/
16	33	Prioritaire	/
20	36	Stop	Élevée

Table 5.1.: Le circuit est fait de manière à ce qu'un même carrefour pouvait être traversé plusieurs fois, par la même branche ou par une branche différente pouvant ainsi ne pas avoir la même règle de priorité. Le numéro des zones (première colonne) correspond aux différents carrefours présents dans le circuit, et le numéro des passages (deuxième colonne) correspond aux différentes traversées. Lorsque dans le texte nous parlons de "carrefour", nous nous référons au passage, et non à la zone. Les numéros des passages sont dans l'ordre chronologique du circuit. La règle de priorité et la densité de trafic est indiqué pour chaque passage.

Au total, le circuit était long d'environ 80 km. La majorité des carrefours se situait en zone rurale, mais le circuit comprenait également des portions de routes à 2×2 voies départementales et des routes bidirectionnelles en zone urbaine.

5.1.4. Procédure

A l'arrivée du participant, l'expérimentateur lui expliquait le déroulement général de l'expérience avec les différentes étapes de test, calibration, conduite et questionnaires. Un document lui était également fourni rappelant ce déroulement. Il était

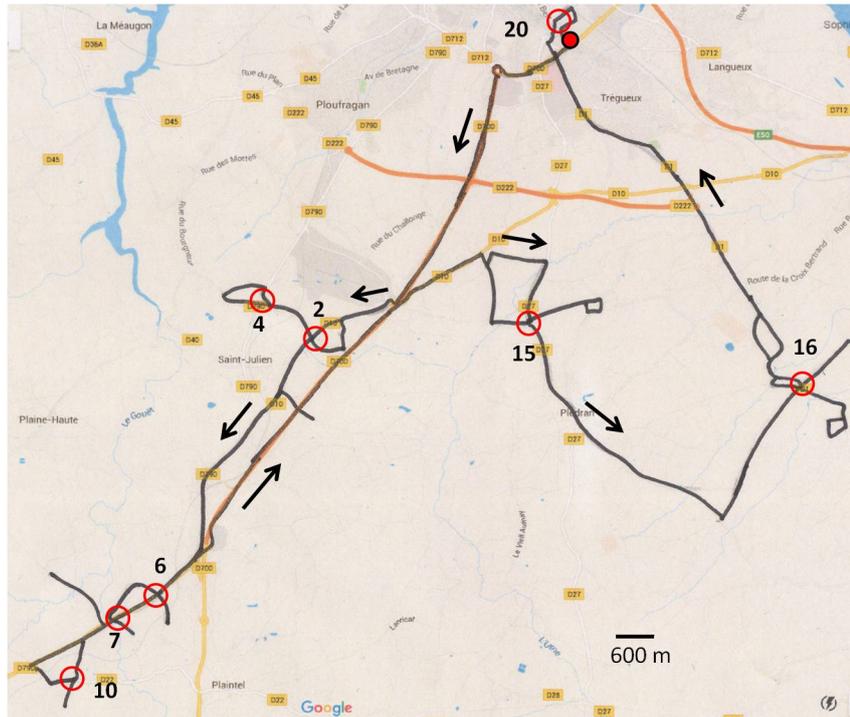


Figure 5.4.: Le circuit. Les cercles rouges indiquent les différentes zones associées aux carrefours. Leur numéro correspond à ceux présentées dans la Table 5.1, dans la première colonne. Le point rouge et noir indique la position du point de départ et d'arrivé du circuit, et les flèches permettent d'avoir une idée générale du sens du circuit. Le plan est extrait de Google Maps.

ensuite invité à remplir un formulaire de consentement éclairé, ainsi qu'un formulaire d'autorisation d'utilisation d'image, ce dernier n'étant en rien nécessaire pour la passation de l'expérience.

Le participant était ensuite conduit au véhicule instrumenté dans lequel il lui était demandé de s'installer le plus confortablement possible, avec la possibilité de régler le siège et les rétroviseurs. Pour valider cette position et qu'il puisse se familiariser avec le véhicule, il lui était demandé de conduire en présence de l'expérimentateur sur un parcours de 5 minutes autour du laboratoire.

Il sortait ensuite du véhicule et était invité à remplir un questionnaire permettant de recueillir des informations générales à son sujet (*e.g.* âge, date d'obtention du permis, fréquence à laquelle il conduit, correction visuelle). Durant cette phase, un second expérimentateur préparait le véhicule.

Ensuite, le participant était à nouveau invité à prendre place dans le véhicule. Le participant est prévenu qu'une fois la phase de réglage terminée, il était préférable qu'il ne sorte pas du véhicule ni ne modifie sa position dans celui-ci (*e.g.* avancer ou reculer son siège), afin de conserver les bons réglages. La calibration de l'oculomètre

était faite avec l'aide du second expérimentateur. La position des quatre caméras de l'oculomètre sur le tableau de bord était ajustée au participant. Un modèle de tête était ensuite calculé par le logiciel². Pour finir, la calibration du regard était faite à l'aide de cinq points, quatre placés sur le capot relevé du véhicule et un sur le pare-brise. Elle était vérifiée en demandant au participant de regarder différents points à l'intérieur et à l'extérieur du véhicule (ces derniers étaient situés plus de 10 mètres devant le véhicule).

Avant le départ, l'expérimentateur redonnait au participant les consignes de l'expérience à venir, à savoir : faire comme si l'expérimentateur n'était pas présent (celui-ci étant installé sur le siège arrière droit du véhicule tout le long de la conduite) ; les directions à prendre lui seraient données oralement par le navigateur GPS ; s'il avait un doute, il était préférable qu'il prenne une décision plutôt que de parler avec l'expérimentateur, celui-ci étant de toute façon là pour lui indiquer s'il n'avait pas pris la bonne route. Le navigateur GPS était installé à l'arrière du siège avant droit, de sorte qu'il ne puisse pas être vu par le participant, seules les informations audio lui étaient transmises.

Le participant pouvait alors commencer le parcours. Durant celui-ci, l'expérimentateur notait pour chacun des carrefours si le participant avait parlé ou s'était trompé, si un événement inattendu était survenu, et le nombre approximatif de véhicules sur les axes latéraux du carrefours durant l'approche. De plus, pour l'ensemble du circuit, l'expérimentateur notait l'heure de départ et d'arrivée, la météo, les problèmes de navigation éventuels, et tous les événements inattendus.

La passation complète durait en moyenne 3h, dont 1h45 de conduite (jamais plus de 2h).

5.1.5. Analyse des données

Les données analysées étaient celles recueillies durant les 100 derniers mètres avant l'entrée des carrefours en croix. Lors de l'étude sur simulateur de conduite, l'analyse des données portait sur les 150 derniers mètres avant l'entrée des carrefours. Cependant, en situation naturelle, les carrefours ont été sélectionnés afin que la portion de route avant le carrefour soit contrôlée au maximum en termes de visibilité et de trajectoire. Or, compte tenu de la topographie du réseau routier, de tels contrôles sur 150 mètres auraient conduit à devoir éliminer un grand nombre de carrefours. Nous avons donc décidé de concentrer les analyses sur les données issues des 100 derniers mètres. De plus, lorsque la vitesse du participant passait en dessous de 1m/sec, les données correspondantes, et toutes celles qui suivaient, étaient également retirées³.

2. Le participant devait "faire des vagues" avec sa tête, permettant aux caméras de prendre des photos de celle-ci dans différentes positions. Le logiciel SmartEyePro 5.9 détecte des points particuliers de la tête (*e.g.* narine, coin des yeux, commissure des lèvres) pour chacune de ces photos, et l'ensemble de ces points permet ensuite au logiciel de construire un modèle de la tête du participant.

3. Le seuil est le même que celui utilisé lors de l'étude sur simulateur.

Les variables indépendantes Le premier facteur expérimental est celui qui a conditionné le choix des carrefours, la règle de priorité, comprenant les mêmes modalités que lors de l'étude sur simulateur : Cédez le Passage (CP), Stop et Prioritaire (voir Figure 5.1).

Afin de rendre compte de la dynamique de l'exploration visuelle et de la prise d'information lors de l'approche de carrefour, un facteur Position a également été construit. Les données portant sur les 100 derniers mètres avant le début du carrefour ont été réparties selon trois portions de route : de 100 à 66 mètres, de 66 à 33 mètres, et de 33 à 0 mètres avant le carrefour.

Un facteur rendant compte du trafic a été construit *a posteriori*. Il ne concernait que les modalités Stop et CP du facteur règle de priorité. Il n'a pas été possible de faire une distinction satisfaisante pour les carrefours Prioritaire, le nombre de véhicules présents sur les branches latérales du carrefour étant trop faible⁴ (voir Table 5.2). Les expérimentateurs embarqués avec le participant ont relevé le nombre de véhicules passant sur les branches latérales des carrefours durant l'approche de carrefour, et durant l'arrêt à celui-ci. L'objectif n'était pas d'avoir un relevé exact du trafic pour chaque passage, le nombre de participants et de carrefours étant trop réduit pour permettre un nombre de modalités suffisamment représentatif. L'intention était de pouvoir répartir en deux classes la fréquentation générale à un carrefour donné sur des bases objectives (dans cette idée, les valeurs présentées correspondent au recueil pour l'ensemble des participants ayant passé l'expérience, pas seulement ceux qui ont pu être conservés pour les analyses). Les carrefours Stop et CP ont donc été répartis selon les modalités Faible et Élevé (voir Table 5.2). La distribution pour ce facteur de trafic attendu était la suivante : quatre CP pour la Faible, trois CP pour la Élevé, trois Stop pour la Faible et deux Stop avec une Élevé (voir Figure 5.1).

Pour finir, durant les passations, nous avons remarqué qu'à certains carrefours les participants demandaient quasi-systématiquement une confirmation de l'itinéraire à suivre alors même que la consigne qui leur avait été donnée consistait à aller toujours tout droit en l'absence d'indication du navigateur GPS et éviter au maximum de s'adresser à l'expérimentateur. Cela peut traduire un certain niveau de difficulté de la sous-tâche de navigation, et venir interférer avec la répartition de l'attention visuelle. Nous avons donc ajouté un facteur supplémentaire, la Navigation. Ce facteur ne concernait que les carrefours en CP, ce phénomène ayant été rencontré seulement pour des carrefours de ce type. De plus, les participants étaient amenés à traverser deux fois le même carrefour en CP, et ceci concernait deux carrefours. Les carrefours CP ont donc été répartis pour constituer *a posteriori* trois modalités : deux carrefours pour une modalité dite Neutre, deux carrefours pour une modalité dite Facile, ils correspondaient au deux carrefours sur lesquels un premier passage avait déjà été effectué, et trois carrefours pour une modalité dite Difficile, correspondant aux trois carrefours pour lesquels les participants s'étaient régulièrement

4. Cela peut s'expliquer par le fait que les routes secondaires étaient de petites routes faiblement empruntées, mais également du fait de la vitesse des participants plus élevée dans cette condition, diminuant ainsi la probabilité de croiser un autre véhicule.

Règle de priorité	Trafic	Label des carrefours	Approche		Arrêt	
			Moy.	Σ	Moy.	Σ
CP	Faible	4a	0.54	7	0.31	4
		4b	1.23	16	0.27	4
		16a	0.07	1	0.4	6
		16b	0.29	4	0.43	6
	Élevé	6b	4.13	62	6.8	102
		6c	2.2	33	3.87	58
		7a	1.53	23	4.07	57
Stop	Faible	2a	0.29	4	0.64	9
		2b	0.67	10	0.6	9
		10	0.2	3	0.07	1
	Élevé	15a	1.33	20	1.53	23
		20	0.89	8	1.77	23
		Prio.	2c	0.03	1	/
	6a	0.03	1	/	/	
	7b	0.07	2	/	/	
	6d	0.07	2	/	/	
	15b	0.23	7	/	/	
	16b	0.07	2	/	/	
	16c	0.08	2	/	/	

Table 5.2.: Nombre moyen et total de véhicules présents sur les branches latérales du carrefour lors de l’approche et lors de l’arrêt au carrefour. Ces valeurs ont été recueillies par l’expérimentateur présent dans le véhicule pour l’ensemble des participants ayant pris part à l’expérience.

adressés à l’expérimentateur pour demander une confirmation verbale.

Les variables dépendantes Trois types de mesures ont été utilisées pour les analyses descriptives : l’angle du volant, de la tête et du regard, selon un axe horizontal. Les données brutes pour l’angle de la tête et du regard comportaient un angle sur l’axe horizontal et un sur l’axe vertical. Étant donné la topologie des lieux relativement homogène, et l’intérêt de cette étude portant sur la prise d’information principalement dans les zones à gauche et à droite du véhicule (correspondant aux branches latérales du carrefour) et de la zone face à celui-ci (incluant le point de fuite), seul l’angle horizontal a été considéré.

Seuls les angles de la tête et du regard ont été conservés pour les analyses statistiques. La valeur zéro correspond à l’axe du véhicule, “en face”, les valeurs négatives sont vers la gauche du véhicule, dans son propre référentiel, et les valeurs positives vers la droite. Pour les analyses statistiques, ces angles ont été ramenés à leur valeur absolue, ce qui a été permis d’une part par la question de recherche, liée à l’excentricité

de la recherche d'informations par rapport au point de fuite ; et d'autre part par la symétrie des carrefours choisis.

Afin de rendre compte de l'exploration visuelle et d'avoir une mesure se rapprochant de l'amplitude des saccades (utilisée dans l'étude en simulateur de conduite), une troisième variable dépendante a été construite à partir de l'angle du regard horizontal. Pour cela, les différences entre deux angles de regard consécutifs ont été calculées puis considérées comme une variable dépendante à part entière. Comme nous l'avons vu précédemment, les données brutes étaient normalement constituées d'un enregistrement, donc d'un angle du regard, toutes les 0.1 secondes. Cependant, pour diverses raisons techniques, certains enregistrements manquaient. Toutes les positions qui se suivaient avec un écart de plus de 0.1 seconde (*i.e.* lorsqu'il manquait une ou plusieurs données) ont donc été supprimées pour cette variable dépendante. Cela correspond à 8.80% des données pour l'angle du regard selon l'axe horizontal.

Ainsi, lorsque deux positions de regard se suivaient de 0.1 seconde, la valeur de la première, toujours par rapport à l'axe horizontal, était soustraite à la seconde, et la valeur absolue de la valeur obtenue était retenue⁵. Cette nouvelle variable dépendante a été nommée "Amplitude horizontale" et s'exprime en degré. A noter que cette variable dépendante est différente de l'amplitude de saccade, car elle est calculée sur l'axe horizontal et n'a pas de filtre minimum sur sa valeur (ne permettant pas ainsi de distinguer fixations et saccades).

Les différentes analyses Une première partie est consacrée aux analyses descriptives : le nombre de comportements d'arrêt par type de carrefour ; la vitesse moyenne par condition au cours du temps ; et la fréquence des angles du regard, selon l'axe horizontal et vertical.

Concernant les analyses statistiques, une première série d'ANOVAs 3×3 a été conduite sur les mesures d'angle de tête, d'angle du regard et d'amplitude horizontale. Les facteurs étudiés étaient la règle de priorité (CP, Stop et Prioritaire) et la position au carrefour (les trois portions de route), tous deux en intra-sujet⁶. Une analyse du même type a également été conduite sur les angles verticaux du regard afin de vérifier que les effets recherchés étaient bien captés uniquement par les variables associées à l'axe horizontal.

Afin d'étudier l'effet du trafic, des ANOVAs intra-sujet $2 \times 2 \times 3$ ont été conduites sur les mesures d'angle du regard et d'amplitude horizontale. Les facteurs étaient le trafic attendu (Faible et Élevé), la règle de priorité (CP et Stop) et la position (les trois portions de route), tous trois en intra-sujet.

Une analyse complémentaire a ensuite été réalisée pour explorer l'effet de la navigation, avec comme facteurs intra-sujet la Navigation (les trois niveaux de difficulté)

5. Il aurait été possible de diviser cette valeur par le délai entre ces deux enregistrements afin d'obtenir une vitesse angulaire. Mais du fait que ce délai était toujours égal à 0.1 seconde, on aurait sous-estimé fortement la vitesse angulaire réelle. Pour éviter tout malentendu, cette mesure n'a pas été retenue, et nous avons préféré utiliser la différence entre deux positions successives de regard.

6. Pour l'analyse par carrefour, la règle de priorité était systématiquement un facteur inter-sujet.

et la position (les trois portions de route). Une ANOVA 3×3 a donc été conduite sur les mesures d'angle du regard, uniquement pour les carrefours en CP.

Les données concernant les positions du regard et de la tête suivaient une loi normale. Le seuil de significativité était fixé à .05, mais de même que pour l'étude sur simulateur, les valeurs de p sont données lorsque $p > .001$. Pour chaque analyse, une analyse par sujet ($F1$) et une analyse par carrefour ($F2$) ont été conduites. Les contrastes planifiés détaillant chacune de ces analyses, ainsi que les graphiques, sont issus des analyses par sujet.

5.2. Résultats

5.2.1. Analyses descriptives

Les comportements d'arrêt L'ensemble des participants se sont systématiquement arrêté aux carrefours avec un Stop et avec un CP, et à l'inverse, tous sont passés sans s'arrêter aux carrefours Prioritaire. Nous n'avons donc dans cette étude aucun comportement NoGo (sans arrêt) dans la condition CP.

La vitesse La vitesse moyenne des participants est représentée dans la Figure 5.5. La vitesse semble constante en condition Prioritaire durant les 100 mètres d'approche de carrefour, tandis qu'elle décroît pour les condition Stop et CP, ce qui est cohérent avec le fait de n'avoir observé que des comportements d'arrêt dans ces deux conditions. Le détail des vitesses moyennes pour chaque carrefour de chaque condition de règle de priorité est représenté sous forme graphique dans l'Annexe H.

Angle du regard sur les axes horizontal et vertical La Figure 5.6 représente une répartition des angles du regard, séparément selon l'axe horizontal et l'axe vertical. Ces angles sont exprimés par rapport au référentiel du véhicule conduit par le participant. Ainsi, sur l'axe horizontal, une valeur négative signifie un regard vers la gauche et une valeur positive, un regard vers la droite. Sur l'axe vertical, une valeur négative signifie un regard plus vers le bas, et une valeur positive, un regard plus vers le haut. Ces angles du regard sont ceux recueillis durant les 100 derniers mètres avant l'entrée du carrefour, pour chacune des trois règles de priorité, et sont ceux qui ont été ensuite analysés. Cette figure montre que la répartition des regards sur l'axe horizontal est beaucoup plus étalée, avec plus de variabilité dans l'excentricité des regards, que celle des regards sur l'axe vertical.

5.2.2. Analyses statistiques

La règle de priorité et la position

Afin d'étudier les effets de la règle de priorité (Prioritaire, CP, Stop) et de la position au carrefour (les trois portions de route), des d'ANOVA 3×3 ont été conduites

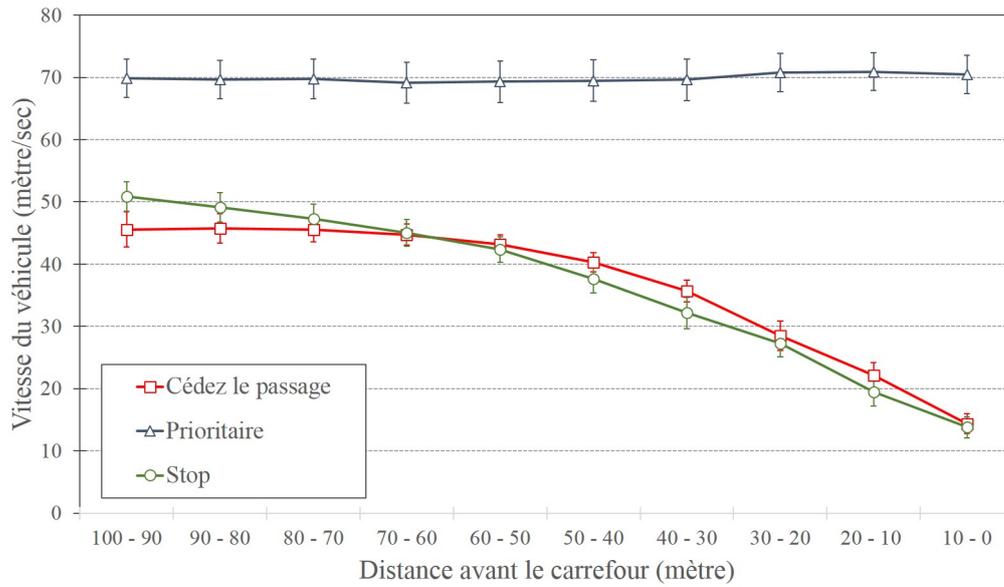


Figure 5.5.: Vitesse moyenne des participants durant l'approche de carrefour pour chacune des trois règles de priorité (Cédez le passage, Stop et Prioritaire).

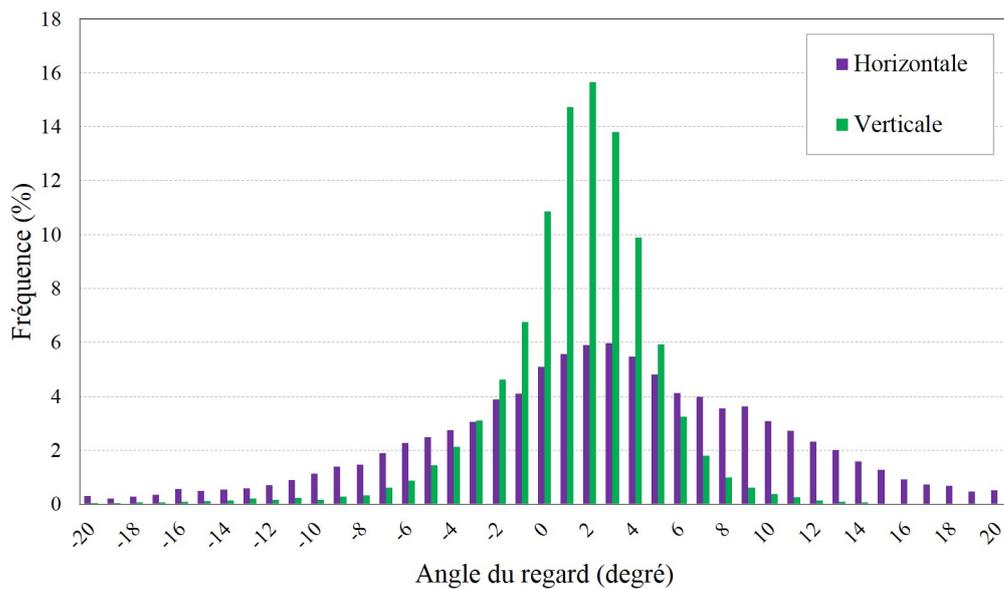


Figure 5.6.: Le pourcentage de regard en fonction de leur angle pour les axes vertical et horizontal. Le nombre total des angles de regard enregistré pour chacun des deux axes était de 20687.

sur les mesures d'angle de la tête, d'angle du regard et d'amplitude horizontale, avec pour chacune une analyse par sujet ($F1$) et par carrefour ($F2$). Les moyennes et les écart-types obtenus dans chacune des conditions pour ces trois mesures sont présentés dans la Table 5.3. Une analyse complémentaire du même type porte sur l'angle du regard selon l'axe vertical.

Pour chacune de ces analyses, nous avons testé les contrastes entre chaque condition de la règle de priorité pour chaque position, ainsi qu'entre chaque position pour chacune des conditions de règle de priorité. Étant donné ce grand nombre de contrastes, un test post-doc de comparaisons multiples était plus adapté qu'une comparaison planifiée. Un test HSD de Tukey (*Honestly Significant Difference*) a donc été conduit pour chacune des trois analyses.

L'angle de la tête Un effet significatif de la règle de priorité et de la position ont été observés, pour l'analyse par sujet et par carrefour: la règle de priorité, $F1(2,26) = 21.53$, $MSE = 4.81$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.624$, $F2(2,16) = 18.68$, $MSE = 2.77$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.700$; la position, $F1(2,26) = 48.14$, $MSE = 7.29$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.787$, $F2(2,16) = 86.44$, $MSE = 1.61$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.844$ (voir Figure 5.7).

Un effet d'interaction significatif a également été observé pour l'analyse par sujet et par carrefour, $F1(4,52) = 10.06$, $MSE = 4.34$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.436$, $F2(4,32) = 11.75$, $MSE = 1.61$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.595$.

Pour les positions 100-66 et 66-33 mètres avant le carrefour, il n'y aucune différence entre les différentes conditions de règle de priorité (CP vs Stop, 100-66 m : $p = 0.996$, 66-33 m : $p = 1$; CP vs Prioritaire, 100-66 m : $p = 0.940$, 66-33 m : $p = 0.737$; Prioritaire vs Stop, 100-66 m : $p = 1$; 66-33 m : $p = 0.866$). Pour la position 33-0 mètres, les angles de la tête sont plus petits dans la condition Prioritaire que dans les conditions CP ($p < .001$) et Stop ($p < .001$), sans qu'il n'y ait de différence significative entre ces deux dernières ($p = 1$).

Les angles de la tête n'évoluent pas entre les positions 100-66 et 66-33 mètres pour aucune des trois conditions de règle de priorité (CP : $p = 1$; Prioritaire : $p = 1$; Stop : $p = 0.982$). Ils augmentent cependant entre les positions 66-33 et 33-0 mètres pour les conditions CP ($p < .001$) et Stop ($p < .001$), pas pour la condition Prioritaire ($p = 0.619$).

L'angle du regard Un effet significatif de la règle de priorité et de la position ont été observés, pour l'analyse par sujet et par carrefour: la règle de priorité, $F1(2,26) = 25.32$, $MSE = 3.03$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.661$, $F2(2,16) = 8.77$, $MSE = 3.64$, $p = 0.003$, $\eta^2 = 0.523$; la position, $F1(2,26) = 14.70$, $MSE = 3.90$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.531$, $F2(2,16) = 7.60$, $MSE = 3.25$, $p = 0.002$, $\eta^2 = 0.322$ (voir Figure 5.8).

Un effet d'interaction significatif a également été observé, mais uniquement pour l'analyse par sujet, $F1(4,52) = 3.25$, $MSE = 1.80$, $p = 0.019$, $\eta^2 = 0.200$, $F2(4,32) = 0.83$, $MSE = 3.25$, $p = 0.514$.

Pour la position 100-66 mètres, il n'y a pas de différence entre les trois conditions de règle de priorité (CP vs Stop, $p = 0.082$; CP vs Prioritaire : $p = 0.892$; Prioritaire

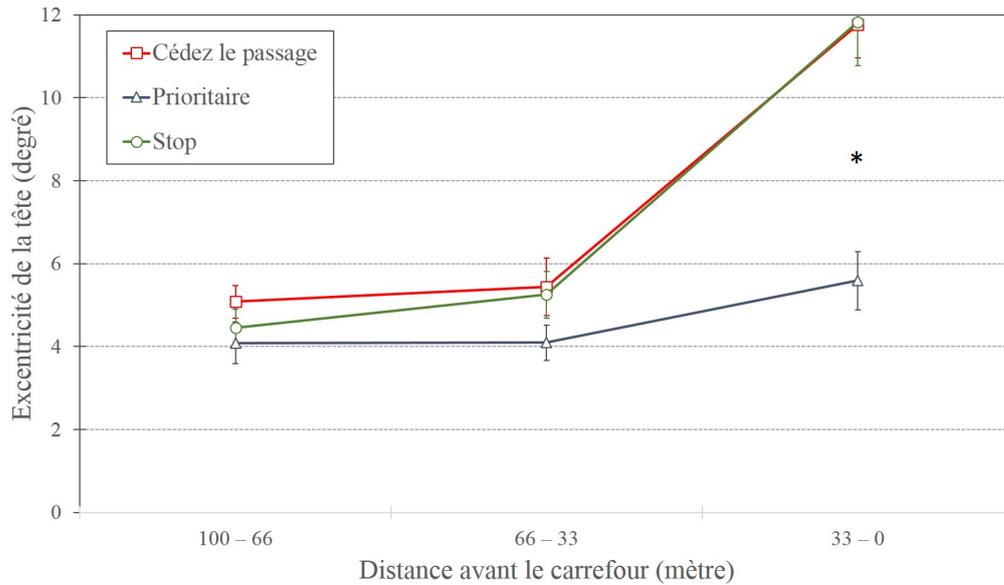


Figure 5.7.: La valeur absolue des angles de la tête en fonction de la position au carrefour et de la règle de priorité (en degré).

Règle de priorité	Position	Angle de la tête	Angle du regard	Ampli.
Cédez le passage	100-66 m	5.08 (1.48)	6.87 (1.33)	20.51 (4.84)
	66-33 m	5.44 (2.57)	8.26 (2.08)	19.26 (5.91)
	33-0 m	11.77 (3.00)	9.80 (2.16)	24.39 (4.49)
Prioritaire	100-66 m	4.09 (1.89)	5.33 (1.85)	21.23 (5.68)
	66-33 m	4.09 (1.58)	5.63 (1.36)	22.03 (5.73)
	33-0 m	5.59 (2.63)	6.18 (2.10)	22.08 (6.73)
Stop	100-66 m	4.45 (1.68)	6.16 (1.85)	20.98 (7.90)
	66-33 m	5.25 (2.08)	7.44 (1.61)	21.52 (4.83)
	33-0 m	11.83 (3.93)	9.36 (2.92)	26.25 (5.58)

Table 5.3.: Les valeurs moyennes en intra-groupe, et leur écart-type entre parenthèses (exprimés en degré), pour chacune des trois types de mesure, angle de la tête, du regard, et amplitude horizontale (Ampli.), en fonction des conditions de règles de priorité et de position.

vs Stop : $p = 0.782$). Pour les positions 66-33 mètres et 33-0 mètres, les angles du regard sont plus petits dans les conditions Prioritaire que dans les conditions CP (66-33 m : $p < .001$; 33-0 m : $p < .001$) et Stop (66-33 m : $p = 0.020$; 33-0 m : $p < .001$), sans différence significative entre ces deux dernières conditions (66-33 m : $p = 0.798$; 33-0 m : $p = 0.994$).

Pour la condition CP, les angles du regard augmentent entre les positions 100-66 et

33-0 mètres ($p < .001$), sans qu'il y ait de différence entre les positions 100-66 et 66-33 ($p = 0.156$), ni entre les positions 66-33 et 33-0 ($p = 0.084$). Pour la condition Stop, les angles du regard n'évoluent pas entre les positions 100-66 et 66-33 mètres ($p = 0.241$), mais augmentent ensuite entre les positions 66-33 et 33-0 ($p = 0.011$). Pour la condition Prioritaire, les angles du regard n'évoluent pas, ni entre les positions 100-66 et 66-33 ($p = 1$), ni entre les positions 66-33 et 33-0 ($p = 0.974$).

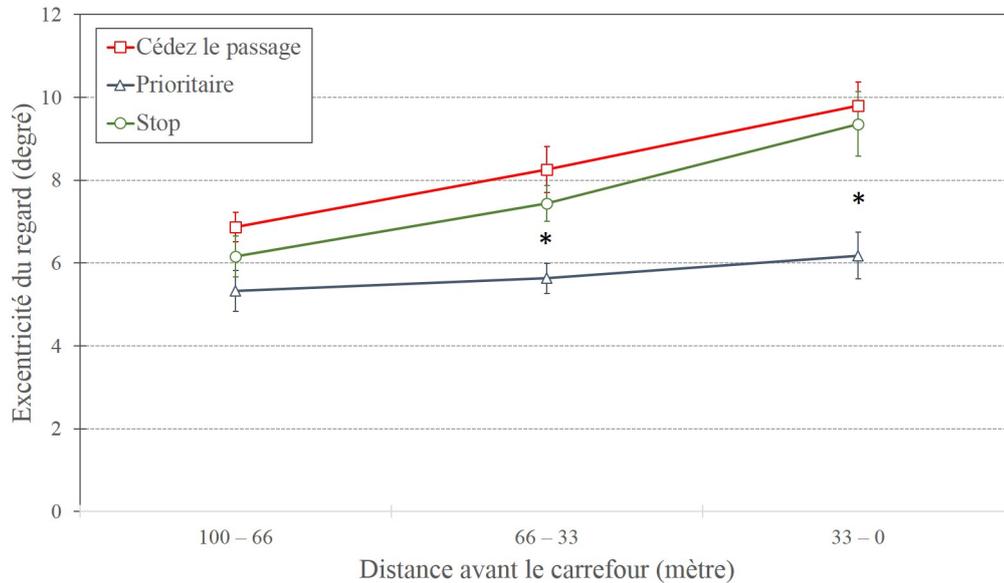


Figure 5.8.: La valeur absolue des angles du regard en fonction de la position au carrefour et de la règle de priorité (en degré).

L'amplitude horizontale du regard Aucun effet significatif de la règle de priorité n'a été observé, ni pour l'analyse par sujet, ni pour celle par carrefour, $F1(2,26) = 2.76$, $MSE = 13.55$, $p = 0.082$, $F2(2,16) = 0.44$, $MSE = 16.09$, $p = 0.654$. Un effet significatif de la position a été observé pour l'analyse par sujet et par carrefour, $F1(2,26) = 24.59$, $MSE = 5.68$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.654$, $F2(2,16) = 20.11$, $MSE = 3.00$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.557$ (voir Figure 5.9).

Un effet d'interaction a été observés pour l'analyse par sujet et par carrefour, $F1(4,52) = 3.12$, $MSE = 9.42$, $p = 0.0.23$, $\eta^2 = 0.193$, $F2(4,32) = 5.58$, $MSE = 3.00$, $p = 0.002$, $\eta^2 = 0.411$.

Aucune différence n'a été observée entre les trois conditions de règle de priorité, ni en position 100-66 (CP vs. Stop : $p = 0.998$; CP vs. Prioritaire : $p = 1$; Stop vs. Prioritaire : $p = 1$), ni en position 66-33 (CP vs. Stop : $p = 0.500$; CP vs. Prioritaire : $p = 0.565$; Stop vs. Prioritaire : $p = 1$). En position 33-0 mètres, les amplitudes horizontales sont moins importantes dans la condition Prioritaire que dans la condition Stop ($p = 0.012$). Il n'y a cependant pas de différence à cette

position entre les conditions CP et Prioritaire ($p = 0.331$), ni entre les conditions CP et Stop (0.894).

Les amplitudes horizontales n'évoluent pas entre les positions 100-66 et 66-33 mètres pour chacune des trois conditions de règle de priorité (CP : $p = 0.990$; Stop : $p = 1$; Prioritaire : $p = 0.999$). Entre les positions 66-33 et 33-0 mètres, les amplitudes horizontales augmentent dans les conditions CP ($p = 0.002$) et Stop ($p = 0.015$), mais n'évoluent pas dans la condition Prioritaire ($p = 1$).

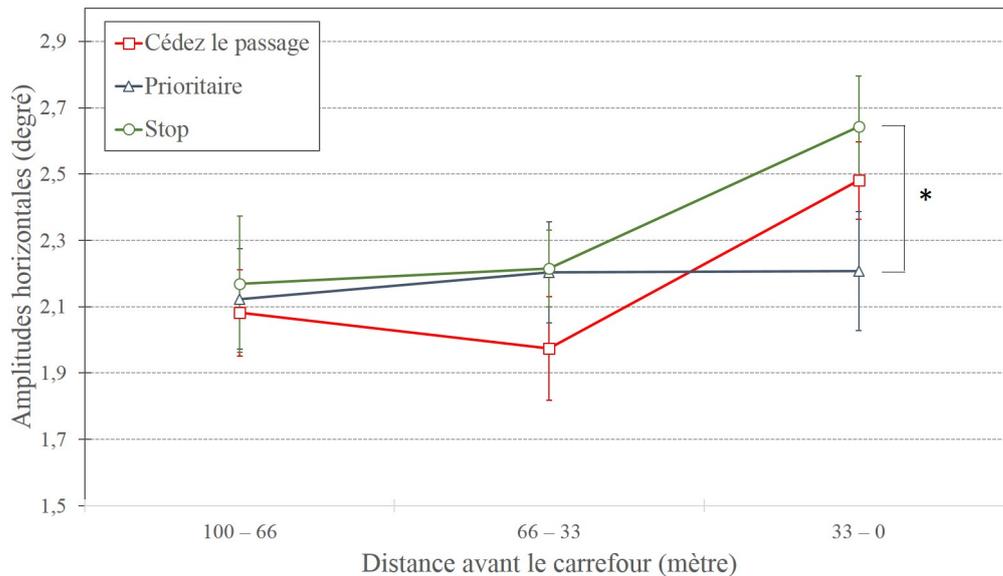


Figure 5.9.: La valeur absolue des amplitudes horizontales en fonction de la position au carrefour et de la règle de priorité (en degré).

L'angle du regard sur l'axe vertical Un effet significatif de la position a été observé pour l'analyse par sujet et par carrefour : $F1(2,26) = 18.78$, $MSE = 0.42$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.591$; $F2(2,32) = 11.91$, $MSE = 0.33$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.427$. Aucun effet n'a été observé pour la règle de priorité, ni pour l'analyse par sujet, ni pour celle par carrefour : $F1 < 1$, ns ; $F2 < 1$, ns. Un effet d'interaction a été observé pour les deux analyses : $F1(4,52) = 3.06$, $MSE = 0.56$, $p = 0.024$, $\eta^2 = 0.191$; $F2(4,32) = 3.12$, $MSE = 0.33$, $p = 0.028$, $\eta^2 = 0.281$.

Les angles du regard sur l'axe vertical ne varient pas en fonction de la règle de priorité quelque soit la position (100 - 66, CP vs Prioritaire : $p = 0.993$, CP vs Stop : $p = 1$; 66 - 33, CP vs Prioritaire : $p = 0.433$, CP vs Stop : $p = 0.999$; 33 - 0, Stop vs CP : $p = 0.978$, Stop vs Prioritaire : $p = 0.955$). Ils varient cependant pour une même règle de priorité en fonction de la position. Ainsi les angles du regard sur l'axe vertical diminuent entre la position 100 - 66 et 33 - 0 mètres pour les conditions CP ($p = 0.002$; à 100 - 66 mètres, $M = 1.39$, $ET = 1.19$; à 33 - 0 mètres, $M = 0.18$,

ET = 1.45) et Stop ($p = 0.027$; à 100 - 66 mètres, $M = 1.45$, $ET = 1.24$; à 33 - 0 mètres, $M = 0.47$, $ET = 1.67$). Ils n'évoluent pas pour la condition Prioritaire ($p = 0.955$; à 100 - 66 mètres, $M = 1.14$, $ET = 1.32$; à 33 - 0 mètres, $M = 0.81$, $ET = 1.53$).

Le trafic attendu

Deux ANOVAs $2 \times 3 \times 2$ ont été conduites sur les angles du regard et les amplitudes horizontales, avec une analyse par sujet et par carrefour pour chacune. Les facteurs d'intérêt étaient la règle de priorité (CP et Stop), la position (les trois portions), et le trafic attendu (Faible et Élevé). Les moyennes et les écart-types pour chacune des conditions de ces deux mesures sont présentés dans la Table 5.4.

L'angle du regard Concernant les effets principaux, seul un effet significatif a été observé pour la position, et ceci pour l'analyse par sujet et par carrefour : la règle de priorité, $F1 > 1$, ns, $F2 > 1$, ns ; la position, $F1(2,26) = 16.13$, $MSE = 7.89$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.554$, $F2(2,16) = 6.35$, $MSE = 3.81$, $p = 0.009$, $\eta^2 = 0.443$; le trafic, $F1 < 1$, ns, $F2 < 1$, ns (voir Figure 5.10).

Aucun effet d'interaction significatif n'a été observé, ni pour l'analyse par sujet, ni pour celle par carrefour : règle de priorité \times position, $F1 < 1$, ns, $F2 < 1$, ns ; règle de priorité \times trafic, $F1(1,13) = 3.84$, $MSE = 9.42$, $p = 0.072$, $F2 > 1$, ns ; trafic \times position, $F1(2,26) = 3.14$, $MSE = 5.97$, $p = 0.060$, $F2 > 1$, ns.

Un effet de triple interaction significatif a été observé entre la règle de priorité, la position et le trafic pour l'analyse par sujet uniquement, $F1(2,26) = 12.92$, $MSE = 3.30$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.498$, $F2 > 1$, ns.

L'analyse par contrastes planifiés n'indique aucune différence significative entre les conditions de trafic attendu Faible et Élevé en CP, pour les positions 100-66 et 33-0 mètres (100-66 : $p = 0.804$; 33-0 : $p = 0.409$). Une différence entre Faible et Élevé en CP a été observé pour la position 66-33 mètres ($p = 0.005$), avec des angles du regard plus grands dans la condition Faible que dans la condition Élevé. En Stop, aucune différence significative entre Peu et Beaucoup de trafic n'a été observé pour chacune des trois positions (100-66 : $p = 0.087$; 66-33 : $p = 0.173$; 33-0 : $p = 0.416$).

En résumé, nous n'avons pas observé d'effet du trafic attendu en condition Stop, et l'effet observé en CP est dû à une différence entre les conditions Faible et Élevée à la position 66 - 33 mètres.

L'amplitude horizontale du regard Les trois effets principaux ont été observés comme étant significatifs pour l'analyse par sujet, alors que seul l'effet de la position est significatif pour l'analyse par carrefour : la position, $F1(2,26) = 28.18$, $MSE = 13.86$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.684$, $F2(2,16) = 33.01$, $MSE = 2.39$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.805$; la règle de priorité, $F1(1,13) = 6.11$, $MSE = 19.01$, $p = 0.028$, $\eta^2 = 0.320$, $F2 < 1$, ns ; le trafic, $F1(1,13) = 12.46$, $MSE = 20.57$, $p = 0.004$, $\eta^2 = 0.489$, $F2 > 1$, ns.

Aucune interaction significative n'a été observée, que ce soit pour l'analyse par sujet ou par carrefour : règle de priorité \times position, $F1 < 1$, ns, $F2 < 1$, ns ; règle

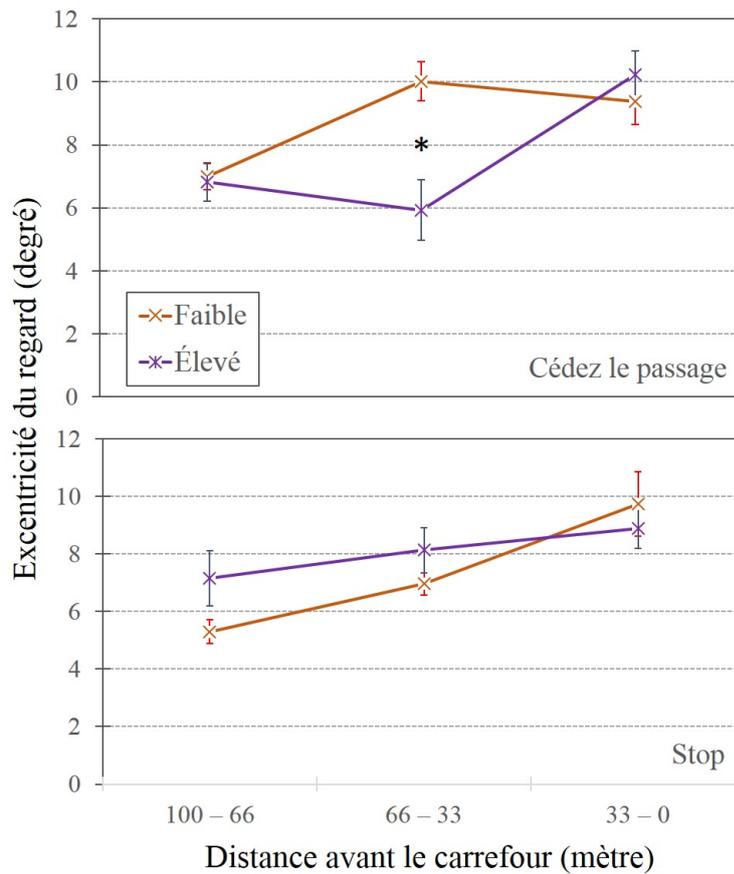


Figure 5.10.: La valeur absolue des angles du regard pour les carrefours en Cédés le passage et en Stop, en fonction de la position au carrefour et du trafic attendu, Faible ou Élevé (en degré).

de priorité \times trafic, $F1 > 1$, ns, $F2 < 1$, ns ; trafic \times position, $F1 < 1$, ns, $F2 < 1$, ns ; règle de priorité \times position \times trafic, $F1 < 1$, ns, $F2 < 1$, ns.

La navigation

Une ANOVA 3×3 complémentaire a été conduite uniquement pour les carrefours CP sur les angles du regard, sur l'excentricité du regard. Les facteurs d'intérêt étaient la position (les trois portions de route) et la navigation, les carrefours étant répartis en trois groupes de niveau de difficulté concernant la sous-tâche de navigation : Facile, Neutre et Difficile (voir Figure 5.11). Seule une analyse par sujet a été conduite sur ces données, le trop faible nombre de carrefours par condition ne permettant pas une analyse par carrefour.

Des effets principaux significatifs de la navigation et de la position ont été observés, ainsi qu'un effet d'interaction : la position, $F1(2,26) = 9.96$, $MSE = 8.07$, $p < .001$,

Règle de priorité	Position	Trafic	Angle du regard	Ampli.
Cédez le passage	100-66 m	Faible	7.00 (1.62)	20.37 (5.82)
		Élevé	6.82 (2.25)	21.68 (5.43)
	66-33 m	Faible	10.02 (2.36)	18.63 (6.09)
		Élevé	5.93 (3.58)	21.27 (6.58)
	33-0 m	Faible	9.38 (2.78)	24.07 (4.98)
		Élevé	10.24 (2.74)	26.00 (4.74)
Stop	100-66 m	Faible	5.30 (1.57)	20.10 (8.88)
		Élevé	7.14 (3.59)	23.36 (9.32)
	66-33 m	Faible	6.96 (1.46)	20.60 (4.13)
		Élevé	8.13 (2.96)	24.49 (6.44)
	33-0 m	Faible	9.74 (4.18)	25.83 (6.71)
		Élevé	8.87 (2.52)	27.63 (5.35)

Table 5.4.: Les valeurs moyennes en intra-groupe, et leur écart-type entre parenthèses (tout deux exprimés en degré), pour chacune les mesures d'angle du regard et d'amplitude horizontale (Ampli.), en fonction des conditions de règle de priorité, de position et de trafic attendu.

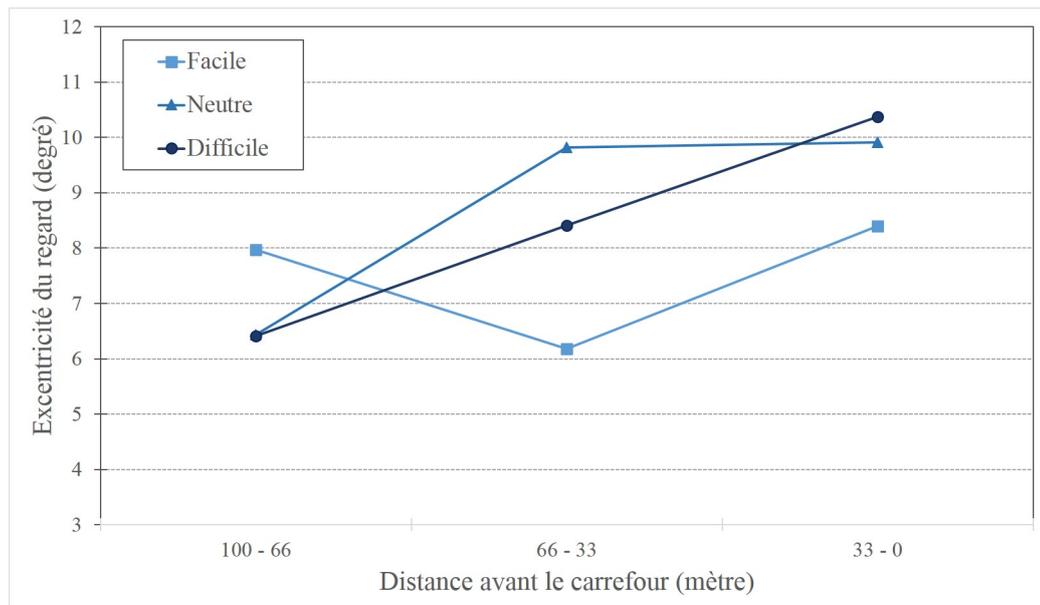


Figure 5.11.: La valeur absolue des angles du regard en fonction de la difficulté de la sous-tâche de navigation (Facile, Neutre et Difficile) et de la position au carrefour, pour les carrefours en Cédez le passage (degré).

$\eta^2 = 0.434$; la navigation, $F1(2,26) = 5.16$, $MSE = 4.28$, $p = 0.013$, $\eta^2 = 0.284$; position \times navigation, $F1(4,52) = 7.54$, $MSE = 3.70$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.367$.

Pour la position 100 - 66 mètres avant l'entrée du carrefour, les angles du regard étaient plus importants dans la condition de navigation Facile ($M = 7.85$, $ET = 1.46$) en comparaison à la condition Neutre ($p = 0.024$, $M = 6.44$, $ET = 1.80$), mais pas différente de la condition Difficile ($p = 0.086$, $M = 6.47$, $ET = 2.36$), sans différence entre les conditions Neutre et Difficile ($p = 0.969$).

Pour la position 66 - 33 mètres, les angles du regard étaient moins importants dans la condition de navigation Facile ($M = 5.96$, $ET = 1.90$), en comparaison des deux autres conditions (Neutre, $p < .001$, $M = 9.77$, $ET = 2.52$; Difficile, $p = 0.014$, $M = 8.56$, $ET = 3.22$), sans différence entre les conditions Neutre et Difficile ($p = 0.156$).

Pour la position 33 - 0 mètres, les angles du regard étaient également moins importants dans la condition de navigation Facile ($M = 8.46$, $ET = 2.22$), en comparaison des deux autres conditions (Neutre, $p = 0.018$, $M = 10.24$, $ET = 3.67$; Difficile, $p = 0.007$, $M = 10.34$, $ET = 2.16$), sans différence entre les conditions Neutre et Difficile ($p = 0.920$).

5.3. Synthèse des résultats

Les données analysées correspondaient principalement à trois types de mesures : l'angle de la tête, qui décrivait l'excentricité de l'axe de la tête dans le référentiel de la voiture, l'angle du regard, qui permettait d'avoir la même information mais pour l'axe du regard, et les amplitudes horizontales, qui permettait d'estimer l'exploration visuelle.

Le premier facteur d'intérêt étudié était la règle de priorité au niveau des carrefours. De manière générale, il ressort que l'excentricité de la position de la tête et du regard, ainsi que l'agitation du regard, sont en moyenne, au début de l'approche du carrefour (100 - 66 mètres), identiques dans les trois conditions de règle de priorité. Puis, en s'approchant du carrefour, ces trois variables dépendantes (le comportement général d'exploration) semblent augmenter dans les conditions CP et Stop, sans qu'une différence apparaisse entre ces deux conditions, tandis qu'elles n'évoluent pas dans la condition Prioritaire.

Le deuxième facteur d'intérêt était la position au carrefour, qui permettait de rendre compte de l'aspect dynamique. Il semblerait que l'effet de ce facteur soit le plus robuste, puisqu'un effet significatif ressortait de manière quasi-systématique dans toutes les analyses. L'angle de la tête et les amplitudes horizontales augmentaient en CP et en Stop entre les positions 66-33 et 33-0 mètres, de même que l'angle du regard (uniquement en Stop). En CP, l'angle du regard augmentait de manière continue durant toute l'approche du carrefour. Aucune de ces mesures n'évoluait durant l'approche de carrefour pour la condition Prioritaire.

Le trafic a également été ajouté *a posteriori* comme facteur d'intérêt. Les seules différences observées étaient des positions du regard plus excentrées avec un trafic attendu Faible qu'avec un trafic Élevé pour les carrefours en CP, et ceci entre 66 et 33 mètres, et une amplitude horizontale en général plus importante avec un trafic Élevé qu'avec un trafic Faible, et ceci majoritairement lors des carrefours en Stop.

La navigation a également été ajoutée *a posteriori* comme facteur d'intérêt, uniquement pour les carrefour CP. La condition Facile semble se distinguer des conditions Neutre et Difficile, avec des positions de regard plus excentrées au début de l'approche de carrefour, puis moins excentrées que les deux autres conditions de navigation entre 66 et 0 mètres.

Discussion générale et perspectives

6.1. Synthèse de la démarche

L'objectif de ce travail de thèse était d'étudier l'allocation de l'attention visuelle dans une situation dynamique multi-tâche. La situation choisie était une approche de carrefour en conduite automobile. Les carrefours étaient en croix et la tâche des participants était de les traverser. Durant cette approche, deux sous-tâches étaient considérées : une sous-tâche tactique de gestion des interactions avec les autres usagers et une sous-tâche opérationnelle de contrôle du véhicule.

La première partie de la problématique se fondait sur le modèle théorique des attentes et de la valeur de l'information (*Expectancy - Value*) qui stipule que ces deux paramètres top-down permettent d'expliquer la distribution de l'attention visuelle (Wickens et al., 2001, 2003).

Nous avons voulu étudier comment ces deux facteurs interagissaient et se répercutaient sur l'allocation de l'attention visuelle. Pour cela, des facteurs intermédiaires ont été choisis afin de moduler les attentes liées à une information et la valeur de celle-ci, et ceci pour les informations pertinentes à une sous-tâche tactique de gestion des interactions. Nous avons considéré que les informations nécessaires à cette sous-tâche se situaient sur les branches latérales des carrefours, car contenant les autres usagers. Les informations nécessaires à la sous-tâche opérationnelle de contrôle du véhicule se situaient sur la voie empruntée par le conducteur, donc face à celui-ci. La valeur des informations liées à la sous-tâche tactique a été manipulée par la règle de priorité au carrefour : Cédez le Passage (CP), Stop ou Prioritaire. Les attentes ont été manipulées par la densité de trafic sur les voies latérales croisées au niveau du carrefour.

Principales prédictions pour la première partie de la problématique :

- Stratégie optimale d'exploration : Temps de regard dans les AOIs Voies Latérales (VL) + Chaussée (C) = 100% des temps de regard ;
- Temps de regard dans l'AOI Voies Latérales :
 - Cédez le Passage > Prioritaire > Stop ;
 - ↑ avec la densité de trafic.

Le cadre proposé par le modèle de Wickens a également permis de construire un modèle quantitatif de la répartition des regards en fonction de la pertinence d'une information pour une sous-tâche donnée.

Après s'être intéressés à la distinction de ces deux-sous-tâches sur l'allocation de l'attention, et à leur proportion en fonction des attentes et de la valeur des informations pertinentes pour l'une d'elles, nous avons voulu connaître les différences et l'évolution des processus au sein d'une même sous-tâche. La sous-tâche choisie était de même une sous-tâche tactique de gestion des interactions, et plus spécifiquement, la sous-tâche de prise de décision.

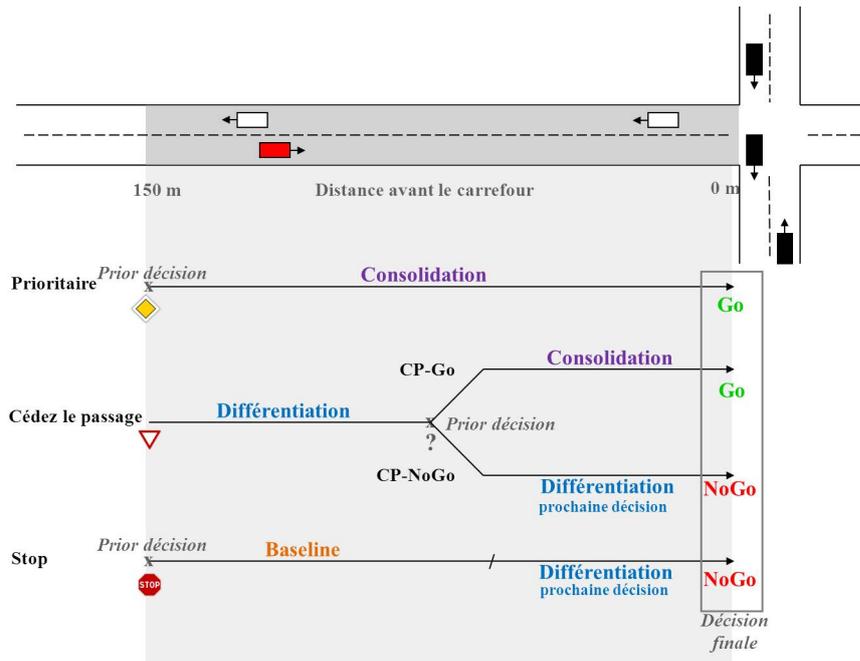


Figure 6.1.: Une approche de carrefour et les prédictions en terme de processus cognitifs. En haut : une vue aérienne des 150 derniers mètres avant l'entrée du carrefour (correspondant à la portion analysée lors de l'étude en simulateur de conduite) ; le véhicule du participant est en rouge, les véhicules liés au trafic (modulés pas le facteur de densité de trafic) sont en noir, et les véhicules contrôles, permettant une plus grande immersion, sont en blanc. En bas : les prédictions concernant la pré-décision et la décision finale, et les processus associés en fonction des trois conditions de règle de priorité et du comportement d'arrêt (Go ou NoGo).

Cette seconde partie de la problématique se fondait sur le modèle Différentiation / Consolidation de la prise de décision (Svenson, 1992). Un processus de Différentiation (D) permet de recueillir des informations afin de prendre une pré-décision, suivi par un processus de Consolidation (C) permettant de valider ou non cette pré-décision. La décision était le choix de s'arrêter ou non au carrefour. Le même facteur de règle

de priorité que précédemment a permis de moduler cette décision (voir Figure 6.1). Les prédictions étaient émises en terme d'intensité d'exploration visuelle, avec d'un côté une exploration plus intense lors d'un processus D que lors d'un processus C, et lors d'un processus C que lors de la Baseline (B), et d'un autre côté une exploration plus intense se traduisant par des amplitudes de saccade plus grandes et des durées de fixation plus petites (voir Figure ??).

Afin d'explorer ces différents points, deux études ont été conduites, une sur simulateur de conduite, l'autre en situation réelle de conduite. Ces deux études mettaient en scène des carrefours, et permettaient de tester les mêmes hypothèses.

L'étude en simulateur de conduite avait néanmoins pour objectif de tester plus directement les prédictions émises, car elle offre un cadre expérimental plus contrôlé, et un choix de mesures permettant une interprétation des résultats plus directe. A l'inverse, l'étude en situation réelle de conduite avait pour objectif une plus grande valeur écologique, et permettait de faire un pas de plus dans les interprétations, mais comportait plus de biais expérimentaux et des mesures plus indirectes.

En accord avec cette logique expérimentale, les résultats seront discutés dans un premier temps par rapport à la première partie de la problématique, puis par rapport à la seconde partie. Chaque point abordé dans chacune de ces deux parties sera discuté d'abord à partir des résultats observés en simulateur de conduite, puis de ceux obtenus en situation réelle de conduite.

Pour finir, nous discuterons des perspectives de ce travail de thèse, en terme de généralisation à de nouvelles situations et processus cognitifs, et d'applications possible notamment en sécurité routière, puis en terme de modèles de l'allocation de l'attention visuelle.

6.2. Discussion des résultats en lien avec le modèle *Expectancy / Value* [Q1]

6.2.1. Les ressources attentionnelles

Étude en simulateur de conduite Les AOI Chaussée (C) et Voies Latérales (VL) contiennent les informations visuelles essentielles à la réussite des sous-tâches en jeu, respectivement la sous-tâche de contrôle du véhicule et celle gérant les interactions avec les autres usagers de la route. Il était donc attendu qu'une majorité des regards portent dans ces AOIs. Cependant, le fait que la quasi-totalité des fixations soit répartie entre les deux AOIs pertinentes pour les sous-tâches ($M_{C+VL} = 96.69\%$) est consistant avec une théorie du comportement optimal (Moray, 1986) : selon cette littérature, les utilisateurs formés dans une tâche dynamique avec plusieurs sources d'information à sélectionner ont un modèle interne sur la manière de sélectionner l'information de façon optimale afin de minimiser les risques d'échec ou d'erreur, et de prendre en conséquence l'information dans les différentes AOIs.

Bien que la situation expérimentale utilisée dans cette étude ait été très simplifiée, les demandes attentionnelles ont été jugées par les participants comme suffisamment

importantes de sorte que la quasi-totalité des fixations observées étaient dirigées vers les informations visuelles pertinentes pour la tâche. Cette situation de conduite correspond à la notion de monitoring décrite par Senders (1966) et Moray (1986), et utilisé par Wickens et al. (2003), dans lesquels toutes les ressources de l'attention visuelle d'un opérateur qualifié sont allouées de manière optimale aux AOIs pertinentes pour la tâche. Ainsi, dans cette situation simplifiée d'approche de carrefour, le conducteur est un expert en terme de sélection de l'information, faisant un compromis implicite entre les différentes AOIs afin d'optimiser ses performances à la tâche.

Par contre, durant la portion en ligne droite dans laquelle la sous-tâche de gestion des interactions n'était pas présente, les temps de regard dans l'AOI Autre (A) était proche de 10%. Cela suggère que les conducteurs n'utilisaient pas toutes leurs ressources attentionnelles, l'AOI A n'incluant aucune information pertinente pour la tâche de conduite. Le taux observé de temps de regard pour l'AOI C, autour de 80%, peut donc être considéré comme optimal pour la sous-tâche opérationnelle dans cette situation spécifique. Ainsi, l'allocation des ressources dans l'AOI VL dans la condition Stop n'altérerait pas la sous-tâche de contrôle du véhicule, le taux de regard dans l'AOI C étant également proche de 80%. Par contre, dans les conditions Cédez le passage et Prioritaire, les demandes de la sous-tâche tactique conduisent à une diminution des temps de regard dans l'AOI C (autour de 60-65%), il est donc envisageable que les performances pour la sous-tâche de contrôle du véhicule en pâtissent légèrement. Le meilleur indicateur serait les oscillations du volant, information également recueillie dans les données, et même si cette question ne nous semblait pas prioritaire, il serait intéressant de tester cette hypothèse dans le futur.

Plus généralement et de manière descriptive, il ressort de l'observation des vidéos que même si l'AOI C était très grande, la grande majorité des regards était à proximité du point de fuite, ce qui est en accord avec la littérature (Donges, 1978; Land & Horwood, 1995; Salvucci & Gray, 2004).

Étude en situation réelle de conduite L'ensemble des analyses portait sur les positions de la tête et du regard par rapport à l'axe horizontal. Cependant, afin de vérifier que ce choix ne conduisait pas à omettre certains effets comme une modulation des angles verticaux en fonction des conditions testées, une analyse descriptive a été conduite. Celle-ci montre que, contrairement aux angles du regard sur l'axe horizontal, ceux sur l'axe vertical étaient très regroupés, ce qui indiquait que très peu de variations étaient survenues. Une analyse statistique complémentaire a été conduite sur les angles du regard selon l'axe vertical en fonction de la règle de priorité et de la position au carrefour. La seule différence observée résidait dans une diminution des angles du regard pour les conditions CP et Stop durant l'approche de carrefour.

Cet effet pourrait être dû à de plus nombreuses fixations sur la chaussée devant le véhicule, le point de proximité ou *near point* selon Salvucci & Gray (2004), permettant de faciliter la tâche de contrôle du véhicule tandis que les conducteurs étaient sur le point de s'arrêter (puisque'ils se sont tous arrêtés aux carrefours en CP et en Stop).

Par ailleurs, le fait de n'avoir observé aucun autre effet des facteurs étudiés par rapport à l'axe vertical semble cohérent avec la discussion précédente sur le fait que la plupart des fixations répondaient à une stratégie optimale, ou tout du moins restaient proches de l'axe horizontal contenant les principales informations pertinentes aux sous-tâches tactique de gestion des interactions (*i.e.* les autres usagers) et opérationnelle de maintien de la trajectoire (*i.e.* le point de fuite).

6.2.2. La valeur de l'information liée à la règle de priorité

Étude en simulateur de conduite Les temps de regard dans l'AOI VL étaient moins importants pour les conditions Stop, comparé aux autres conditions de règle de priorité. Ceci est cohérent avec le fait que l'AOI VL est moins pertinente dans la condition Stop, puisque la sous-tâche tactique peut être momentanément reportée afin d'allouer plus d'attention à la sous-tâche opérationnelle (ce qui semble être confirmé par un niveau de 80% dans l'AOI C). En effet, anticiper les collisions potentielles avec les autres usagers n'est pas immédiatement nécessaire, les conducteurs ayant la possibilité d'anticiper le redémarrage après s'être arrêté.

Concernant les conditions CP et Prioritaire, les temps de regard et les transitions ont permis de mettre en évidence des effets complémentaires : alors que l'analyse sur les temps de regard ne présente pas de différence entre les conditions Cédez le passage et Prioritaire une fois les densités de trafic Nulles¹ retirées de l'analyse, les transitions en montrent une, avec plus de transitions vers une nouvelle AOI dans la condition Prioritaire que dans la condition Cédez le Passage. Ainsi, si les conducteurs allouent une proportion de regard équivalente dans l'AOI VL pour les conditions Cédez le passage et Prioritaire, leurs patterns d'allocation des regards sont différents, avec un balayage plus actif dans la condition Prioritaire que dans la condition Cédez le passage.

Étude en situation réelle de conduite L'excentricité de la position de la tête et du regard étaient plus importantes dans les conditions CP et Stop que dans la condition Prioritaire, sans différence entre les deux premières conditions. L'interprétation serait donc la suivante : l'information contenue à gauche et à droite de la route empruntée, donc les voies latérales au carrefour, est tout autant pertinente en condition CP qu'en condition Stop, et l'est moins en condition Prioritaire. La sous-tâche tactique serait donc plus importante lors d'un CP que sur une voie prioritaire, conformément aux prédictions. Cependant, elle est tout aussi importante lors d'un Stop que lors d'un CP, alors que les prédictions, corroborées par les résultats observés en simulateur de conduite, prévoient que cette sous-tâche serait la moins présente dans la condition Stop.

Cela signifierait que la valeur de l'information pertinente pour la sous-tâche tactique est plus importante dans la condition Stop que ce qui avait été prédit. Le

1. Les temps de regard dans l'AOI C y étaient plus importants que pour les autres modalités de Prioritaire.

modèle fondé sur les attentes et la valeur de l'information (Wickens et al., 2003) ne nous permet pas de proposer une explication à cette observation. Néanmoins, une piste d'explication réside dans la notion d'anticipation développée avec le modèle Diff/Cons (Svenson, 1992), ce qui sera discuté ultérieurement.

6.2.3. Les attentes liées au trafic

Étude en simulateur de conduite Comme l'ont fait Werneke & Vollrath (2012) et comme le suggèrent Horrey et al. (2006), nous avons fait varier la densité de trafic afin de moduler le débit de l'information (*Bandwidth*), ce qui devait permettre de manipuler la variable Attente associé à l'AOI VL dans le modèle SEEV (*Saliency Effort Expectancy Value*). Cependant, les résultats obtenus ne mettent en évidence qu'un impact faible de la densité du trafic que ce soit sur les temps de regard dans l'AOI VL, ou sur les patterns de transition recueillis durant l'approche de carrefour. Afin de comprendre ce résultat, nous allons discuter de l'information visuelle présente dans cette AOI VL en fonction des conditions de règle de priorité.

Dans la condition Cédez le passage, les conducteurs ont besoin de l'information présente dans l'AOI VL afin d'estimer les écarts entre les véhicules (Caird & Hancock, 1994; Hancock & Manser, 1997; Manser & Hancock, 1996; McLeod & Ross, 1983). Et c'est peut-être là que réside l'explication de pourquoi aucune différence n'a été observé entre les conditions de densité de trafic Intermédiaire et Élevée pour la condition de Cédez le passage : estimer les écarts peut nécessiter la même fréquence de recueil de l'information quelle que soit la densité de trafic. En outre, le design expérimental comprenait trois niveaux de trafic, mais les participants n'étaient pas informés de cette classification et ne pouvait pas tenir pour acquis que la densité de trafic ne pouvait changer. En effet, en situation réelle, l'absence de trafic a un moment donné ne signifie pas qu'une voiture ne va pas arriver, de sorte que les contrôles visuels étaient également effectués dans cette condition, à l'instar d'un trafic naturel.

Dans la condition Stop, les conducteurs doivent s'arrêter au carrefour, indépendamment du trafic. La sous-tâche tactique associée à la gestion des interactions avec les autres usagers n'était donc quasiment pas active, mis à part vers la fin, lorsque le conducteur anticipe quand redémarrer. Pour cette anticipation, les informations visuelles pertinentes étaient associées aux écarts entre les véhicules, de même que dans la condition de Cédez le passage.

Dans la condition Prioritaire avec du trafic (conditions de densité Intermédiaire et Élevée), les véhicules simulés respectaient les règles de priorité au carrefour, et donc s'arrêtaient au carrefour en attendant que le participant passe. Cela marque une différence avec les deux autres conditions de règle de priorité, les informations pertinentes pour les participants n'étant pas liées aux distances inter-véhiculaires : nous pouvons supposer qu'ils vérifiaient que les autres usagers s'arrêtaient et qu'une fois à l'arrêt, ils ne redémarreraient pas. L'AOI contenant ces informations est l'AOI VL, mais le débit de ces informations ne dépend pas de la densité de trafic. Dans les conditions de densité de trafic Intermédiaire et Élevé, un véhicule était à l'arrêt au carrefour de chaque côté de la voie au moment de l'approche du carrefour, seul le

nombre de véhicules arrêté derrière ces véhicules variait avec la densité de trafic, mais nous pouvons supposer que les fixations dans l'AOI VL portaient principalement sur la voiture de tête afin d'anticiper un redémarrage éventuel. Cette interprétation est en accord avec les données observées pour les matrices de transition qui montrent des transitions entre les AOI C et VL plus fréquentes dans la condition Prioritaire que dans les conditions Stop et Cédez le passage. Pour la condition Prioritaire avec une densité de trafic Nulle, les informations pertinentes correspondaient à l'apparition potentielle d'un nouveau véhicule avec des patterns de recherche visuelle qui pourraient être similaire à ceux observés dans les conditions Cédez le passage.

Ces remarques permettent de moduler les hypothèses implicites qui avaient conduit au design expérimental, notamment le fait que le débit (*bandwidth*) des informations pertinentes présentes dans l'AOI VL devait augmenter avec la densité de trafic. Le lien entre la densité de trafic et le débit de l'information semble être plus complexe et des variables intermédiaires apparaissent (la présence ou non de trafic, les gaps, l'intention de redémarrer), qui ne sont pas constantes par rapport à la règle de priorité. Ce qui ressort plus généralement de cette discussion est le fait que le débit qui pourrait moduler les attentes liées à la sous-tâche tactique (ici de gestion des interactions lors de l'approche de carrefour) pourrait être en partie dépendant non pas de la présence réelle de trafic et de sa densité, mais plutôt de la densité de trafic attendu modulée par des indices extérieurs au trafic lui-même tel que l'aménagement routier (*e.g.* en s'apprêtant à croiser une petite route ou une route nationale, les attentes liées au trafic ne sont pas les mêmes). En effet, nous avons vu dans le Chapitre 2 que trois facteurs pouvaient influencer l'attention visuelle en conduite : 1) l'aménagement du carrefour ; 2) les règles de priorité ; 3) le comportement actuel et à venir des autres usagers de la route (Björklund & Åberg, 2005; Helmers & Åberg, 1978). Nous avons écarté le premier facteur en lien avec l'aménagement, ne pouvant distinguer expérimentalement son impact top-down de bottom-up. Il semblerait donc que ce facteur lié à l'aménagement influence également indirectement les attentes associées à la densité de trafic. Or, lors de cette étude en simulateur, l'aménagement était rigoureusement le même dans toutes conditions dans un souci de contrôle, et la route croisée au niveau des carrefours correspondait plus à une route importante, du fait de sa taille et de la vitesse des véhicules simulés. En cela, les attentes liées au trafic pouvaient être élevées dans toutes les conditions de trafic, ce qui expliquerait la faible modulation des attentes par la présence réelle ou non de trafic.

Étude en situation réelle de conduite Dans l'étude en situation réelle, la condition de trafic avait été annotée *a posteriori* en deux modalités de trafic attendu Faible et Élevé. Ces modalités ne correspondaient pas au trafic réellement présent pour chaque passage de carrefour comme lors de l'étude en simulateur de conduite, mais à une fréquentation moyenne. Cela peut donc être rapproché de la notion de trafic attendu discutée précédemment. En effet, en situation réelle, l'hypothèse qu'un trafic en moyenne élevé corresponde à un aménagement particulier, et donc à des indices extérieurs induisant des attentes élevées, peut être posée.

Les angles du regard étaient plus excentrés pour les carrefours CP à 66-33 mètres lorsque le trafic attendu était Faible, comparé à un trafic attendu Élevé. Il semble donc que les attentes liées au trafic ont un effet sur les processus top-down de l'attention visuelle, et donc sur la prise d'information. Cependant, cet effet est inverse de celui prédit par un modèle de type SEEV, puisque l'hypothèse serait que plus le débit du trafic (ou du trafic attendu) augmente, plus l'information était remise à jour, et plus la prise d'informations associée était pertinente.

La sous-tâche associée à cette prise d'information était la sous-tâche tactique de gestion des interactions au niveau du carrefour. Or, lors de cette étude, l'ensemble des participants se sont systématiquement arrêtés à chacun des carrefours CP. De ce constat peut être déduit que la sous-tâche tactique était relativement difficile dans le sens où la décision de ne pas s'arrêter était difficile à prendre. Par ailleurs, cette décision était d'autant plus difficile à prendre que le trafic était faible, puisque plus il y a du trafic et moins la décision de ne pas s'arrêter est envisageable. De tout cela, nous pouvons déduire que la décision de s'arrêter était très rapidement prise par les participants, et ceci d'autant plus que le trafic attendu était élevé. Par conséquent, alors que l'hypothèse était que plus le trafic attendu était élevé et plus il y aurait de regards excentrés, il se pourrait que le trafic élevé induise plus rapidement une décision d'arrêt, et que la sous-tâche tactique était désinvestie en faveur de la sous-tâche opérationnelle associée aux informations de maintien de la trajectoire. Cette explication est cohérente avec nos observations, puisque la différence entre un trafic Faible et Élevé semble être dû à, d'une part, la diminution de l'excentricité des regards dans la situation de trafic Élevé par rapport aux valeurs précédentes (position 100-66 mètres), pouvant être interprétée comme une focalisation des regards sur les informations pertinentes pour la sous-tâche opérationnelle ; et d'autre part, l'augmentation de l'excentricité des regards dans la situation de trafic Faible par rapport à ces mêmes moyennes, pouvant être interprétée comme une augmentation de la prise d'informations pertinentes pour la sous-tâche tactique.

Ainsi, cette discussion permet de moduler celle sur les ressources attentionnelles. En effet, nous avons vu que les comportements oculomoteurs observés étaient proches d'une stratégie optimale. Cependant, si les conducteurs sont amenés à modifier la règle de priorité des sous-tâches, en laissant par exemple de côté la tâche tactique jugée trop difficile en faveur de la sous-tâche opérationnelle, cela modifie le rapport entre les variables de Valeur et d'Attente. Les prédictions ne dépendraient donc plus uniquement de la situation et de la tâche, comme dans une tâche de monitoring, mais également du jugement, de l'évaluation, du conducteur, et donc de la pré-décision, ce qui ne peut être pris en compte par un modèle tel que celui que nous avons construit à partir du modèle *Expectancy - Value* de Wickens et al. (2003).

6.2.4. Les composantes bottom-up : la saillance et l'effort

Étude en simulateur de conduite Même si les composantes top-down de l'attention visuelle semblent dominantes, la prise en compte des composantes bottom-up afin de rendre compte de l'ensemble des conditions en situation écologique semble

nécessaire, de même que pour comprendre les comportements oculaires dans leur ensemble.

De la discussion précédente concernant les attentes liées au trafic lors de l'étude sur simulateur, il ressort que lorsqu'il y a du trafic, les informations pertinentes à la sous-tâche tactique ne sont pas localisées de la même manière dans chacune des conditions de règle de priorité. Ces informations sont toujours situées dans l'AOI VL, mais elles peuvent être très proches de la route empruntée par le participant dans la condition Prioritaire (lorsque le conducteur vérifie le comportement des autres usagers, arrêtés au carrefour), ou loin de celui-ci dans les deux autres conditions (lorsque le conducteur cherche à estimer les gaps).

Nos hypothèses étaient que les attentes liées au trafic durant l'approche de carrefour étaient plus importantes dans la condition CP que dans la condition Prioritaire. Cependant, il est possible de postuler que les changements d'orientation du regard entre les branches du carrefour (AOI VL), pour chercher l'information en lien avec le trafic, et la route devant (AOI C) soient moins coûteux en terme d'effort dans la condition Prioritaire que dans la condition CP. En effet, dans la condition Prioritaire, le conducteur aurait principalement à vérifier le comportement des véhicules à l'arrêt à l'entrée du carrefour, donc dans une zone moins éloignée de l'AOI C que dans la condition CP. Ainsi, le compromis entre les attentes liées au trafic *a priori* (plus faible en Prioritaire qu'en CP) et l'effort nécessaire au recueil d'information (également plus faible en Prioritaire), pourrait expliquer que les temps de regard soient identiques dans les conditions Prioritaire et CP lorsqu'il y a du trafic. Cela serait également en adéquation avec le fait que lorsqu'il n'y a pas de trafic dans la condition Prioritaire, donc quand les informations susceptibles d'être pertinentes pour la sous-tâche tactique sont non pas à l'entrée du carrefour, mais en amont à gauche et à droite des voies latérales, les temps de regards dans l'AOI correspondante sont moins importants que dans les conditions précédentes de CP et de Prioritaire avec du trafic. De même, les temps de regard dans l'AOI VL sont plus importants dans les conditions sans trafic pour les CP que pour les Prioritaire, ce qui peut s'expliquer par un effort plus important en Prioritaire sans trafic (effort alors comparable à celui en CP) qu'en Prioritaire avec du trafic. Ainsi, dans la condition prioritaire sans trafic, l'hypothèse peut être avancée que les attentes sont de même moins importantes qu'en CP, comme en Prioritaire avec du trafic, mais l'effort étant plus important que dans ces dernières, les conducteurs allouent moins d'attention à ces AOIs excentrées que dans les conditions CP ou Prioritaire avec du trafic.

Par ailleurs, il se peut qu'un effet de la saillance visuelle bottom-up liée à la présence des véhicules simulés explique en partie la différence entre les conditions de trafic pour les carrefours Prioritaires. En effet, les temps de regard étaient plus petits dans l'AOI VL lors qu'il n'y avait aucun trafic comparé aux deux conditions avec du trafic, ce qui pourrait être lié à une saillance plus élevée dans cette AOI lorsqu'il y a du trafic. Néanmoins, cette différence n'a pas été observée dans les conditions CP et Stop, suggérant que cet effet de la saillance serait marginal ou occasionnel.

Étude en situation réelle de conduite En comparant les situations avec un trafic attendu Faible ou Élevé pour les conditions CP et Stop en situation réelle de conduite, un effet a été observé sur les amplitudes horizontales, avec une activité oculaire plus importante lorsque le trafic attendu était élevé.

Cet effet pourrait être cohérent avec les prédictions concernant les attentes : plus le trafic attendu est important et plus le conducteur recueille de l'information visuelle associée au trafic. Cependant, nous ne pouvons conclure en faveur de cette interprétation pour deux raisons : *i*) l'absence d'interaction entre les facteurs de règle de priorité et de position ne permet pas d'explorer davantage cet effet ; *ii*) les amplitudes horizontales ne peuvent pas être associées aussi directement à une prise d'information comme peut l'être l'angle du regard, angle du regard qui n'est pas cohérent avec nos prédictions (voire qui semblait indiquer l'inverse dans la condition CP à 66 - 33 mètres, avec une excentricité des angles de la tête plus importants dans la condition Faible que dans la condition Élevée).

Il est également possible d'envisager que cet effet soit uniquement dû à un effet de saillance. En effet, même si les modalités de trafic construites *a posteriori* regroupent les carrefours en fonction de la présence en moyenne de trafic et non pas du trafic réel à chacun des passages, il n'en reste pas moins qu'en moyenne il y avait plus de véhicules sur les voies latérales du carrefour au moment de l'approche de celui-ci, donc une saillance plus importante en moyenne, ce qui pourrait suffire à expliquer la différence observée.

Les résultats observés peuvent faire écho à la discussion sur l'effort par rapport aux résultats observés en simulateur de conduite. En effet, dans la condition Prioritaire en situation réelle, le nombre moyen de véhicules au moment de l'approche des carrefours était très faible, avec la majorité du temps aucun véhicule. La majorité des essais de la condition Prioritaire en situation réelle est donc à rapprocher de la condition Prioritaire sans trafic de l'étude en simulateur de conduite. En réel, nous avons observé plus de regards excentrés et plus d'agitation dans la condition CP que dans la condition Prioritaire. Or cela peut peut-être notamment s'expliquer de la même manière que le plus grand nombre de regards dans l'AOI VL en CP qu'en Prioritaire sans trafic dans l'étude en simulateur. Ainsi, les informations étant trop excentrées en Prioritaire, puisque qu'aucun véhicule n'était à l'arrêt au carrefour dans la plupart des essais, l'effort était tout aussi important qu'en CP, mais avec une valeur associée au facteur Attente moins importante qu'en CP, l'information associée étant moins pertinente pour la sous-tâche tactique.

6.3. Discussion des résultats en lien avec le modèle Diff / Cons [Q2]

6.3.1. Les processus de la prise de décision

Étude en simulateur de conduite Les 150 mètres d'approche des carrefours ont été séparés en deux sections, Avant et Après la position 60 mètres avant le carrefour,

position à laquelle la pré-décision semblait avoir été prise, *a minima* dans la condition CP-Go, puisque cette position a été déterminée sur la base du premier changement significatif observé pour la pression sur la pédale d'accélération dans cette condition.

Dans la section Avant la pré-décision, les valeurs moyennes des amplitudes de saccade et des durées de fixation montraient que l'exploration visuelle était plus importante dans la condition Cédez le passage que dans la condition Prioritaire, et plus importante dans celle-ci que dans la condition Stop. Ce résultat est cohérent avec nos prédictions. En effet, le fait que l'exploration visuelle soit la plus importante dans la condition CP est consistant avec la présence d'un processus de différenciation (D) qui permet de recueillir des informations en vue de prendre la pré-décision, s'arrêter ou non au carrefour.

De même, le fait que l'exploration visuelle soit la plus faible dans la condition Stop confirme que les processus de prise de décision étaient proches de la Baseline, la pré-décision étant déjà prise en amont du panneau, à 150 mètres avant le carrefour.

A noter que les interprétations, de même que les prédictions, sont exprimées de manière relative entre les différentes conditions, et non pas de manière absolue. La sous-tâche de prise de décision n'était pas la seule sous-tâche présente, il n'était pas concevable de prédire une absence d'exploration visuelle dans une condition. Cependant, la sous-tâche de prise de décision nécessitant des informations en périphérie (sur les voies latérales du carrefour), plus cette sous-tâche était nécessaire, plus ces informations étaient pertinentes, et plus une exploration visuelle importante était attendue. Les prédictions stipulaient que cette sous-tâche serait la moins nécessaire dans la condition Stop, et donc que l'exploration visuelle concernant cette sous-tâche y serait la moins importante, voire nulle².

L'exploration visuelle dans la condition Prioritaire est quantitativement intermédiaire à celles observées dans les deux autres conditions. Cette observation est cohérente avec la présence d'un processus de consolidation (C), processus de vérification de la pré-décision. Cette dernière était également prise avant le début des 150 mètres, puisque imposée par la signalisation, mais la pré-décision de ne pas s'arrêter impliquait des interactions et la possibilité de tout de même s'arrêter en cas de danger, contrairement à la pré-décision de s'arrêter imposée dans la condition Stop.

Dans la section Après, l'exploration visuelle était plus intense dans la condition Stop que dans la condition Prioritaire. Cette inversion des patterns par rapport à la section Avant est congruent avec un changement de processus pour la condition Stop, passant de l'activité de base (B) à D. Cette observation avait été envisagée dans les prédictions, et correspondrait au fait d'anticiper la prochaine décision, quand redémarrer. La présence d'un processus D permettrait alors de recueillir des informations

2. C'est ce que nous avons nommé "activité de base" (*baseline*), et qui a été observé, mais nous ne pouvons pas conclure de ces résultats si une exploration visuelle est présente dans cette condition en lien avec la sous-tâche de prise de décision. En d'autres termes, nous ne pouvons déduire de ces observations si ce niveau d'exploration visuelle associé à l'activité de base, correspond à une absence de processus en lien avec la prise de décision pour cette section Avant, ou à la présence d'un processus C de vérification, comme dans la condition Prioritaire, mais moins nécessaire à la conduite, donc avec une exploration plus faible.

en vue de prendre une nouvelle pré-décision.

Les processus présents dans la condition Prioritaire semblaient quant à eux passer de C à B entre ces deux sections de route. En effet, l'exploration visuelle perd en intensité lors de la section Après jusqu'à atteindre en fin de section des niveaux équivalents à ceux observés dans la condition Stop lors de la section Avant, c'est pourquoi nous parlons à nouveau de processus B. Cette évolution des processus dans cette condition n'avait pas été prédite. Cette observation peut-être interprétée comme le signe que la sous-tâche de prise de décision est finie, donc que la décision finale est prise. Cela impliquerait que les conducteurs au moment où ils arrivent près de l'entrée du carrefour ont accumulé, avec le processus C, suffisamment d'informations allant dans le sens de leur pré-décision - "je peux passer" - donc ont atteint un niveau de confiance suffisant pour prendre leur décision finale de passer sans s'arrêter. En d'autre terme, cela signifierait que cette sous-tâche tactique de prise de décision était finie lors de l'arrivée au carrefour.

Dans la condition CP-NoGo, les patterns oculomoteurs semblent indiquer la présence d'un processus D, à l'instar de la section de route précédente (Avant la pré-décision). De même que dans la condition Stop, cela peut être compris comme indiquant la présence d'un nouveau processus D associé à l'anticipation de la prochaine décision, quand redémarrer. Le fait que l'exploration visuelle semble plus importante que dans la section Avant mettant en jeu le même processus D en CP peut être expliqué par le fait que plus le conducteur est proche de l'entrée du carrefour, et plus il doit déporter son regard vers la gauche ou la droite pour avoir les mêmes informations. Le fait qu'elle soit plus importante ne serait donc pas nécessairement lié à une exploration plus intense, mais simplement à la position plus excentrée des informations par rapport au point de fuite de la route.

A l'inverse, l'exploration visuelle chute drastiquement dans la condition CP-Go, avec un profile similaire à celui de la condition Prioritaire. L'interprétation proposée est donc la même, à savoir le fait que le niveau de confiance dans la pré-décision est suffisant pour ne plus nécessiter de vérification au travers du processus C.

Pour finir, un effet du facteur Position a été trouvé pour les conditions Stop et Prioritaire, alors que nous n'avions pas d'hypothèse *a priori* sur un changement éventuel de processus à 60 mètres avant le carrefour dans ces deux conditions. Aurions-nous pu prévoir que ces changements en terme de processus dans les conditions Stop et Prioritaire se produiraient 60 mètres avant le carrefour, comme dans la condition Cédez le passage ? Il semble qu'à cette position, les informations visuelles étaient suffisantes pour prendre la pré-décision de s'arrêter ou non, ou pour commencer à anticiper la prochaine décision de quand redémarrer. Nous pouvons émettre l'hypothèse que le conducteur, en se basant sur ses connaissances préalables, a pu estimer la meilleure position pour prendre la pré-décision, permettant de démarrer l'action. En effet, après cette position, une décision de s'arrêter pourrait entraîner un freinage inconfortable (trop brusque).

Afin d'examiner cette idée, nous avons considéré un scénario où un conducteur roule à 20.4 m.s^{-2} (soit 73.44 km/h, ce qui correspond à la vitesse moyenne des participants, toutes conditions confondues, pour la portion de route 150 - 135 mètres

avant le carrefour), puis freine à 3.27 m.s^{-2} (10.8 km.h^{-2}), qui est la décélération moyenne observée par [El-Shawarby et al. \(2007\)](#) sur 821 essais. Nous obtenons alors une distance d'arrêt de 63.6 mètres³, ce qui est consistant avec nos observations expérimentales.

D'autres expériences comparant des conducteurs novices et expérimentés dans des situations identiques vont dans le sens de cette hypothèse d'apprentissage ([Land & Tatler, 2009](#)). Cette observation pourrait également contribuer à une meilleure compréhension du lien entre l'apprentissage au quotidien et les comportements associés, tel que les mouvements des yeux.

Étude en situation réelle de conduite La première chose à noter est le fait qu'il n'y a pas de différence entre les trois conditions de règle de priorité au niveau des amplitudes horizontales pour les deux premières sections, 100 - 66 et 66 - 33 mètres, et de même pour la première section au niveau des angles du regard. Cela suggère que les processus cognitifs en lien avec la sous-tâche de prise de décision sont les mêmes dans ces trois conditions au début de l'approche de carrefour. Cela entre en contradiction avec nos prédictions qui prévoyaient avant la pré-décision une activité oculaire plus importante dans la condition CP que dans la condition Prioritaire, et dans la condition Prioritaire que dans la condition Stop, comme cela a été observé lors de l'étude en simulateur de conduite.

Cette absence de différence peut être interprétée de deux manières. D'une part, le bruit visuel était beaucoup plus important en situation réelle, la saillance visuelle de l'environnement n'étant pas contrôlée. Cela aurait pu entraîner des patterns visuels moins distincts les uns des autres. Cela signifierait que les effets observés en simulateur de conduite seraient tout de même présents, mais les différences trop faibles, ou l'effet pas assez robuste, pour pouvoir être observé dans des conditions réelles.

L'autre interprétation serait qu'effectivement les processus en jeu sont les mêmes à ces positions pour toutes les conditions et que la distinction, donc la présence de la sous-tâche de prise de décision, débiterait plus tard durant l'approche de carrefour en situation réelle. Cette hypothèse pourrait être appuyée par le fait que :

- les informations nécessaires à cette sous-tâche sont disponibles plus tard, la visibilité du carrefour n'étant jamais aussi grande qu'en simulateur ;
- les autres tâches en jeu, notamment les sous-tâches opérationnelles, sont plus nombreuses et prennent plus d'importance en situation réelle qu'en simulateur,

3. Soit l'équation suivante du mouvement pour un freinage constant :

$$d = \frac{-V_t^2}{2.a}; \tag{6.1}$$

avec d la distance de freinage, V_t la vitesse à un moment t , ici avant le début du freinage, et a l'accélération. Le calcul effectué est donc le suivant :

$$d = \frac{-20.4^2}{2 \times (-3.27)} = 63.6. \tag{6.2}$$

l'environnement et l'aménagement en simulateur étant largement simplifiés pour mettre l'accent sur la sous-tâche étudiée, ici celle de prise de décision ;

- cette présence accentuée des autres sous-tâches pourrait également être renforcée en situation réelle par la présence d'un danger réel notamment en lien avec la sortie de voie.

Tout cela pourrait expliquer que la sous-tâche de prise de décision commence le plus tard possible.

En prenant en compte à présent l'ensemble des trois sections de route, couvrant les 100 mètres avant l'entrée du carrefour, les trois conditions de règle de priorité peuvent être discutées séparément.

Dans la condition Prioritaire, l'activité oculaire était constante durant les 100 mètres d'approche du carrefour. Les prédictions stipulaient la présence d'un processus C de vérification durant toute l'approche du carrefour, il semble donc que les résultats observés sont cohérents avec celles-ci, ne serait-ce qu'en terme d'évolution des processus. Cependant, en simulateur de conduite, il avait été observé une diminution de l'exploration visuelle à l'approche de l'entrée du carrefour, et l'interprétation était que la sous-tâche de prise de décision était terminée. Cet effet n'a pas été observé en situation réelle. Si effectivement les processus en lien avec cette sous-tâche ne sont plus présents à la fin de l'approche du carrefour, il est alors possible de supposer que :

- soit la sous-tâche de prise de décision est plus complexe en situation réelle, notamment du fait que le niveau de risque est beaucoup plus élevé si la prédiction de ne pas s'arrêter est erronée (une erreur de jugement concernant un véhicule à l'arrêt sur une des branches du carrefour qui voudrait par exemple "forcer le passage" pouvant entraîner un accident), ce qui justifierait de maintenir l'exploration visuelle jusqu'au dernier moment ;
- soit à l'inverse, la prise de décision est plus simple en situation réelle, le processus de vérification étant alors moins présent tout du long de l'approche de carrefour, ne permettant pas de différencier la fin de ce processus du niveau de base d'activité oculaire.

La seconde interprétation nous semble plus pertinente. En effet, la présence de véhicules sur les voies latérales des carrefours prioritaire était très rare. Or, comme cela a été discuté précédemment, les informations pertinentes pour la sous-tâche tactique de prise de décision sur voie prioritaire sont probablement associées aux comportements des usagers à l'arrêt ou en approche du carrefour, afin de vérifier que ceux-ci respectent la priorité. Dans ce cas, étant donné l'absence récurrente d'autres usagers, il est tout à fait envisageable que le processus C atteigne très rapidement un niveau de certitude suffisant, et que l'activité oculaire nécessaire soit relativement faible. Ainsi, le processus stationnaire observé dans cette condition serait plus proche en terme d'exploration visuelle de la Baseline que d'un processus C.

Concernant la condition Stop, une augmentation de l'activité oculaire a été observée à la fin de l'approche du carrefour (section 33 - 0 mètres). Comme cela avait été discuté dans les prédictions, et comme cela a été observé en simulateur de conduite, cette augmentation peut être associée à un phénomène d'anticipation. Un

processus D serait donc présent dans la dernière partie de l'approche de carrefour afin de prendre une nouvelle décision : quand redémarrer. De plus, si l'on considère les deux interprétations discutées précédemment impliquant que d'une part le processus au début de l'approche de carrefour serait le même pour les trois règles de priorité, et que d'autre part le processus présent durant l'approche en condition Prioritaire serait proche de la Baseline, cela impliquerait que le processus observé en condition Stop au début de l'approche serait également proche d'une Baseline. Ceci serait en complète adéquation avec nos prédictions, et serait également un argument en faveur des deux interprétations citées.

Dans la condition CP, seuls des comportements d'arrêt au carrefour ont été observés. Ainsi, seuls des CP-NoGo, pour faire le parallèle avec l'étude en simulateur de conduite, sont présents dans les données. L'augmentation des amplitudes horizontales à la fin de l'approche du carrefour est cohérent avec les comportements observés en CP-NoGo en simulateur, comme en condition Stop, et s'interprète de même comme le signe d'un processus D associé à la décision de redémarrer. Ce qui semble plus étonnant dans cette condition, c'est la faible activité oculaire observée au début de l'approche du carrefour alors qu'un processus D était également attendu.

Par ailleurs, les résultats montrent une augmentation des angles du regard dans la condition CP entre la première position, 100 - 66 mètre, et la dernière position, 33 - 0 mètres, tandis qu'ils augmentaient seulement entre la deuxième position, 66 - 33 mètres, et la dernière dans la condition Stop. Cette excentricité des regards en dernière position pour la condition Stop est cohérente avec la présence d'un processus D en lien avec l'anticipation au même moment, permettant d'aller recueillir de l'information principalement à gauche et à droite. Si cette augmentation en fin d'approche de carrefour peut être associée au processus d'anticipation en Stop, cela ne justifie pas que cette augmentation survienne plus tôt en CP, les deux processus étant équivalents. Cela pourrait donc être interprété comme le signe d'une exploration visuelle survenant avant le processus D d'anticipation, et donc comme la présence d'un processus D associé à la pré-décision de s'arrêter ou non. Les résultats discutés précédemment sur les angles de la tête dans la condition CP comparant un trafic Faible et Élevé semblaient montrer que les conducteurs commençaient à plus regarder à droite et à gauche en position 66 - 33 mètres lorsqu'il y avait peu de trafic. Cette condition de trafic Faible avait été considérée précédemment comme celle nécessitant une sous-tâche de prise de décision plus importante, puisque la pré-décision restait plus longtemps incertaine. Tout cela est donc cohérent avec l'hypothèse qu'un processus D conduisant à la pré-décision serait effectivement présent avant le processus d'anticipation. C'est également en accord avec le fait que la pré-décision surviendrait plus tard que lors de l'étude sur simulateur.

La sous-tâche de prise de décision, débutant par un processus D en CP conduisant à une pré-décision, surviendrait donc non pas à la position 100 - 66 mètres mais à 66 - 33 mètres, et serait suivi d'un autre processus D d'anticipation, à l'instar des résultats observés en simulateur de conduite. Par ailleurs, le bruit expérimental ne permettrait pas de détecter ce processus avec les amplitudes horizontales, et seuls les patterns d'angle du regard permettraient de les détecter. Le fait que les processus

D d'anticipation en Stop et CP aient été observés avec les amplitudes horizontales est cohérent avec l'étude en simulateur qui montrait que les amplitudes de saccade étaient plus extrêmes en fin de carrefour, les informations étant plus excentrées dans la scène visuelle.

Pour résumer, en position 100 - 66 mètres, des processus proches de la baseline en terme d'exploration visuelle semblent présents dans les trois conditions de règle de priorité. En position 66 - 33 mètres, les processus en lien avec la sous-tâche de prise de décision restent proches de la baseline en Prioritaire et en Stop, et un processus D commence en CP afin de prendre une pré-décision, ce processus étant d'autant plus intense que le trafic est faible. En position 33 - 0 mètres, ce processus D en CP serait suivi d'un autre processus D d'anticipation, de même que dans la condition Stop où le processus proche de la Baseline serait suivi par un processus D ; en condition Prioritaire, les processus restent proches de la Baseline.

6.3.2. La dynamique temporelle

Étude en simulateur de conduite Nous avons proposé pour ces analyses d'utiliser les pentes moyennes des données oculométriques (les amplitudes de saccade et les durées de fixation) comme variables dépendantes, et les analyses statistiques semblent confirmer la pertinence de ce choix dans cette étude. Ces pentes décrivent comment les données brutes évoluent en moyenne durant l'approche de carrefour, et donc permettent de discriminer les processus stationnaires (où les données brutes restent à peu près constantes dans le temps) des processus changeants (où la tendance globale est à l'évolution temporelle).

Les pentes moyennes des deux variables dépendantes étaient relativement plates dans la section Avant, ce qui indique que pour chacune des conditions de Situation, les processus étaient stationnaires. A l'inverse, chacune des pentes augmentait ou diminuait fortement dans la section Après, ce qui peut être lié au changement de processus, comme cela a été discuté, mais également à des changements au sein d'un même processus.

En effet, la théorie Diff/Cons de prise de décision (Svenson, 1992) nous a conduit à faire des prédictions en terme de processus et de comportement oculomoteur de manière discrète. Cependant, il semblerait qu'un continuum de valeurs existe pour un même processus, et de même entre deux processus qui se suivent dans le temps. On peut par exemple faire l'hypothèse d'une diminution des corrélats comportementaux associés au processus C avec le temps au fur et à mesure de l'accumulation de preuves pour la décision finale (Svenson, 1992). En d'autres termes, la vérification des informations en faveur de la pré-décision est de moins en moins nécessaire si les informations recueillies vont dans le sens de cette pré-décision. Cela semble cohérent avec la diminution de l'exploration visuelle observée dans la section Après pour les conditions Prioritaire et CP-Go.

Étude en situation réelle de conduite La discussion précédente et la notion de continuum des processus est également en accord avec les résultats observés en situ-

ation réelle de conduite. Il a été discuté du fait que les processus pouvaient entraîner une activité oculaire moins forte en situation réelle qu'en simulateur de conduite, avec l'exemple des processus C en condition Prioritaire qui semblent proches de la Baseline dans les observations.

Concernant la dynamique plus générale de prise d'information, les angles du regard commencent à augmenter en CP en deuxième position (66 - 33 mètres), tandis que les angles de la tête et les amplitudes horizontales n'augmentent qu'en troisième position (33 - 0 mètres). Il est donc possible d'imaginer le pattern suivant : les conducteurs commencent à déporter leur regard vers la gauche et la droite afin de prendre leur pré-décision, et dans un deuxième temps seulement ils déportent leur tête vers la gauche et la droite afin d'augmenter les informations recueillies, et dans cette configuration, ils ont alors besoin de re-déporter leur regard plus souvent vers le point de fuite, en face d'eux dans le référentiel du véhicule, qu'il est nécessaire de regarder régulièrement pour maintenir les performances dans la sous-tâche opérationnelle de maintien de la trajectoire, et ceci *a fortiori* en situation de freinage (Harbluk et al., 2007).

6.3.3. Apport des classifieurs

Étude en simulateur de conduite Greene et al. (2012) ont récemment testé à l'aide d'un classifieur les conclusions expérimentales de Yarbus sur le lien entre un pattern oculomoteur et la nature d'une tâche. Ils n'ont curieusement trouvé aucune différence significative en comparant les amplitudes de saccade et les durées de fixation pour plusieurs tâches visuelles. À l'inverse, pour un ensemble de tâches différentes, Henderson et al. (2013) ont trouvé que les données oculomotrices pouvaient être discriminantes dans la mesure où la tâche visuelle était fortement impliquée.

Nous nous sommes demandés dans un premier temps si un classifieur serait capable de prédire au-dessus du hasard la présence de la sous-tâche de décision associée au processus D conduisant à la pré-décision (*i.e.* de prédire si les données ont été recueillies dans une condition où la décision est imposée - Prioritaire et Stop - ou dans une condition où la décision n'est pas imposée - CP - par la règle de priorité) ; et si un type de classifieur serait plus adapté pour tester cette question notamment sur des données oculométriques. Nous avons utilisé comme entrée un grand nombre de données oculométriques et de comportements moteurs à trois types de classifieur : un *Support Vector Machines* (SVM), un *Random Forest* (RF) et un *k-Nearest Neighbors* (k-NN).

Le classifieur qui avait construit le modèle permettant de prédire au mieux si la décision était imposée ou non était le k-NN avec un taux de réussite de 78.68% (le hasard étant à 50%). Ce score est relativement bon, sachant que, comme nous l'avons vu avec le traitement des données, les comportements associés aux conditions Stop et Prioritaire, ici ensemble, sont souvent très différents, en terme de mouvements des yeux, de comportements moteurs (les participants s'arrêtaient tous en Stop, et jamais en Prioritaire), ou de processus associés ; et de même, les conditions CP présentaient parfois de grandes similitudes avec les comportements observés en Stop ou en Prioritaire, et comportaient une grande variabilité en intra, incluant des CP-Go

et des CP-NoGo.

Le classifieur RF, dont le modèle a produit un taux de prédiction correcte à 67.17%, présente l'avantage de donner le poids de chacune des mesures dans la construction de son modèle. Les mesures qui ont le plus contribué étaient le nombre de saccades, les durées de fixation et les amplitudes de saccade. Les deux dernières mesures étaient celles utilisées lors des analyses précédentes, ce qui nous conforte dans le choix des variables dépendantes. Le nombre de saccades n'a pas été analysé en tant que tel, mais est fortement dépendant de la durée des fixations (toutes ces mesures étant normalisées par rapport à la durée des essais, plus les fixations sont longues, et moins il y a de fixations, donc de saccades). Il semble donc que les mesures les plus influencées par nos facteurs expérimentaux étaient celles qui ont été analysées précédemment.

Les résultats obtenus semblent donc confirmer qu'il est possible de prédire mieux que le hasard la présence d'une prise de décision en approche de carrefour sur la base du mouvement des yeux en situation dynamique. Partant de données oculométriques qui semblaient difficilement séparables (voir Figure 4.13, Section 4.3.3), l'utilisation de classifieurs nous a permis de construire des modèles meilleurs que le hasard, que ce soit avec les méthodes SVM, RF ou k-NN. Il est cependant important de noter que chaque famille de classifieur a une logique spécifique (voir Figure 4.12, Section 4.3.3), ce qui conduit à des modèles différents, et donc à des résultats différents : dans notre cas, le k-NN donne un taux de prédiction meilleur que le SVM et le RF. Les données oculométriques observées dans chacune des conditions correspondaient à des patterns d'exploration visuelle, avec par exemple des durées de fixation et des amplitudes de saccade spécifiques en fonction de la condition de Situation, mélangeant ainsi différents patterns en regroupant certaines de ces conditions. Le k-NN est adapté pour différencier plusieurs patterns distincts tous regroupés sous un même "label" (associés à une même prédiction). Il y aurait donc une certaine logique au fait que ce classifieur soit plus adapté aux données oculomotrices, ou, tout du moins, aux données recueillies durant cette étude. Il serait intéressant de renouveler ces analyses avec d'autres données (notamment avec celles recueillies durant l'étude en situation réelle de conduite), mais également avec d'autres types de données oculométriques associées à d'autres genres de situations, afin de déterminer si ce type de classifieur est plus adapté aux données oculométriques en général.

Pour finir, nous nous sommes demandés si un classifieur (un SVM en l'occurrence) serait capable de prédire au-dessus du hasard la présence des trois processus de la prise de décision (C, D et B). En prédisant mieux que le hasard le processus associé à la tâche de prise de décision (58.81%, la chance étant à 33%), nos données ajoutent une certaine contribution à la discussion introduite par [Greene et al. \(2012\)](#) et [Henderson et al. \(2013\)](#) sur le fait de pouvoir ou non prédire la tâche à partir de données oculaires à l'aide d'un classifieur. Ce résultat suggère qu'il est possible dans certaines conditions d'évaluer au dessus du hasard les processus cognitifs à partir des patterns oculomoteurs, même dans une situation complexe telle que la conduite.

Étude en situation réelle de conduite Il serait intéressant d'utiliser des classifieurs sur les données obtenues lors de l'étude en situation réelle. Étant donnée la variabilité importante de ces données, le fait qu'un classifieur puisse identifier au dessus du hasard les processus en cours, ou les différentes conditions de règle de priorité et de position, permettrait d'envisager des applications notamment pour l'aide à la conduite ou pour l'automatisation des véhicules. Cependant, le nombre de données actuel n'est pas suffisant à notre sens pour faire de telles analyses. Le projet à court terme serait de pouvoir coupler ces données avec celles recueillies également durant cette étude pour les carrefours en T, ce qui permettrait également une généralisation de nos observations à une situation un peu différente.

6.4. Apports et limites des méthodologies expérimentales employées

6.4.1. Étude en simulateur de conduite

L'objectif de l'étude en simulateur était de pouvoir tester de manière directe nos prédictions expérimentales. En effet, l'avantage majeur de cette méthode est qu'elle permet de contrôler chaque aspect de la démarche expérimentale, du design de l'environnement, avec un aménagement des carrefours parfaitement en croix et avec une très bonne visibilité, aux facteurs expérimentaux, avec une signalisation explicite de la règle de priorité et avec des classes de densité de trafic marquées. Elle permet également d'isoler ces facteurs d'intérêt, ainsi que les sous-tâches étudiées, en donnant la possibilité d'uniformiser la scène visuelle d'une condition à l'autre. Ainsi, l'impact des facteurs bottom-up est minimisé tout en contrôlant la tâche du sujet par le simple fait de n'ajouter aucun événement inattendu, ni aucune difficulté de conduite qui aurait pu induire un surcroît attentionnel alloué au contrôle du véhicule ou à la navigation. De plus, en tant qu'étude menée en laboratoire, cela permet une reproductibilité des essais, avec un découpage du protocole facilitant la passation pour les participants (*e.g.* possibilité de faire des pauses) et un nombre d'essais jugé suffisant (l'enchaînement des carrefours permettait un temps de passations relativement faible pour un grand nombre d'essais, et un nombre important de passations).

Cependant, un comportement en laboratoire ne peut être par définition identique au comportement attendu dans une condition équivalente en situation naturelle. La tâche de conduite, entre autre, fait appel à des patterns comportementaux très automatisés, du moment où les participants ne sont plus des novices. En cela, et c'était également une des raisons du choix de la tâche de conduite, nous pouvons espérer que ces comportements se généralisent à une conduite en simulateur de conduite. Par exemple, nous n'avons observé lors de cette étude aucun comportement à risque, aucune vitesse extrême, ni de freinage dangereux, ni d'arrêt au delà de l'entrée du carrefour. Cela peut s'expliquer par la simple présence de l'expérimentateur, induisant chez les participants une envie d'avoir un comportement normé, mais cela peut également être le signe d'une généralisation des comportements de conduite appris en situation

réelle, comportant de nombreux risques. Le fait d'avoir observé des effets cohérents avec le cadre théorique permet d'appuyer cette idée que le comportement des participants était cohérent avec une conduite en situation réelle.

Une étude en laboratoire pose toujours la question de la généralisation des effets observés. Dans ce travail de thèse, nous pouvons citer l'exemple de la position des 60 mètres avant le carrefour pour la pré-décision en simulateur de conduite, pré-décision qui semblerait être prise plus tard en situation réelle. C'est pourquoi nous avons également voulu tester nos prédictions en situation réelle de conduite. Afin d'appréhender les effets généralisables souvent associés directement aux processus cognitifs tel que l'augmentation de l'exploration visuelle en fin d'approche de carrefour pour les conditions avec un comportement d'arrêt, des observations plus secondaires associées à la situation, telle que la position des 60 mètres, ou encore la forte diminution de l'exploration visuelle en fin d'approche de carrefour pour la condition prioritaire.

6.4.2. Étude en situation réelle de conduite

L'étude en situation réelle de conduite présente l'avantage de la validité écologique et de la possibilité d'observer des comportements de conduite très proche voire identiques au comportement naturel des participants. Le réalisme des situations est également plus important, d'une part pour des raisons évidentes en comparaison à l'environnement virtuel présenté lors de l'étude en simulateur de conduite, mais également en terme de processus, puisque pour créer cet environnement nous voulions extraire les éléments essentiels pour induire le comportement attendu, mais des erreurs d'appréciations sont possibles. Par exemple, comme cela a été discuté précédemment, en choisissant de faire varier uniquement le nombre de véhicules pour moduler les attentes liées à la densité de trafic, il semblerait que nous ayons négligé un facteur important, à savoir l'aménagement au niveau du carrefour qui jouerait un rôle tout aussi majeur que la présence réelle de trafic à un moment donné. Ce type de problème ne peut arriver en situation réelle, car présent naturellement dans celui-ci. À noter cependant que sans la discussion à ce sujet suite aux résultats observés en simulateur de conduite, nous ne nous serions pas interrogés à ce propos et n'aurions pas eu d'interprétation en ce sens pour les résultats observés en situations réelle de conduite. Cet exemple permet donc de montrer à la fois les avantages de la situation réelle sur l'étude en laboratoire, mais également l'apport de l'étude en simulateur pour nourrir l'interprétation des observations en situation réelle.

L'étude en situation réelle comporte néanmoins un certain nombre de limites, les plus problématiques étant le nombre restreint d'essais par participant, du fait du temps incompressible de passation s'élevant à 2h, couplé au petit nombre de participants dû à une perte expérimentale très élevée suite à de nombreux problèmes techniques. À cela s'ajoute une variabilité importante, principalement associée à un contrôle limité de l'environnement (*e.g.* changements météorologiques, aménagement conduisant à un masquage partiel des informations pertinentes, saillance visuelle différente selon la zone, présence d'événements inattendus - voir Figure 6.2 pour ce dernier exemple).

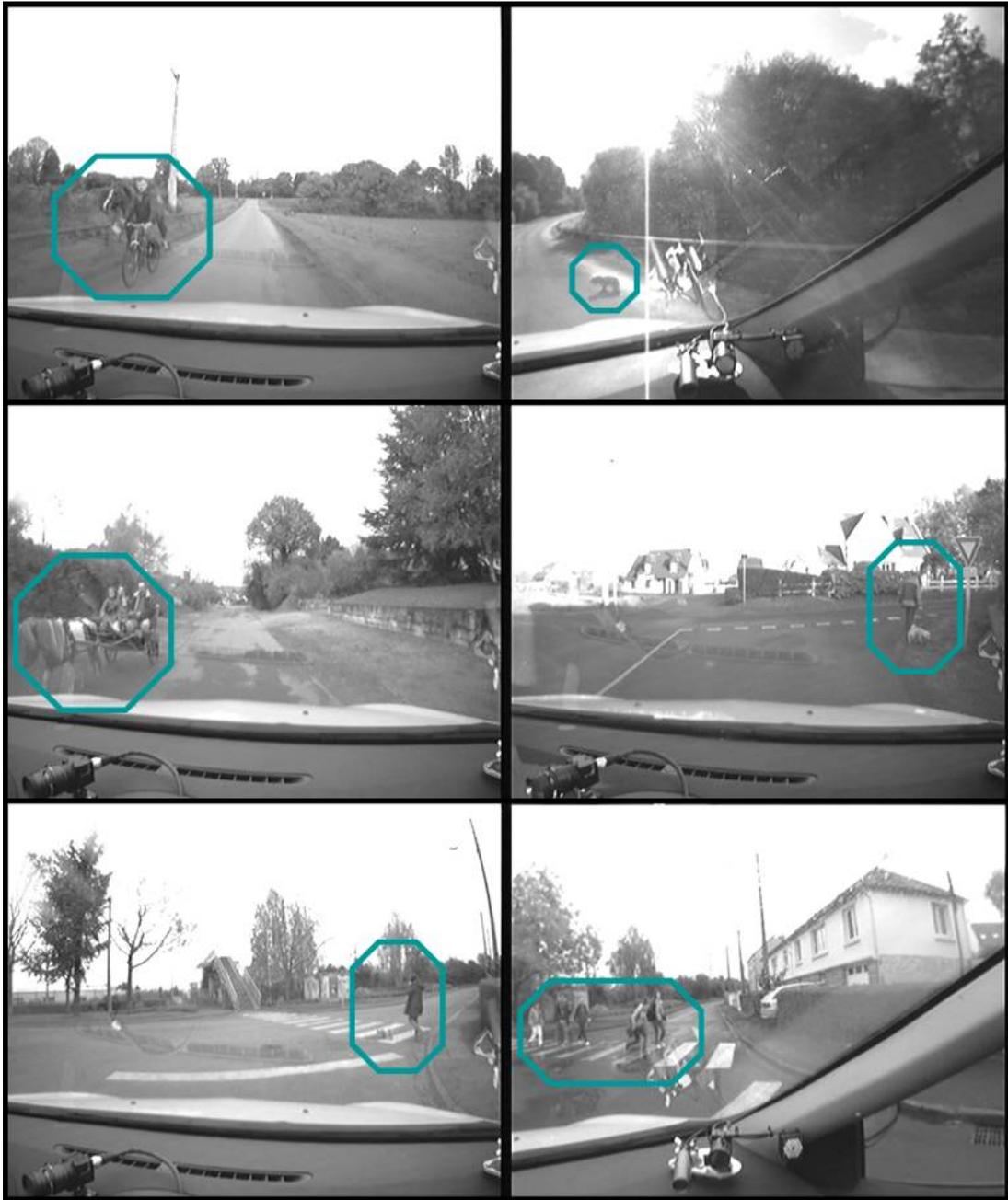


Figure 6.2.: Six exemples d'évènements sortant de la norme survenus durant les passages de cette étude en situation réelle. Ces exemples ne sont pas survenus durant l'approche des carrefours analysés, mais ils sont les six les plus explicites que nous ayons observés.

Cela nous a conduit à ne pas pouvoir tester certaines hypothèses, telle que l'effet du trafic attendu en condition prioritaire. De même, l'ensemble des participants se

sont systématiquement arrêtés à chacun des carrefours en CP. Pour réutiliser le vocabulaire précédemment utilisé, il en résulte donc qu'aucun comportement Go en CP n'a pu être observé, seules des données associées à un comportement CP-NoGo ont pu être recueillies. Deux explications peuvent être apportées au fait que personne ne soit jamais passé à un cédez le passage sans marquer l'arrêt : *i*) les carrefours choisis étaient peut-être trop complexes pour permettre de passer sans s'arrêter au préalable ; *ii*) la présence de l'expérimentateur à l'arrière du véhicule et le fait de savoir que leur comportement était enregistré a pu conduire les participants à adopter un comportement de conduite plus prudent voire conformiste qu'à leur habitude. Le fait d'avoir marqué systématiquement l'arrêt à chacun des stop pourrait corroborer cette seconde explication en faveur d'un comportement de conduite suivant rigoureusement les règles de sécurité. Il se pourrait également que le fait de glisser ou non un stop dépende du contexte et de l'aménagement (*e.g.* de la visibilité).

Par ailleurs, pour les effets qui ont pu être testés, nous avons été conduits à prendre de grandes précautions lors de l'interprétation des résultats. En cela, le fait que les effets observés soient cohérents avec ceux observés en simulateur de conduite, ou avec des pistes d'interprétation proposées alors, a permis d'avoir une certaine confiance dans ces résultats et de proposer des interprétations, ce qui n'aurait pu être envisageable sans l'étude en amont en simulateur de conduite.

Pour résumer, nous avons ainsi d'un côté confiance dans les résultats observés lors de l'étude en simulateur de conduite, avec une certaine réserve envers la généralisation des effets observés, et de l'autre côté, une confiance moindre dans les résultats observés lors de l'étude en situation réelle, mais une possibilité de généraliser les éventuels effets associés bien plus importante. C'est la complémentarité de ces deux études qui a permis de discuter bien plus avant les résultats qu'il n'aurait été possible avec chacune de ces deux études traitée séparément.

6.5. Perspectives

6.5.1. Généralisation et applications

L'aspect multi-tâche de la conduite Notre approche multi-tâche de la conduite se différencie d'études précédentes sur l'attention visuelle en conduite telle que celles de [Donges \(1978\)](#), [Land & Lee \(1994\)](#) ou [Salvucci & Gray \(2004\)](#), dans lesquelles la tâche de conduite était restreinte à une seule tâche. Elle se différencie également de précédentes études fondées sur l'aspect multi-tâche, tel que celles de [Wickens et al. \(2003\)](#) et [Horrey et al. \(2006\)](#), par le choix des sous-tâches et des zones contenant l'information pertinente pour celles-ci, qui ont permis d'étendre leur approche multi-tâche de la conduite. En effet, ces précédentes études se focalisaient sur des systèmes d'aide à la conduite embarqués (avec souvent une zone incluant l'intérieur du véhicule, et l'autre l'ensemble de l'environnement à l'extérieur à celui-ci), tandis que nous avons considéré une condition de conduite, centrée sur les interactions avec les autres usagers de la route.

Le fait d'avoir observé lors de l'étude en simulateur de conduite une grande majorité des regards dans les zones contenant des informations pertinentes à la réalisation des sous-tâches semble indiquer que même dans cette situation de laboratoire, les conducteurs ont adopté un comportement oculomoteur optimal au sens de [Senders \(1966\)](#). La notion de comportement oculomoteur optimal implique que lorsqu'un ensemble de tâches, ou sous-tâches dans notre cas, associée chacune à des informations visuelles, est nécessaire à la réalisation d'un objectif, il existe une stratégie optimale de recueil des informations visuelles, et que celle-ci est adoptée par les personnes habitués à réaliser cet objectif, donc des experts.

Une conséquence intéressante de ce constat serait de développer des programmes de formation sur simulateur de conduite (pour contrôler l'environnement) pour les conducteurs novices, afin d'évaluer leur stratégie visuelle. En effet, cela permettrait d'apprendre aux conducteurs novices les patterns optimaux de recueil d'information, ou tout du moins de vérifier si leur stratégie est optimale. Cela pourrait être fait dans des environnements simplifiés, à l'instar de notre étude en simulateur, et les patterns recueillis pourraient être comparés à ceux observés chez les conducteurs experts, ou directement extrait du modèle de [Wickens et al. \(2003\)](#) qui nous a permis d'émettre nos prédictions qualitatives puis quantitatives. L'environnement pourrait ensuite être complexifié afin d'augmenter son réalisme, et conduire peu à peu les conducteurs novices à adopter des stratégies proches des stratégies optimales. En effet, lorsque le conducteur est novice, la tâche de conduite demande d'importantes ressources attentionnelles. Puis, au fur et à mesure qu'il devient expert, la tâche s'automatise ([Rasmussen, 1983](#)), ce qui libère de l'attention qui peut alors être dirigée sur des aspects moins prévisibles de la conduite (*e.g.* les autres usagers). Les conducteurs novices ont également tendance à prélever toutes les informations disponibles, tandis que les conducteurs experts vont sélectionner directement les informations pertinentes ([Land & Tatler, 2009](#)). En conséquence, les conducteurs novices sont sur-représentés dans les accidents de la route et ces accidents sont en partie dû à des problèmes liées à une mauvaise répartition de l'attention visuelle ([Kouabenan, 2002](#); [Rumar, 1985](#); [Treat et al., 1979](#); [Trick et al., 2004](#)), donc en partie à un recueil non optimal des informations nécessaires aux sous-tâches en cours.

A l'inverse, ces stratégies optimales pourraient également permettre de poser des diagnostics sur un aménagement donné. Nous pouvons par exemple imaginer faire passer des participants experts en simulateur dans un environnement virtuel restituant un environnement réel jugé comme étant dangereux afin d'identifier la source du problème.

Sur la route, en plus des sous-tâches présentes dans cette étude (contrôle du véhicule et gestion des interactions), d'autres sous-tâches peuvent apparaître (*e.g.* dépassements, interactions avec des piétons ou des cyclistes, contrôles visuels liés à la sous-tâche de navigation). Dans notre étude en situation réelle, une analyse complémentaire a été conduite sur l'angle du regard dans le plan horizontal en situation réelle afin de comparer trois niveaux de difficulté selon la sous-tâche de navigation pour les carrefours en CP. Cette analyse post-hoc s'est faite sur un petit nombre d'essais, mais un effet de la difficulté semble ressortir avec des angles du regard plus

faibles lorsque la sous-tâche de navigation avait été jugée facile par l'expérimentateur, c'est-à-dire lorsque le conducteur était déjà passé au préalable par ce même carrefour. Cela permet de nuancer les hypothèses comme suit : la valeur de l'information associée à la sous-tâche tactique est la plus pertinente en CP, comparé aux autres règles de priorité, mais l'information sera moins recueillie si la sous-tâche de navigation est facile. Cela peut peut-être s'expliquer par le fait que les participants s'étant déjà arrêtés au préalable à ce même carrefour, la pré-décision de s'arrêter à nouveau est prise plus rapidement, avec une exploration plus restreinte des zones contenant cette information pertinente. Ce ne serait donc pas la sous-tâche de navigation en tant que telle qui modulerait les effets attendus, mais la difficulté de la sous-tâche de prise de décision, conditionnée par le fait d'être déjà passé par ce même carrefour. Il se peut également que l'exploration supplémentaire observée dans les deux autres modalités de navigation soit associée à un attrait pour la nouveauté, non présente lors de la modalité Facile. Une étude complémentaire permettrait de tester plus spécifiquement ces différentes hypothèses, et d'approfondir la modulation des effets de la valeur de l'information en fonction de la connaissance préalable de l'environnement par les conducteurs. Néanmoins, ce raisonnement ne s'applique qu'aux comportements d'arrêt lors d'un CP (CP-NoGo), et non aux comportements sans arrêt (CP-Go), absents lors de l'étude en situation réelle. Il serait donc d'autant plus intéressant de réfléchir à un choix de carrefours qui induisent des comportements sans arrêt afin d'étudier comment la tâche de navigation interagit avec les autres facteurs dans ces conditions.

De plus, en situation naturelle de conduite, d'autres tâches hors conduite peuvent également être présentes (*e.g.* téléphoner, écouter la radio, discuter avec un passager, regarder le paysage ou la publicité). Il serait intéressant de considérer ces facteurs dans des travaux futurs avec ce cadre théorique et cette approche pour compléter les études déjà réalisées notamment en double-tâche (McCarley et al., 2004; Strayer et al., 2003; Tsai et al., 2007), et d'étudier plus de situations de conduite multi-tâche ; en particulier celles qui demandent plus d'attention visuelle en raison de la charge de travail du conducteur, de la complexité de l'environnement ou des interactions.

Les processus de la prise de décision dans le temps Nous avons également observé qu'il était possible d'associer au cours du temps les processus de l'attention visuelle attachés à une tâche de prise de décision avec les mouvements des yeux. Seules des consignes minimales données aux participants, les mêmes pour chacune des conditions, ont été nécessaires pour induire la tâche de prise de décision. Des processus cognitifs supplémentaires à ceux de la tâche de prise de décision se produisent pendant l'activité de conduite, et on observe également des différences inter-individuelles. La validation de nos hypothèses principales malgré cette variabilité suggère des résultats robustes. Étant donné que la conduite est une activité de la vie de tous les jours, nous espérons qu'il est possible de discriminer des processus cognitifs à partir de patterns oculomoteurs pour d'autres tâches de prise de décision (Kingstone et al., 2008).

Ce travail nous conduit à penser qu'une meilleure compréhension des processus cognitifs rattachés à une tâche de prise de décision peut venir des patterns oculomoteurs

recueillis en situation réelle. Les tentatives pour essayer de déterminer les processus cognitifs en cours à partir du mouvement des yeux dans une tâche quotidienne sont encore à leurs balbutiements. D'autres études sont nécessaires afin d'élaborer une compréhension complète de l'évolution dans le temps de la prise de décision dans une grande variété de tâches et de scénarios (*e.g.* en situation de conduite : dépassement, feu tricolore, entrée d'autoroute). Cependant, la capacité à anticiper les décisions humaines serait très avantageuse dans de nombreux domaines, et permettrait de développer de nombreux systèmes et aides à la conduite.

6.5.2. Un modèle prédictif mixte de l'attention visuelle

Étudier les stratégies de prise d'information est centrale pour comprendre la logique des processus cognitifs attentionnels lors de situations écologiques. Les aspects multi-tâches et dynamiques sont nécessaires pour spécifier une situation écologique. Suite aux résultats présentés et aux discussions qui en ont découlé, nous proposons pour aller plus loin un modèle probabiliste de l'allocation de l'attention visuelle permettant de déterminer la position du regard durant une tâche de conduite.

Les modèles graphiques (Jordan & Bishop, 2004; Koller & Friedman, 2009) et leurs distributions de probabilités sont basés sur des modèles théoriques et des connaissances neuropsychologiques, ce qui nous permet de tester ces modèles et de les généraliser à d'autres types de situations dynamiques.

Comme nous l'avons vu dans le Chapitre 1, l'attention visuelle peut être définie comme dépendante de deux composantes, top-down et bottom-up. Ces deux composantes de l'attention visuelle et leurs interactions ont été beaucoup étudié depuis les travaux de Yarbus (1967). L'attention bottom-up dépend des facteurs environnementaux, telle que la saillance des objets (Hughes & Cole, 1986), tandis que l'attention top-down dépend des attentes, des connaissances et de la tâche. De nombreux modèles de l'attention visuelle, plus spécifiquement les modèles quantitatifs et prédictifs, sont centrés sur la composante bottom-up (*e.g.* Itti et al. (1998) ; voir Borji & Itti (2013) pour une revue). En effet, pour des tâches simples en laboratoire, les modèles quantitatifs donnent de bonnes performances pour la prédiction de la position du regard (Borji & Itti, 2013; Geisler, 2011) et permettent d'associer les mouvements des yeux à des processus cognitifs. Cependant, il a été montré que pour des situations écologiques, les modèles top-down permettent de meilleures prédictions que ces derniers (Einhäuser et al., 2008; Li et al., 2004; Nyström & Holmqvist, 2008; Rothkopf et al., 2007; Tatler et al., 2005). Dans ces situations, il est donc crucial de prendre en compte la composante top-down. Les modèles bottom-up étant plus répandus et plus facile à implémenter, de nombreux auteurs ont donc proposés des modèles mixtes en ajoutant une composante top-down à un modèle initialement bottom-up (Borji & Itti, 2013). Dans ces modèles, la composante top-down est souvent assimilée à une composante contextuelle, plutôt que dérivant d'un modèle théorique (*e.g.* Torralba et al. (2006)).

Ainsi, l'un des objectifs centraux de la recherche actuelle dans le champ de l'attention visuelle est de pouvoir formuler un modèle permettant d'émettre des pré-

dictions quantitatives sur les positions du regard lors de la réalisation d'une tâche donnée. Comme nous avons pu le voir dans le Chapitre 1, ce genre de modèle commence à émerger, notamment celui de [Sprague et al. \(2007\)](#).

Une meilleure compréhension de la distribution de l'attention visuelle ouvrirait la porte à de nombreuses possibilités d'applications. De manière non exhaustive, nous pouvons citer les champs d'applications suivants :

- l'interaction homme-machine : les outils d'interfaces couplés aux avancés de l'oculométrie permettent à une personne de contrôler par exemple un ordinateur uniquement avec le regard, ce qui peut être d'une aide sans comparaison actuelle pour les personnes à mobilité réduite ([Majaranta & Riih , 2002](#)), mais qui peut également être utilisé pour les jeux vid es ⁴ ([Caroux, 2012](#)) et dans différentes tâches du quotidien ⁵ ;
- l'expertise en médecine, notamment dans l'aide à la perception d'image (*e.g.* radiologique), afin d'optimiser le diagnostic ([Manning et al., 2014](#)) ;
- la recherche sur des pages web et l'évaluation des internautes ([Dinet et al., 2010](#); [Drusch & Bastien, 2012](#); [Goldberg & Kotval, 1999](#)).

Suite à ces travaux de thèse, nous proposons un modèle que nous décrivons brièvement dans ce qui suit. Les origines de ce modèle probabiliste sont le fruit d'une discussion avec Jean-Philippe Tarel (LEPSiS - IFSTTAR). Ce modèle a ensuite été discuté puis formalisé en collaboration avec Julien Diard (LPNC / CNRS).

Ce modèle permet d'estimer la distribution de probabilités de la sélection d'information pour différentes zones d'intérêt dans la scène visuelle (*i.e.* AOI). Pour estimer ces probabilités, trois distributions sont nécessaires : une distribution pour la saillance, représentant la composante bottom-up ; une distribution pour les *priors* décrivant où se trouve l'information pertinente en fonction de la tâche et sous-tâche, représentant la composante top-down ; et une distribution pour la mémoire à court terme pour les informations précédemment recueillies, représentant l'état des connaissances concernant l'environnement, et reflétant ainsi l'aspect dynamique. A noter que cette décomposition utilise trois des quatre composantes fondamentales de l'attention visuelle selon [Knudsen \(2007\)](#), la quatrième étant la sélection compétitive, qui est dans ce modèle prise en compte par l'architecture même du modèle.

Chaque distribution de probabilité est définie spatialement (pour les AOIs) et temporellement (  un temps t). La sortie du modèle est une distribution de probabilité dérivant des trois distributions précédentes (en accord avec une équation Bayesienne), et indique pour chaque zone la probabilité de regard pour la prochaine information sélectionnée. Pour finir, à partir de la distribution finale, un modèle complémentaire permet d'estimer la zone sélectionnée, donc la position du regard (selon le mode *Winner Takes All*, c'est-à-dire que la zone sélectionnée, le "gagnant", est celle qui aura au finale la plus grande probabilité, indépendamment de la valeur de cette probabilité et de celles des autres zones). Les trois distributions de probabilité utilisées en entrées par le modèles sont décrites ci-dessous.

4. <https://www.youtube.com/watch?v=SyEqMCwJWkw>

5. <http://theeyetribe.com/>

- La distribution top-down peut-être établie à partir de plusieurs modèles théoriques en lien avec la conduite, comme le modèle des deux points de [Salvucci & Gray \(2004\)](#) et le modèle multi-tâche de [Wickens et al. \(2003\)](#). Ces modèles peuvent être choisis en fonction de la situation et de la tâche. C'est la composante top-down qui contraint le choix des zones d'intérêts, qui sont ensuite généralisées aux autres composantes.
- La distribution bottom-up est issue des cartes de saillance qui peuvent être dérivées du modèle proposé par [Itti & Koch \(2000\)](#), et converties afin d'être exprimées en probabilité pour chaque zone.
- Une distribution de l'information en mémoire à court terme des zones d'intérêts précédemment regardées. La distribution de probabilité permet de simuler l'érosion des informations avec le temps : certaines informations recueillies il y a 10 secondes sont obsolètes et nécessitent une mise à jour. Au final, de cette distribution de probabilité intermédiaire est déduit sa distribution inverse : la zone avec la plus forte probabilité correspond à la zone où les informations sont les plus récentes, et donc où il est le moins pertinent de regarder.

La Figure 6.3 illustre le modèle graphique probabiliste proposé. Le graphique représente la probabilité qu'une zone contienne des informations pertinentes. Un modèle graphique indique les dépendances conditionnelles entre les variables. Une flèche de A vers B exprime la probabilité de B sachant A ($P(B|A)$). La probabilité conjointe (*i.e.* le probabilité de tous les termes regroupés, correspondant à l'équation 6.3) dépend directement du modèle graphique. Une illustration littéraire de ce modèle graphique est présentée dans la Figure 6.4.

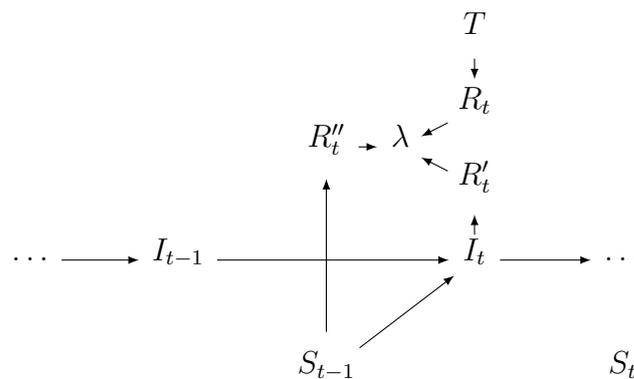


Figure 6.3.: Le modèle graphique probabiliste (réseau bayésien) avec S la zone sélectionnée, T la tâche prioritaire pour la recherche d'information, R les informations pertinentes, I l'ensemble des informations précédemment recueillies, t le pas de temps, et λ une variable binaire.

Les termes de la fonction de probabilité conjointe sont : $P(R_t|T)$, la distribution top-down ; $P(R''_t|S_{t-1})$, la distribution bottom-up ; $P(I_t|I_{t-1}, S_{t-1})$, la distribution de l'information en mémoire à court terme ; et $P(R'_t|I_t)$, la probabilité que la zone

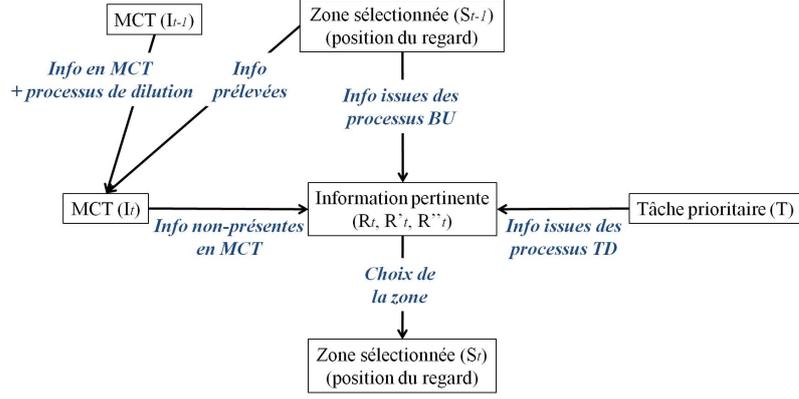


Figure 6.4.: Illustration littéraire du modèle graphique. La première ligne correspond à $t-1$ tandis que le deuxième et la troisième correspondent à t , les indications entre parenthèses renvoient aux abréviations des mêmes termes employés dans le modèle graphique. A noter que la nature des flèches, indiquée en italique, est l'expression littéraire des distributions de probabilité définies par la probabilité conjointe.

contienne une information pertinente connaissant les zones précédemment regardées (*i.e.* la distribution inversement proportionnelle à la distribution de l'information en mémoire à court terme). Le terme $P(\lambda|R_t, R'_t, R''_t)$ est un sous-modèle permettant de mixer les trois termes R_t , R'_t et R''_t (Bessière et al., 2013). Ainsi, la fonction de probabilité conjointe est la suivante :

$$\begin{aligned}
 P(R_t, R'_t, R''_t, I_{t-1}, I_t, S_{t-1}, T, \lambda) &= P(T) \cdot P(R_t|T) \cdot P(R'_t|I_t) \cdot P(S_{t-1}) \\
 &\quad \cdot P(I_t|I_{t-1}, S_{t-1}) \cdot P(I_{t-1}) \\
 &\quad \cdot P(R''_t|S_{t-1}) \cdot P(\lambda|R_t, R'_t, R''_t) \quad (6.3)
 \end{aligned}$$

De cette fonction, une inférence bayésienne prédit la probabilité de R , la pertinence à un moment donné des informations contenues dans chaque zone en fonction des variables. Pour finir, un modèle complémentaire est ajouté afin de sélectionner la zone à regarder : $P(S_t|R_t)$.

Afin de rendre plus explicite le modèle proposé, nous donnons un exemple d'application pour la situation étudiée durant ce travail de thèse. La sous-tâche de prise de décision consiste à choisir de s'arrêter ou non à un carrefour, la situation étant soit une approche de carrefour en Prioritaire ou en Cédez le passage.

La Figure 6.5 représente des distributions de probabilité simplifiées dans les référentiels spatial et temporel, représentées dans une image extraite d'une vidéo à un temps t . Les deux distributions bottom-up sont strictement identiques. Les deux distributions top-down sont différentes du fait des hypothèses théoriques sous-jacentes dépen-

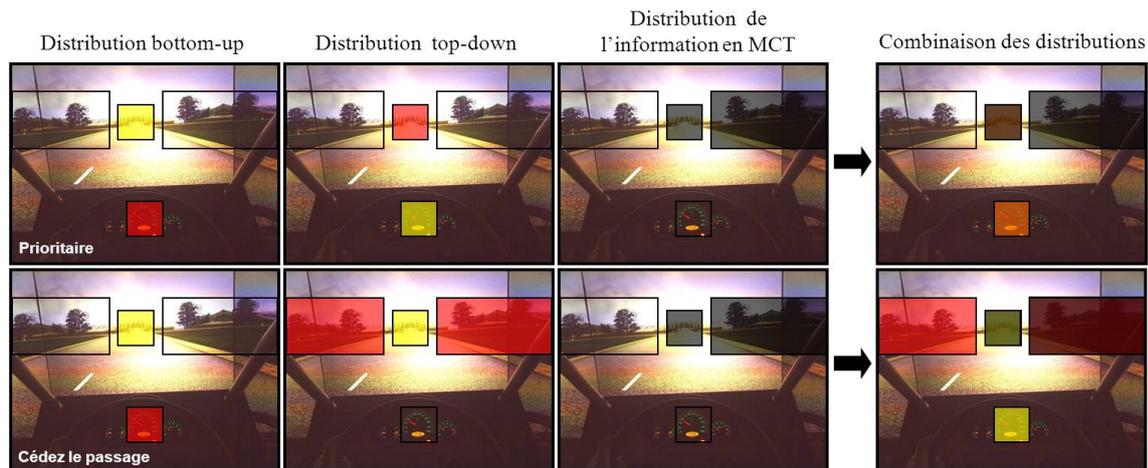


Figure 6.5.: Les quatre distributions pour une image venant de deux situations de conduite à un carrefour (Prioritaire et Cédez le passage) : une distribution bottom-up, une distribution top-down, une distribution de l'information en mémoire à court terme (MCT), et la combinaison des distributions. Les distributions probabilistes schématisées sont données pour chacune des deux situations de conduite. Les valeurs de ces probabilités sont représentées en : rouge (très probable), jaune (très peu probable) et orange (entre les deux). Le noir correspond à la probabilité inverse de la distribution de l'information en mémoire à court terme.

dantes de la situation (*i.e.* Prioritaire ou Cédez le passage). Les deux distributions de l'information en mémoire à court terme dépendent des comportements visuels précédents. Dans la Figure 6.5, nous les avons représentées comme identiques. La distribution combinée de ces trois distributions pour chacune des deux situations de conduite, ici schématisée, serait obtenue avec l'inférence bayésienne.

Afin de tester ce modèle, une fois qu'il aura été implémenté, nous avons imaginé une expérience avec des vidéos⁶ de situations réelles de conduite qui seraient présentées à des participants équipés d'un oculomètre. La tâche des participants serait de répondre à une question posée avant la projection du clip vidéo, cette tâche devant induire un recueil d'information identique à celui effectué en conduite (*e.g.* par exemple, pour l'approche de carrefour, la question serait s'ils comptent s'arrêter ou non au carrefour). La distribution du regard dans les AOIs des participants dans les zones définies au préalable pourrait ensuite être comparée aux prédictions du modèle.

6. Afin que les stimuli soient toutes identiques entre participants et par rapport aux entrées du modèle, cette étude ne serait pas faite en simulateur mais avec des vidéos.

De ce travail de thèse, de la littérature dans laquelle il se situe, des outils et modèles utilisés tant qualitatifs que quantitatifs, des résultats observés et des interprétations qui en découlent, ressort tout l'intérêt et la nécessité d'avoir un modèle à la fois théorique et prédictif de l'attention visuelle. Cela permettrait des avancées théoriques, avec la possibilité de tester spécifiquement chaque hypothèse, mais également des applications directes pour la sécurité routière, la simulation de trafic, l'anticipation de risques en temps réel, qui sont des aspects essentiels dans le développement de système de transports intelligents. De plus, le choix de partir d'une situation de conduite était guidé par la présence d'un objectif top-down clair à définir, mais un tel modèle pourrait s'adapter à n'importe quelle tâche naturelle. Pour finir, il pourrait faciliter les communications interdisciplinaires, tout particulièrement entre sciences pour l'ingénieur et sciences cognitives.

Bibliography

- Aaltonen, A., Hyrskykari, A., & R ih a, K.-J. (1998). 101 spots, or how do users read menus? In *Proceedings of the sigchi conference on human factors in computing systems* (pp. 132–139).
- Alexander, J., Barham, P., & Black, I. (2002). Factors influencing the probability of an incident at a junction: results from an interactive driving simulator. *Accident Analysis & Prevention*, *34*(6), 779–792.
- Al-Ghamdi, A. S. (2002). Using logistic regression to estimate the influence of accident factors on accident severity. *Accident Analysis & Prevention*, *34*(6), 729–741.
- Allen, T. M., Lunenfeld, H., & Alexander, G. J. (1971). Driver information needs. *Highway Research Board*, *36*, 102-115.
- Anderson, J. R. (1996). ACT: A simple theory of complex cognition. *American Psychologist*, *51*(4), 355-365.
- Apt, K. R., Blair, H. A., & Walker, A. (1986). *Towards a theory of declarative knowledge*. IBM Thomas J. Watson Research Division.
- Atkinson, J. W. (1964). *An introduction to motivation*. Van Nostrand.
- Baccino, T. (2011). Eye movements and concurrent event-related potentials': eye fixation-related potential investigations in reading. *Eye*, *2*, 857–870.
- Baddeley, A. (2003). Working memory: looking back and looking forward. *Nature reviews neuroscience*, *4*(10), 829–839.
- Ballard, D., Hayhoe, M., & Peltz, J. B. (1995). Memory representations in natural tasks. *Cognitive Neuroscience*, *7*, 66–80.
- Baluch, F., & Itti, L. (2011). Mechanisms of top-down attention. *Trends in Neuroscience*, *34*(4), 210–224.
- Bao, S., & Boyle, L. N. (2009). Age-related differences in visual scanning at median-divided highway intersections in rural areas. *Accident Analysis & Prevention*, *41*(1), 146-152.

- Bar, M. (2004). Visual objects in context. *Nature Reviews Neuroscience*, 5(8), 617–629.
- Bessière, P., Mazer, E., Ahuactzin, J. M., & Mekhnacha, K. (2013). *Bayesian programming*. Boca Raton, Florida : CRC Press.
- Björklund, G. M., & Åberg, L. (2005). Driver behaviour in intersections: Formal and informal traffic rules. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8(3), 239–253.
- Boring, E. G. (1930). A new ambiguous figure. *The American Journal of Psychology*, 42, 444–445.
- Borji, A., Ahmadabadi, M. N., & Araabi, B. N. (2011). Cost-sensitive learning of top-down modulation for attentional control. *Machine Vision and Applications*, 22(1), 61–76.
- Borji, A., & Itti, L. (2013). State-of-the-art in visual attention modeling. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 35(1), 185–207.
- Bornard, J. (2013). *Développement d'un modèle du conducteur automobile : de la modélisation cognitive à la simulation numérique*. Thèse de doctorat non publiée, Institut Polytechnique de Bordeaux.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45(1), 5–32.
- Brenner, E., & Smeets, J. B. (2011). Continuous visual control of interception. *Human movement science*, 30(3), 475–494.
- Buswell, G. T. (1920). *An experimental study of the eye-voice span in reading*. Thèse de doctorat non publiée.
- Butko, N. J., & Movellan, J. R. (2009). Optimal scanning for faster object detection. In *Computer vision and pattern recognition* (pp. 2751–2758).
- Butsch, R. L. (1932). Eye movements and the eye-hand span in typewriting. *Journal of Educational Psychology*, 23(2), 104.
- Byrne, M. D. (2001). Act-r/pm and menu selection: Applying a cognitive architecture to hci. *International Journal of Human-Computer Studies*, 55(1), 41–84.
- Caird, J., & Hancock, P. (1994). The perception of arrival time for different oncoming vehicles at an intersection. *Ecological Psychology*, 6(2), 83–109.
- Cantin, V., Lavallière, M., Simoneau, M., & Teasdale, N. (2009). Mental workload when driving in a simulator: Effects of age and driving complexity. *Accident Analysis & Prevention*, 41(4), 763–771.

- Carandini, M., Demb, J. B., Mante, V., Tolhurst, D. J., Dan, Y., Olshausen, B. A., et al. (2005). Do we know what the early visual system does? *The Journal of neuroscience*, *25*(46), 10577–10597.
- Carbonell, J. R. (1966). A queueing model of many-instrument visual sampling. *IEEE Trans. on Human Factors in Electronics*, *9*(4), 157–164.
- Carbonell, J. R., Ward, J. L., & Senders, J. W. (1968). A queueing model of visual sampling experimental validation. *IEEE Trans. on Man-Machine Systems*, *9*(3), 82–87.
- Caroux, L. (2012). *Interaction avec les interfaces visuelles dynamiques complexes des jeux vidéo: effet des arrière-plans sur la performance et le comportement du regard*. Thèse de doctorat non publiée, Université de Poitiers.
- Chapman, P. R., & Underwood, G. (1998). Visual search of driving situations: danger and experience. *Perception*, *27*(8), 951–64.
- Chun, M. M., & Jiang, Y. (1998). Contextual cueing: Implicit learning and memory of visual context guides spatial attention. *Cognitive Psychology*, *36*(1), 28 - 71.
- Colby, C. L., & Goldberg, M. E. (1999). Space and attention in parietal cortex. *Annual review of neuroscience*, *22*(1), 319–349.
- Corbett, A. T., & Bhatnagar, A. (1997). Student modeling in the act programming tutor: Adjusting a procedural learning model with declarative knowledge. In A. Jameson, C. Paris, & C. Tasso (Eds.), *User modeling: Proceedings of the sixth international conference* (pp. 243–254). New York : Springer.
- Corbetta, M., & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature reviews neuroscience*, *3*(3), 201–215.
- Cover, T., & Hart, P. (1967). Nearest neighbor pattern classification. *IEEE Trans. on Information Theory*, *13*(1), 21–27.
- Cowen, L., Ball, L. J., & Delin, J. (2002). An eye movement analysis of web page usability. In C. Faulkner, J. Finlay, & F. Detienne (Eds.), *People and computers xvi-memorable yet invisible* (pp. 317–335). London : Springer.
- Crosby, M. E., & Peterson, W. W. (1991). Using eye movements to classify search strategies. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting* (Vol. 35, pp. 1476–1480).
- Crundall, D., & Underwood, G. (2011). Chapter 11 - visual attention while driving: Measures of eye movements used in driving research. In B. E. Porter (Ed.), *Handbook of traffic psychology* (p. 137-148). San Diego : Academic Press.

- Dashiell, J. F. (1928). *Fundamentals of objective psychology*. Houghton Mifflin Company.
- Desimone, R., & Duncan, J. (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual Review Neuroscience*, *18*, 193–222.
- Désiré, L. (2010). Véhicule d’observation de l’interaction du conducteur avec l’infrastructure et l’environnement de la route. In *Congrès its* (p. 1p).
- Deubel, H., & Schneider, W. X. (1996). Saccade target selection and object recognition: Evidence for a common attentional mechanism. *Vision Research*, *36*(12), 1827–1837.
- Dinet, J., Bastien, J., & Kitajima, M. (2010). What, where and how are young people looking for in a search engine results page?: impact of typographical cues and prior domain knowledge. In *Conference internationale francophone sur l’interaction homme-machine* (pp. 105–112).
- Donges, E. (1978). A two-level model of driver steering behavior. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *20*(6), 691–707.
- Drusch, G., & Bastien, J. (2012). Analyzing visual scanpaths on the web using the mean shift procedure and t-pattern detection: a bottom-up approach. In *Proceedings of the 2012 conference on ergonomie et interaction homme-machine* (p. 181).
- Duchowski, A., Medlin, E., Cournia, N., Murphy, H., Gramopadhye, A., Nair, S., et al. (2002). 3d eye movement analysis. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, *34*(4), 573–591.
- Duchowski, A. T., Shivashankaraiah, V., Rawls, T., Gramopadhye, A. K., Melloy, B. J., & Kanki, B. (2000). Binocular eye tracking in virtual reality for inspection training. In *Proceedings of the 2000 symposium on eye tracking research & applications* (pp. 89–96).
- Duncan, J. (1984). Selective attention and the organization of visual information. *Journal of Experimental Psychology: General*, *113*(4), 501.
- Eccles, J. S. (1987). Gender roles and women’s achievement-related decisions. *Psychology of women Quarterly*, *11* (2), 135–172.
- Eccles, J. S., & Wigfield, A. (2002). Motivational beliefs, values, and goals. *Annual review of psychology*, *53*(1), 109–132.
- Edwards, W. (1961). Behavioral decision theory. *Annual review of psychology*, *12*(1), 473–498.
- Egeth, H. E., & Yantis, S. (1997). Visual attention: Control, representation, and time course. *Annual review of psychology*, *48*(1), 269–297.

- Egner, T., Monti, J. M., Trittschuh, E. H., Wieneke, C. A., Hirsch, J., & Mesulam, M.-M. (2008). Neural integration of top-down spatial and feature-based information in visual search. *The Journal of neuroscience*, *28*(24), 6141–6151.
- Einhäuser, W., Rutishauser, U., & Koch, C. (2008). Task-demands can immediately reverse the effects of sensory-driven saliency in complex visual stimuli. *Journal of Vision*, *8*(2), 1-19.
- El-Shawarby, I., Rakha, H., Inman, V., & Davis, G. (2007). Evaluation of driver deceleration behavior at signalized intersections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(2018), 29–35.
- Fitts, P. M., Jones, R. E., & Milton, J. L. (1950). Eye movements of aircraft pilots during instrument-landing approaches. *Aeronautical Engineering Review*, *9*, 24–29.
- Follet, B., Le Meur, O., & Baccino, T. (2010). Modeling visual attention on scenes. *Studia Informatica Universalis*, *8*(4), 157–160.
- Foulsham, T., & Kingstone, A. (2012). Goal-driven and bottom-up gaze in an active real-world search task. In *Proceedings of the symposium on eye tracking research and applications* (pp. 189–192).
- Foulsham, T., Walker, E., & Kingstone, A. (2011). The where, what and when of gaze allocation in the lab and the natural environment. *Vision Research*, *51*(17), 1920–1931.
- Fuller, R. (2000). The task-capability interface model of the driving process. *Recherche Transport Sécurité*, *66*, 47–57.
- Fuller, R. (2005). Towards a general theory of driver behaviour. *Accident Analysis and Prevention*, *37*, 461–472.
- Geisler, W. S. (2011). Contributions of ideal observer theory to vision research. *Vision research*, *51*(7), 771–781.
- Gibson, E. J., Owsley, C. J., Walker, A., & Megaw-Nyce, J. (1979). Development of the perception of invariants: Substance and shape. *Perception*, *8*(6), 609–619.
- Gigerenzer, G., & Gaissmaier, W. (2011). Heuristic decision making. *Annual review of psychology*, *62*, 451–482.
- Gilbert, C. D., & Sigman, M. (2007). Brain states: Top-down influences in sensory processing. *Neuron*, *54*(5), 677 - 696.
- Goldberg, J. H., & Kotval, X. P. (1999). Computer interface evaluation using eye movements: methods and constructs. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *24*(6), 631–645.

- Gollwitzer, P. M., Heckhausen, H., & Steller, B. (1990). Deliberative and implemental mind-sets: Cognitive tuning toward congruous thoughts and information. *Journal of Personality and Social Psychology*, *59*(6), 1119–1127.
- Goodale, M. A. (2011). Transforming vision into action. *Vision research*, *51*(13), 1567–1587.
- Goodman, M. J., Tijerina, L., Bents, F. D., & Wierwille, W. W. (1999). Using cellular telephones in vehicles: Safe or unsafe? *Transportation Human Factors*, *1*(1), 3–42.
- Greene, M. R., Lui, T., & Wolfe, J. M. (2012). Reconsidering yarbus: A failure to predict observer's task from eye movement patterns. *Vision Research*, *62*, 1-8.
- Hafed, Z. M., & Clark, J. J. (2002). Microsaccades as an overt measure of covert attention shifts. *Vision research*, *42*(22), 2533–2545.
- Hancock, P., Caird, J., Shekhar, S., & Vercruyssen, M. (1991). Factors influencing drivers' left turn decisions. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting* (Vol. 35, pp. 1139–1143).
- Hancock, P. A., & Manser, M. (1997). Time-to-contact: More than tau alone. *Ecological Psychology*, *9*(4), 265–297.
- Harbluk, J. L., Noy, Y. I., Trbovich, P. L., & Eizenman, M. (2007). An on-road assessment of cognitive distraction: Impacts on drivers' visual behavior and braking performance. *Accident Analysis & Prevention*, *39*(2), 372–379.
- Hayhoe, M., & Ballard, D. (2005). Eye movements in natural behavior. *Trends in Cognitive Science*, *9*(4), 188–194.
- Hayhoe, M., Shrivastava, A., Myruczek, R., & Pelz, J. (2003). Visual memory and motor planning in a natural task. *Journal of Vision*, *3*, 49–63.
- Hayhoe, M. M., & Rothkopf, C. A. (2010). Vision in the natural world. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, *2*(2), 158–166.
- Heckhausen, H., & Gollwitzer, P. M. (1987). Thought contents and cognitive functioning in motivational versus volitional states of mind. *Motivation and emotion*, *11*(2), 101–120.
- Helmers, G., & Åberg, L. (1978). *Driver behavior at intersections as related to priority rules and road design, an exploratory study* (Rapport technique).
- Henderson, J. (2003). Human gaze control during real-world scene perception. *Trends in Cognitive Science*, *7*, 498–504.
- Henderson, J., & Hollingworth, A. (1999). The role of fixation position in detecting scene changes across saccades. *Psychological Science*, *5*, 438–443.

- Henderson, J. M. (2007). Regarding scenes. *Current Directions in Psychological Science*, 16(4), 219–222.
- Henderson, J. M., Malcolm, G. L., & Schandl, C. (2009). Searching in the dark: Cognitive relevance drives attention in real-world scenes. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16(5), 850–856.
- Henderson, J. M., Shinkareva, S. V., Wang, J., Luke, S. G., & Olejarczyk, J. (2013). Predicting cognitive state from eye movements. *PloS one*, 8(5), e64937.
- Hernandez-Peon, R. (1966). Physiological mechanisms in attention. In *Frontiers in physiological psychology* (pp. 121–147). Academic Press New York.
- Hoffman, K. L., Dragan, M. C., Leonard, T. K., Micheli, C., Montefusco-Siegmund, R., & Valiante, T. A. (2013). Saccades during visual exploration align hippocampal 3–8 Hz rhythms in human and non-human primates. *Frontiers in systems neuroscience*, 7.
- Horrey, W. J., Wickens, C. D., & Consalus, K. P. (2006). Modeling drivers' visual attention allocation while interacting with in-vehicle technologies. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 12(2), 67 - 78.
- Howard, C. J., Gilchrist, I. D., Troscianko, T., Behera, A., & Hogg, D. C. (2011). Task relevance predicts gaze in videos of real moving scenes. *Experimental Brain Research*, 214(1), 131–137.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1962). Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *The Journal of physiology*, 160(1), 106.
- Hughes, P., & Cole, B. L. (1986). What attracts attention when driving? *Ergonomics*, 29(3), 377–391.
- Hunt, A. R., & Kingstone, A. (2003). Covert and overt voluntary attention: linked or independent? *Cognitive Brain Research*, 18(1), 102–105.
- Hwang, A. D., Higgins, E. C., & Pomplun, M. (2009). A model of top-down attentional control during visual search in complex scenes. *Journal of Vision*, 9(5), 25.
- Itti, L. (2004, Oct). Automatic foveation for video compression using a neurobiological model of visual attention. *IEEE Trans. on Image Processing*, 13(10), 1304-1318.
- Itti, L., & Baldi, P. F. (2009, May). Bayesian surprise attracts human attention. *Vision Research*, 49(10), 1295-1306.

- Itti, L., & Koch, C. (2000). A saliency-based search mechanism for overt and covert shifts of visual attention. *Vision Research*, 40(10-12), 1489-1506.
- Itti, L., & Koch, C. (2001). Computational modeling of visual attention. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(3), 194-203.
- Itti, L., Koch, C., & Niebur, E. (1998). A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(11), 1254-1259.
- Jacob, R. J. (1991). The use of eye movements in human-computer interaction techniques: what you look at is what you get. *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)*, 9(2), 152-169.
- Jacob, R. J., & Karn, K. S. (2003). Eye tracking in human-computer interaction and usability research: Ready to deliver the promises. *Mind*, 2(3), 4.
- James, W. (1890). *1950. the principles of psychology*. New York: Dover.
- Jeannerod, M. (1981). Intersegmental coordination during reaching at natural visual objects. *Attention and performance IX*, 9, 153-168.
- Jodogne, S., & Piater, J. H. (2007). Closed-loop learning of visual control policies. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 349-391.
- Johnson, V. E. (2013). Revised standards for statistical evidence. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(48), 19313-19317.
- Jordan, M. I., & Bishop, C. (2004). *An introduction to graphical models*. progress.
- Jovancevic, J., Sullivan, B., & Hayhoe, M. (2006). Control of attention and gaze in complex environments. *Journal of Vision*, 6(12), art. 9.
- Jovancevic-Misic, J., & Hayhoe, M. (2009). Adaptive gaze control in natural environments. *The Journal of Neuroscience*, 29(19), 6234-6238.
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1980). A theory of reading: from eye fixations to comprehension. *Psychological review*, 87(4), 329.
- Kahneman, D. (2002). Maps of bounded rationality: A perspective on intuitive judgment and choice. *Nobel prize lecture*, 8, 351-401.
- Kanizsa, G. (1976). Subjective contours. *Scientific American*, 234(4), 48-52.
- Ketenci, U. G. (2013). *Modélisation agent de la perception visuelle humaine limitée appliquée à la simulation du comportement des conducteurs en carrefour*. Thèse de doctorat non publiée, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis.

- Kingstone, A., Smilek, D., & Eastwood, J. D. (2008). Cognitive ethology: A new approach for studying human cognition. *British Journal of Psychology*, *99*(3), 317-340.
- Klein, R. M. (2000). Inhibition of return. *Trends in cognitive sciences*, *4*(4), 138-147.
- Knudsen, E. I. (2007). Fundamental components of attention. *Annual Review Neuroscience*, *30*, 57-78.
- Koch, C., & Ullman, S. (1985). Shifts in selective visual attention: towards the underlying neural circuitry. *Human Neurobiology*, *4*, 219-227.
- Koller, D., & Friedman, N. (2009). *Probabilistic graphical models: principles and techniques*. MIT press.
- Kouabenan, D. R. (2002). Occupation, driving experience, and risk and accident perception. *Journal of Risk Research*, *5*(1), 49-68.
- Kowler, E. (2011). Eye movements: The past 25years. *Vision Research*, *51*(13), 1457-1483.
- Kowler, E., Anderson, E., Doshier, B., & Blaser, E. (1995). The role of attention in the programming of saccades. *Vision Research*, *35*(13), 1897-1916.
- LaBar, K. S., Gitelman, D. R., Parrish, T. B., Mesulam, M., et al. (1999). Neuroanatomic overlap of working memory and spatial attention networks: a functional mri comparison within subjects. *Neuroimage*, *10*(6), 695-704.
- Labbett, S., & Langham, M. (2006). *What do drivers do at junctions?* (Rapport technique). Paper given at 71st RoSPA Road Safety Congress, Blackpool.
- Land, M. (2004). Eye movements in daily life. In L. Chalupa & J. Werner (Eds.), *The visual neurosciences* (pp. 1357-1368). Cambridge, MA: MIT.
- Land, M., Mennie, N., & Rusted, J. (1999). The roles of vision and eye movements in the control of activities of daily living. *Perception*, *28*, 1311-1328.
- Land, M., & Tatler, B. (2009). Driving. In M. Land & B. Tatler (Eds.), *Looking and acting: vision and eye movements in natural behaviour* (pp. 117-141). New York : Oxford University Press.
- Land, M. F., & Furneaux, S. (1997). The knowledge base of the oculomotor system. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, *352*(1358), 1231-1239.
- Land, M. F., & Horwood, J. (1995). Which parts of the road guide steering? *Nature*, *377*, 339-340.

- Land, M. F., & Lee, D. N. (1994, Juin). Where we look when we steer? *Nature*, *369*, 742–744.
- Land, M. F., & McLeod, P. (2000). From eye movements to actions: how batsmen hit the ball. *Nature neuroscience*, *3*(12), 1340–1345.
- Lappe, M., Bremmer, F., & Berg, A. van den. (1999). Perception of self-motion from visual flow. *Trends in Cognitive Science*, *3*, 329–336.
- Lappi, O. (2014). Future path and tangent point models in the visual control of locomotion in curve driving. *Journal of Vision*, *14*(12), 21.
- Laubrock, J., Engbert, R., & Kliegl, R. (2005). Microsaccade dynamics during covert attention. *Vision research*, *45*(6), 721–730.
- Le Meur, O., & Baccino, T. (2013). Methods for comparing scanpaths and saliency maps: Strengths and weaknesses. *Behavior research methods*, *45*(1), 251–266.
- Le Meur, O., Le Callet, P., Barba, D., & Thoreau, D. (2006). A coherent computational approach to model bottom-up visual attention. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *28*(5), 802–817.
- Lemonnier, S., Brémond, R., & Baccino, T. (2014). Discriminating cognitive processes with eye movements in a decision-making driving task. *Journal of Eye Movement Research*, *7*(4), 14p.
- Lemonnier, S., Brémond, R., & Baccino, T. (2015). Gaze behavior when approaching an intersection: Dwell time distribution and comparison with a quantitative prediction. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*.
- Li, W., Pich, V., & Gilbert, C. (2004). Perceptual learning and top-down influences in primary visual cortex. *Nature Neuroscience*, *7*(6), 651–657.
- Liversedge, S., & Findlay, J. (2000). Saccadic eye movements and cognition. *Trends in Cognitive Science*, *4*, 6–14.
- Louveton, N., Bootsma, R. J., Guerin, P., Berthelon, C., & Montagne, G. (2012). Intersection crossing considered as intercepting a moving traffic gap: Effects of task and environmental constraints. *Acta psychologica*, *141*(3), 287–294.
- Majaranta, P., & Riih , K.-J. (2002). Twenty years of eye typing: systems and design issues. In *Proceedings of the 2002 symposium on eye tracking research & applications* (pp. 15–22).
- Manning, D., Gale, A., & Krupinski, E. (2014). Perception research in medical imaging. *The British journal of radiology*.
- Manser, M., & Hancock, P. (1996). Influence of approach angle on estimates of time-to-contact. *Ecological Psychology*, *8*(1), 71–99.

- Mars, F., & Navarro, J. (2012). Where we look when we drive with or without active steering wheel control. *PLoS ONE* 7(8) e43858.
- Martinez-Conde, S., Macknik, S. L., & Hubel, D. H. (2004). The role of fixational eye movements in visual perception. *Nature Reviews Neuroscience*, 5(3), 229–240.
- Maule, A. J., Hockey, G. R. J., & Bdzola, L. (2000). Effects of time-pressure on decision-making under uncertainty: changes in affective state and information processing strategy. *Acta psychologica*, 104(3), 283–301.
- McCallum, A. K. (1996). *Reinforcement learning with selective perception and hidden state*. Thèse de doctorat non publiée, University of Rochester.
- McCarley, J. S., Vais, M. J., Pringle, H., Kramer, A. F., Irwin, D. E., & Strayer, D. L. (2004). Conversation disrupts change detection in complex traffic scenes. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 46(3), 424–436.
- McLeod, R. W., & Ross, H. E. (1983). Optic-flow and cognitive factors in time-to-collision estimates. *Perception*, 12(4), 417–423.
- Michon, J. (1985). A critical view of driver behavior models. What do we know, what should we do? In L. Evans & R. Schwing (Eds.), *Human behavior and traffic safety* (p. 485-521). NY : Plenum Press.
- Milgram, S. (1963). Behavioral study of obedience. *The Journal of Abnormal and Social Psychology*, 67(4), 371.
- Mishkin, M., Ungerleider, L. G., & Macko, K. A. (1983). Object vision and spatial vision: two cortical pathways. *Trends in neurosciences*, 6, 414–417.
- Moray, N. (1986). *Monitoring behavior and supervisory control* (. J. T. E. H. o. p. K. R. Boff L. Kaufman & V. I. performance, Eds.). New York: John Wiley & Sons.
- Näätänen, R., & Summala, H. (1974). A model for the role of motivational factors in drivers decision making. *Accident Analysis & Prevention*, 6, 243–261.
- Najemnik, J., & Geisler, W. S. (2005). Optimal eye movement strategies in visual search. *Nature*, 434(7031), 387–391.
- Navalpakkam, V., & Itti, L. (2005). Modeling the influence of task on attention. *Vision research*, 45(2), 205–231.
- Navalpakkam, V., & Itti, L. (2006). An integrated model of top-down and bottom-up attention for optimizing detection speed. In *Ieee trans. on computer vision and pattern recognition* (Vol. 2, pp. 2049–2056).

- Nenkov, G. Y., & Gollwitzer, P. M. (2012). Pre- versus postdecisional deliberation and goal commitment: The positive effects of defensiveness. *Journal of Experimental Social Psychology*, *48*(1), 106-121.
- Nyström, M., & Holmqvist, K. (2008). Semantic override of low-level features in image viewing : Both initially and overall. *Journal of Eye Movement Research*, *2*(2), 1-11.
- ONISR. (2012). *La sécurité routière en france. bilan de l'année 2011*. La documentation Française, Paris.
- Otero-Millan, J., Macknik, S. L., Langston, R. E., & Martinez-Conde, S. (2013). An oculomotor continuum from exploration to fixation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *110*(15), 6175–6180.
- Owsley, C., & McGwin Jr, G. (2010). Vision and driving. *Vision research*, *50*(23), 2348–2361.
- Paletta, L., Fritz, G., & Seifert, C. (2005). Q-learning of sequential attention for visual object recognition from informative local descriptors. In *Proceedings of the 22nd international conference on machine learning* (pp. 649–656).
- Patla, A., & Goodale, M. (1997). Visuomotor transformation required for obstacle avoidance during locomotion is unaffected in a patient with visual form agnosia. *NeuroReport*, *8*, 165–168.
- Perrin, J.-L., Paillé, D., & Baccino, T. (2014). Reading tilted: Does the use of tablets impact performance? an oculometric study. *Computers in Human Behavior*, *39*, 339–345.
- Pieters, R. (2008). A review of eye-tracking research in marketing. *Review of marketing research*, *4*, 123–147.
- Posner, M., & Cohen, Y. (1984). Components of attention. In H. Bouma & D. Bowhuis (Eds.), *Attention and performance x* (p. 531-556). Hillsdale NJ : Lawrence Erlbaum Associates.
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *32*(1), 3–25.
- Ramström, O., & Christensen, H. I. (2002). Visual attention using game theory. In *Biologically motivated computer vision* (pp. 462–471).
- Rao, R. P., Zelinsky, G. J., Hayhoe, M. M., & Ballard, D. H. (2002). Eye movements in iconic visual search. *Vision research*, *42*(11), 1447–1463.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge: signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, *13*(3), 257-266.

- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological bulletin*, 124(3), 372.
- Rothkopf, C. A., Ballard, D. H., & Hayhoe, M. M. (2007). Task and context determine where you look. *Journal of Vision*, 7(14), 1-20.
- Rumar, K. (1985). The role of perceptual and cognitive filters in observed behavior. In *Human behavior and traffic safety* (pp. 151–170). Springer.
- Sabey, B., & Staughton, G. (1975). Interacting roles of road environment vehicle and road user in accidents. In *Ceste i mostovi* (Vol. 21).
- Salvucci, D. D. (2006). Modeling driver behavior in a cognitive architecture. *Human Factors*, 48(2), 362–380.
- Salvucci, D. D., & Goldberg, J. H. (2000). Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols. In *Proceedings of the 2000 symposium on eye tracking research & applications* (pp. 71–78).
- Salvucci, D. D., & Gray, R. (2004). A two-point visual control model of steering. *Perception-London*, 33(10), 1233–1248.
- Senders, J. W. (1964). The human operator as a monitor and controller of multidegree of freedom systems. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*(1), 2–5.
- Senders, J. W. (1966). A re-analysis of the pilot eye-movement data. *IEEE Trans. on Human Factors in Electronics*, 7(2), 103–106.
- Sheridan, T. (1970). On how often the supervisor should sample. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 2(6), 140–145.
- Sheridan, T. B., & Rouse, W. B. (1972). Supervisory sampling and control: sources of suboptimality in a prediction. In *Seventh annual conference on manual control* (p. 81).
- Shinar, D. (2007). *Traffic safety and human behavior*. Emerald Group Publishing Limited.
- Sivak, M. (1996). The information that drivers use: is it indeed 90% visual ? *Perception*, 25, 1081-1089.
- Smallwood, R. D. (1967). Internal models and the human instrument monitor. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*(3), 181–187.
- Sparks, D. L. (2002). The brainstem control of saccadic eye movements. *Nature Reviews Neuroscience*, 3(12), 952–964.
- Sprague, N., & Ballard, D. (2003). Eye movements for reward maximization. In *Advances in neural information processing systems* (Vol. 16). MIT-Press.

- Sprague, N., Ballard, D., & Robinson, A. L. (2007). Modeling embodied visual behaviors. *ACM Trans. Applied Perception*, 4(2), 1-25.
- Stampe, D. M. (1993). Heuristic filtering and reliable calibration methods for video-based pupil-tracking systems. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 25(2), 137-142.
- Strayer, D. L., Drews, F. A., & Johnston, W. A. (2003). Cell phone-induced failures of visual attention during simulated driving. *Journal of experimental psychology: Applied*, 9(1), 23.
- Summerfield, C., & Egner, T. (2009). Expectation (and attention) in visual cognition. *Trends in Cognitive Science*, 13(9), 403-409.
- Summerfield, C., Tsetsos, K., Van Maanen, L., Dreher, J.-C., & Ruff, C. (2012). Building bridges between perceptual and economic decision-making: neural and computational mechanisms. *Frontiers in neuroscience*, 6(70), 1-20.
- Svenson, O. (1992). Differentiation and consolidation theory of human decision making: A frame of reference for the study of pre-and post-decision processes. *Acta Psychologica*, 80(1), 143-168.
- Svenson, O., Salo, I., & Lindholm, T. (2009). Post-decision consolidation and distortion of facts. *Judgment and decision making*, 4(5), 397-407.
- Tatler, B. (2012). Eye guidance in natural vision. In *Perception* (Vol. 41, pp. 13-13).
- Tatler, B. W., Baddeley, R. J., & Gilchrist, I. D. (2005). Visual correlates of fixation selection: effects of scale and time. *Vision Research*, 45(5), 643 - 659.
- Torralba, A., Oliva, A., Castelhamo, M. S., & Henderson, J. M. (2006). Contextual guidance of eye movements and attention in real-world scenes: the role of global features in object search. *Psychological review*, 113(4), 766.
- Treat, J. R., Tumbas, N., McDonald, S., Shinar, D., & Hume, R. (1979). *Tri-level study of the causes of traffic accidents, executive summary* (Rapport technique).
- Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 12, 97-136.
- Trick, L. M., Enns, J. T., Mills, J., & Vavrik, J. (2004). Paying attention behind the wheel: a framework for studying the role of attention in driving. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 5(5), 385-424.
- Tsai, Y.-F., Viirre, E., Strychacz, C., Chase, B., & Jung, T.-P. (2007). Task performance and eye activity: predicting behavior relating to cognitive workload. *Aviation, space, and environmental medicine*, 78(Supplement 1), B176-B185.

- Tulga, M. K., & Sheridan, T. B. (1980). Dynamic decisions and work load in multitask supervisory control. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, *10*(5), 217–232.
- Underwood, G., Chapman, P., Bowden, K., & Crundall, D. (2002). Visual search while driving: skill and awareness during inspection of the scene. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *5*(2), 87–97.
- Underwood, G., Chapman, P., Brocklehurst, N., Underwood, J., & Crundall, D. (2003). Visual attention while driving: sequences of eye fixations made by experienced and novice drivers. *Ergonomics*, *46*(6), 629–646.
- Underwood, G., Crundall, D., & Chapman, P. (2011). Driving simulator validation with hazard perception. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, *14*(6), 435–446.
- Underwood, G., Phelps, N., Wright, C., Van Loon, E., & Galpin, A. (2005). Eye fixation scanpaths of younger and older drivers in a hazard perception task. *Ophthalmic and Physiological Optics*, *25*(4), 346–356.
- Utter, D. (2001). *Passenger vehicle driver cell phone use results from the fall 2000 national occupant protection use survey*. US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration.
- Van Essen, D. C., Anderson, C. H., & Felleman, D. J. (1992). Information processing in the primate visual system: an integrated systems perspective. *Science*, *255*(5043), 419–423.
- Vapnik, V. (1995). *The nature of statistical learning theory*.
- Walker, L. L., & Malik, J. (2002). When is scene recognition just texture recognition. *Journal of Vision*, *2*(7), 255.
- Wallis, G., Chatziastros, A., Tresilian, J., & Tomasevic, N. (2007). The role of visual and nonvisual feedback in a vehicle steering task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *33*(5), 1127.
- Warren, W. H., & Fajen, B. R. (2004). 14. from optic flow to laws of control. *Optic flow and beyond*, *324*, 307.
- Weaver, H. E. (1943). Studies of ocular behavior in music reading. *Psychological Monographs*, *55*(1), i.
- Weidner, R., Pollmann, S., Müller, H. J., & Cramon, D. Y. von. (2002). Top-down controlled visual dimension weighting: An event-related fmri study. *Cerebral Cortex*, *12*(3), 318–328.

- Werneke, J., & Vollrath, M. (2012). What does the driver look at? the influence of intersection characteristics on attention allocation and driving behavior. *Accident Analysis & Prevention*, *45*, 610-619.
- WHO. (2013). *Who global status report on road safety 2013: supporting a decade of action*. World Health Organization.
- Wickens, C. D., Goh, J., Helleberg, J., Horrey, W. J., & Talleur, D. A. (2003). Attentional models of multitask pilot performance using advanced display technology. *Human Factors*, *45*(3), 360-380.
- Wickens, C. D., Gutzwiller, R. S., & Santamaria, A. (2015). Discrete task switching in overload: A meta-analysis and a model. *International Journal of Human-Computer Studies*, *79*, 79-84.
- Wickens, C. D., Helleberg, J., Goh, J., Xu, X., & Horrey, W. J. (2001). *Pilot task management: Testing an attentional expected value model of visual scanning* (Rapport technique). Aviation Research Lab.
- Wolfe, J. M. (1994). Guided search 2.0: A revised model of visual search. *Psychonomic Bulletin Review*, *1*(2), 202-238.
- Wolfe, J. M. (2003). Moving towards solutions to some enduring controversies in visual search. *Trends in cognitive sciences*, *7*(2), 70-76.
- Wolfe, J. M., & Horowitz, T. S. (2004). What attributes guide the deployment of visual attention and how do they do it? *Nature Reviews Neuroscience*, *5*, 1-7.
- Wolfe, J. M., Horowitz, T. S., Palmer, E. M., Michod, K. O., & Van Wert, M. J. (2010). Getting into guided search. In V. Coltheart (Ed.), *Tutorials in visual cognition* (pp. 93-119). Sydney : Psychology Press, Taylor and Francis Group.
- Yarbus, A. L. (1967). *Eye movements and vision*. New York : Plenum.
- Zelinsky, G. J. (2008). A theory of eye movements during target acquisition. *Psychological Review*, *115*(4), 787 - 835.
- Zomeran, A. H., & Brouwer, W. H. (1994). *Clinical neuropsychology of attention*. Oxford University Press.

Publications effectuées pendant la thèse

Articles de revues internationales (avec comité de lecture)

- Lemonnier, S., Brémond, R., & Baccino, T., (2015). Gaze behavior when approaching an intersection: Dwell time distribution and comparison with a quantitative prediction. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 35, 60-74.
- Lemonnier, S., Brémond, R., & Baccino, T. (2014). Discriminating cognitive processes with eye movements in a decision-making driving task. *Journal of Eye Movement Research*, 7(4), 1-14.
- Bernardin, F., Brémond, R., Ledoux, V., Pinto, M., Lemonnier, S., Cavallo, V., & Colomb, M. (2014). Measuring the effect of the rainfall on the windshield in terms of visual performance. *Accident Analysis & Prevention*, 63, 83-88.

Communications

Conférences internationales (avec comité de lecture)

- Brémond, R., Auberlet, JM., Cavallo, V., Désiré, L., Faure, V., Lemonnier, S., Lobjois, R., & Tarel, JP. *Where we look when we drive : A multidisciplinary approach*. In proceeding, Transport Research Arena, Paris, France, avril 2014 (présentation orale).
- Bernardin, F., Colomb, M., Brémond, R., Pinto, M., Cavallo, V., Lemonnier, S., & Ledoux, V. *Reduction of visibility under rain conditions*. Transport Research Arena, Paris, France, avril 2014 (poster).
- Lemonnier, S., Brémond, R. & Baccino, T. *Visual attention in a complex task : Discrimination of decisional processes with eyes movement patterns*. 17th European Conference on Eye Movements, Lund, Suède, août 2013 (présentation orale).

Communications orales (avec comité de sélection)

- Lemonnier, S., Boubezoul, A., Brémond, R. & Baccino, T. *Apport des classificateurs pour l'analyse des mouvements oculaires en situation dynamique*. In proceeding, Eye tracking, Regard, Interaction et Suppléances, Paris, France, juin 2014 (présentation orale).
- Lemonnier, S., Brémond, R. & Baccino, T. *Using gaze patterns to distinguish top-down cognitive sub-processes: The case of the driving task*. European Summer School on Eye Movements, Bonn, Allemagne, septembre 2013 (poster).
- Lemonnier, S., Brémond, R., Baccino, T., & Désiré, L. *Validation of a visual attention model in a driving field test: Difficulties and benefits*. First IAAP School on Applied Cognitive Research, Paris, France, avril 2013 (présentation orale).

- Lemonnier, S., Brémond, R. & Baccino, T. *To what extent visual search depends on the task? The role of attention.* 6ème forum du GDR-Vision, I.N.T. Marseille, France, novembre 2012 (poster).

Annexes

Les différents mouvement des yeux

Une classification rependues catégorisent les mouvements des yeux en trois types de mouvement pour le chargement (*gaze shifting*) et deux types de mouvement pour le maintien (*gaze holding*) que nous détaillons ci-dessous ([Sparks, 2002](#)).

- Les mouvements pour le changement :
 - Les mouvements saccadiques permettent d'amener la fovéa sur la cible, donc de changer de point de fixation ;
 - Les mouvements de poursuite lisse permettent de suivre une cible en mouvement ;
 - Les mouvements de vergence permettent d'ajuster la position des yeux à la localisation en profondeur de la cible ;
- Les mouvements pour le maintien :
 - Les réflexes vestibulo-oculaires permettent de maintenir le regard sur une cible alors que la tête, ou l'ensemble du corps effectuent une rotation ou une translation ;
 - Les réflexes optocinétiques permettent de compenser un mouvement de l'ensemble de l'environnement visuel.

Concernant les fixations, il ne s'agit pas à proprement parlé d'un mouvement oculaire mais de la position du regard lorsque les yeux ne bougent pas, donc en l'absence des mouvements décrits précédemment. Dans cette classification, les fixations sont donc une catégorie à part entière au même titre que les mouvement pour le changement et pour le maintien. Cependant, les fixations ne correspondent pas non plus à une immobilité du regard puisque les yeux décrivent de micro-mouvements durant les fixations. Ces micro-mouvements sont réparties en trois classes ([Martinez-Conde et al., 2004](#)) :

- les micro-saccades (qui se distinguent des saccades seulement par leur faible amplitude),
- les dérives,
- les tremblements.

Ces petits mouvements permettent entre autre de récupérer plus d'information visuelle dans la zone fixée, du fait de la vision fovéale, détaillée et en couleur, restreinte

à quelques degrés, et de la répartition des champs récepteurs des neurones. L'existence des fixations en tant que telle est donc discuté dans la littérature, puisque elles peuvent être considérée comme appartenant à un continuum entre les micro-saccades et les saccades ([Otero-Millan et al., 2013](#)). Cette question constitue un champs de recherche à part entière. Dans ce travail de thèse, nous considérons les fixations en opposition aux saccades, et nous ne parlons pas des micro-mouvements, trop petits pour être captés par les oculomètres utilisés.

Appendix **B**

Résolution non-homogène de l'œil

La rétine est tapissée de photorécepteurs permettant de recueillir l'information visuelle afin de l'envoyer dans le cortex cérébral. Ces photorécepteurs sont majoritairement constitués de deux types : les cônes et les bâtonnets. Les cônes représentent environ 5% des photorécepteurs et se situent principalement au niveau de la fovéa (voir Figure B.1, à droite). Ils recueillent une information détaillée et en couleur. Les bâtonnets représentent environ 95% des photorécepteurs et se situent au niveau de la péri-fovéa (plus on s'éloigne de la fovéa, et moins on trouve de cônes, en faveur des bâtonnets ; voir la partie gauche de la Figure B.1). Ils recueillent une information en noir et blanc peu détaillée et sont sensibles au mouvement.

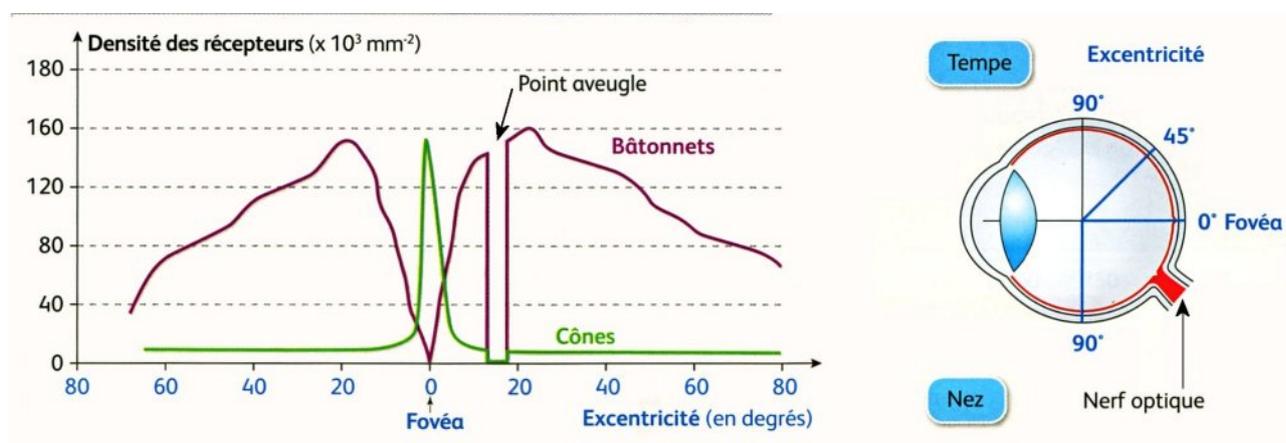


Figure B.1.: A gauche : Densité des cônes et des bâtonnets en fonction de l'excentricité par rapport à la fovéa. A droite : Coupe horizontale schématique d'un œil.

Les voies visuelles

L'information visuelle captée par la rétine est envoyée au cortex cérébral afin d'y être traitée. La Figure C.1 représente schématiquement comment cette information reçue initialement dans V1 (cortex visuel primaire) emprunte ensuite deux voies visuelles conduisant à deux types de traitement (Mishkin et al., 1983). La voie dorsale conduit l'information dans V5 (cortex pariétal) qui traite la localisation et le mouvement d'un objet. Elle permet de répondre à la question du "Où". La voie ventrale conduit l'information dans V4 (cortex inféro-temporal) qui permet la reconnaissance de l'objet. Elle permet de répondre à la question du "Quoi". Ce modèle des deux voies visuelles peut être également rapproché des deux voies magnocellulaire et parvocellulaire, décrites notamment par Van Essen et al. (1992), plus proches de la neuroanatomie car reposant sur une dichotomie fonctionnelle, sur la nature des fibres neuronales constituant chacune de ces voies. La voie magnocellulaire transporte des informations visuelles en basse fréquence et en noir et blanc, et est rapide. Elle se rapproche de la voie dorsale. La voie parvocellulaire transporte des informations en haute fréquence et en couleur, et est plus lente (20 ms). Elle se rapproche de la voie dorsale.

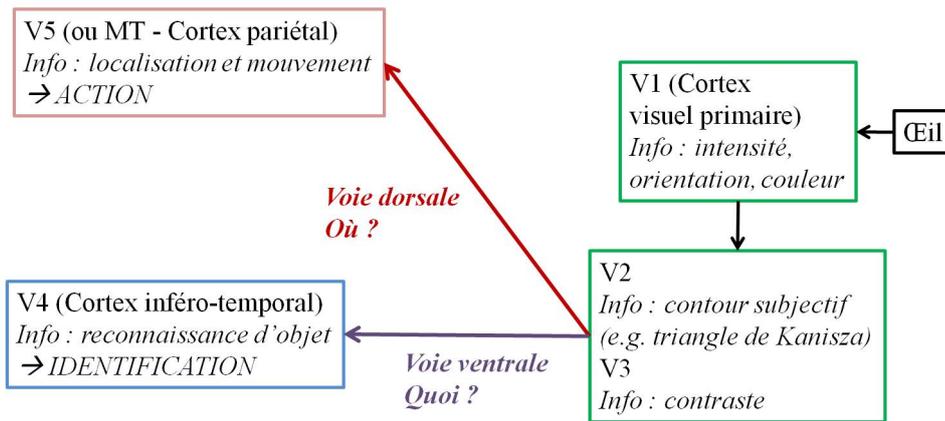
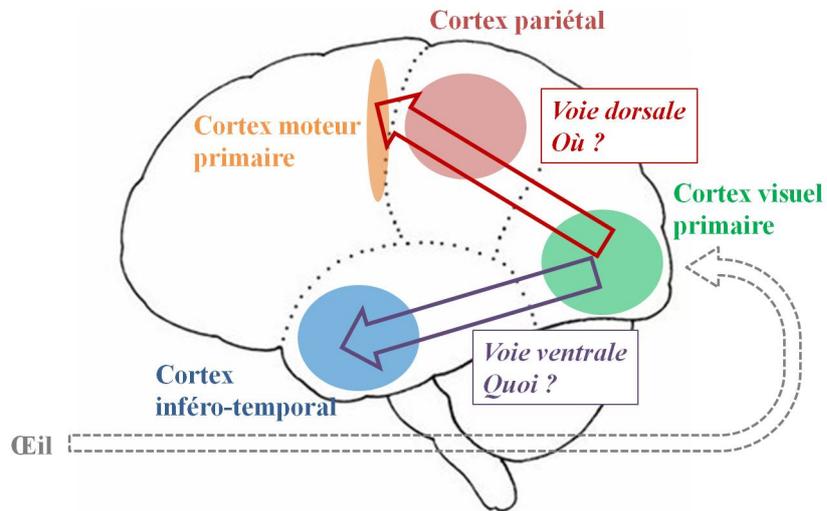


Figure C.1.: Les voies visuelles dorsale et ventrale, et les principales aires corticales par lesquelles elles passent. MT : *Middle Temporal* ; Info : principales informations traitées par les aires associées.

Calcul des fixations (algorithme SMI)

Les données brutes étaient exprimées en coordonnées d'écran. Les fixations ont été calculées avec un algorithme basé sur la dispersion dont les paramètres sont : 80 ms pour la durée minimum de fixation et 100 pixels pour la dispersion maximale. Les saccades ont été tirées de ces fixations. Nous allons détailler l'algorithme basé sur les fixations, utilisé initialement par [Stampe \(1993\)](#), qui est particulièrement adapté pour les données issues d'un oculomètres à basse vitesse. L'algorithme identifie les fixations comme des groupes de points consécutifs dans une dispersion particulier. Il utilise une fenêtre mobile qui couvre des données consécutives de points de vérification pour les fixations potentielles. La fenêtre mobile commence au début du protocole et couvre initialement un nombre minimum de points, déterminé par la durée minimum d'une fixation définie par ailleurs (80 ms) et la fréquence d'échantillonnage. L'algorithme vérifie ensuite la dispersion des points dans la fenêtre en additionnant les différences entre le maximum et le minimum de points pour x et pour y. Autrement dit, la dispersion D s'exprime comme suit :

$$D = [\max(x) - \min(x)] + [\max(y) - \min(y)]. \quad (\text{D.1})$$

Si la dispersion est supérieure à la valeur maximale de dispersion (100 pix.), la fenêtre ne représente pas une fixation et se déplace d'un point vers la droite. Si la dispersion est en dessous de la valeur maximale de dispersion, la fenêtre représente une fixation. Dans ce cas, la fenêtre est élargie vers la droite jusqu'à ce que la dispersion de la fenêtre passe au dessus du seuil. La dernière fenêtre est enregistrée comme étant une fixation, celle-ci étant située au niveau du centre de gravité des points de la fenêtre associée et sa durée correspond à celle de la fenêtre.

La valeur du seuil de dispersion à 100 pixels est sélectionnée en se basant sur les caractéristiques physiologiques lors d'une tâche particulière (les vitesse d'une saccade pouvant aller jusqu'à 500°/sec.) et sur le taux d'échantillonnage du suivi oculaire (30Hz). Pour la dispersion maximale, il a été montré que le meilleur compromis (même si une variabilité individuelle est possible) est d'environ 100 pixels. ([Salvucci & Goldberg, 2000](#); [Hoffman et al., 2013](#)).

Appendix **E**

Étude en simulateur : la position de la pré-décision

Le test de Newman-Keuls, utilisé afin d'estimer la position de la pré-décision dans la condition cédez le passage, a donné les résultats présentés dans la Figure E.1 couplant ceux observés pour la pression sur la pédale d'accélération et de frein.

Classes de	150	135	120	105	90	75	60	45	30	15
Position	-135	-120	-105	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0
150-135		<i>.474</i>	<i>.420</i>	<i>.141</i>	★	★	★	★	★	★
135-120	<i>.874</i>		<i>.843</i>	<i>.711</i>	<i>.013</i>	★	★	★	★	★
120-105	<i>.940</i>	<i>.909</i>		<i>.856</i>	<i>.045</i>	★	★	★	★	★
105-90	<i>.932</i>	<i>.843</i>	<i>.828</i>		<i>.059</i>	★	★	★	★	★
90-75	<i>.610</i>	<i>.782</i>	<i>.815</i>	<i>.822</i>		<i>.012</i>	★	★	★	★
75-60	<i>.498</i>	<i>.572</i>	<i>.531</i>	<i>.574</i>	<i>.538</i>		<i>.041</i>	<i>.080</i>	<i>.001</i>	★
60-45	<i>.025</i>	<i>.025</i>	<i>.013</i>	<i>.019</i>	<i>.055</i>	<i>.092</i>		<i>.919</i>	<i>.216</i>	<i>.001</i>
45-30	★	★	★	★	★	★	★		<i>.116</i>	★
30-15	★	★	★	★	★	★	★	★		<i>.024</i>
15-0	★	★	★	★	★	★	★	★	★	

Table E.1.: Le test de Newman-Keuls (les valeurs p) comparant une à une chaque paire de classes de position de 15 mètres pour la condition cédez le passage. En italique : les données concernant la pédale d'accélération. En non-italique : les données concernant la pédale de frein. Les étoiles (★) indiquent un $p < .001$.

Étude en simulateur : l'interaction Position × Situation

Une ANOVA a été conduite sur les moyennes (F1) et les pentes (F2) des amplitudes de saccade et des durées de fixation afin de tester l'effet d'interaction entre les facteurs de Situation (CP-NoGo, CP-Go, Stop et Prioritaire) et de Position (Avant et Après)

Un effet significatif de la Situation a été observé pour les amplitudes de saccade, $F1(3,99) = 21.38$, $MSE = 0.008$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.393$; $F2(3,99) = 77.33$, $MSE = 0.155$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.701$. Pour la Position, un effet significatif a été observé pour les valeurs des moyennes, et un effet marginal non-significatif pour les valeurs des pentes, $F1(1,33) = 6.95$, $MSE = 0.009$, $p = 0.013$, $\eta^2 = 0.174$; $F2(1,33) = 4.05$, $MSE = 0.205$, $p = 0.052$. Un effet d'interaction significative a été observée pour chacune des valeurs, $F1(3,99) = 16.61$, $MSE = 0.005$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.335$; $F2(3,99) = 83.85$, $MSE = 0.129$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.718$.

Un effet significatif de la Situation a également été observé pour les durées de fixation, $F1(3,99) = 32.42$, $MSE = 0.001$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.496$; $F2(3,99) = 15.04$, $MSE = 0.019$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.313$. Pour la Position, un effet significatif a été observé pour les valeurs des moyennes mais pas pour les valeurs des pentes $F1(1,33) = 7.54$, $MSE = 0.001$, $p = 0.010$, $\eta^2 = 0.186$; $F2(1,33) = 1.19$, $MSE = 0.028$. Une interaction significative a été observée pour chacune des valeurs, $F1(3,99) = 12.47$, $MSE = 0.001$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.274$; $F2(3,99) = 24.49$, $MSE = 0.025$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.426$.

Une différence significative a été observée pour les conditions de cédez le passage (CP-NoGo et CP-Go) pour les valeurs des moyennes (pas pour les valeurs des pentes) dans la section Avant pour les amplitudes de saccade et les durées de fixation. Cet effet n'était pas attendu et nécessitait d'être approfondi. Nous avons trouvés que cet effet est dû à la condition Intermédiaire de densité de trafic. Sans ces essais, un test-*t* de Student a été conduit afin de comparer les conditions CP-Go et CP-NoGo dans la section Avant, et s'est révélé non-significatif : $T(66) = -1.754$, $p = 0.436$, pour les amplitudes de saccade ; et $T(66) = -1.754$, $p = 0.909$, pour les durées de fixation.

Les essais avec une densité de trafic Intermédiaire sont ceux durant laquelle la

prose de décision est la plus complexe. En effet, dans la condition de densité de trafic Élevée, la décision de s'arrêter était souvent de s'arrêter, et dans la condition de densité de trafic Nulle, tous les participant sont passés sans s'arrêter. Une explication pourrait être que les participants deviennent rapidement conscients de la plus grande complexité de cette condition Intermédiaire, et en fonction de leurs compétences, certain participant ont peut-être choisi de reporter leur pré-décision. Ainsi, leur exploration visuelle aurait été réduite, comme cela a été observé pour les amplitudes de saccade et des durées de fixation. Néanmoins, il est intéressant de noter que malgré la complexité accrue de cette tâche, les résultats sont conformes à nos principales hypothèses, soulignant ainsi leur robustesse.

Étude en situation réelle : le choix des zones

Pour construire un circuit passant par des carrefours en croix avec différentes règles de priorité, la première étape fut de sélectionner sur Google Map un grand nombre de carrefours potentiels situés dans les environs de Saint Briec, puisque le laboratoire DLSB était le point de départ et d'arrivée de l'expérience. Nous nous sommes ensuite déplacé sur place afin de ne conserver que les carrefours répondant à un certain nombre de critères souvent liés à l'environnement rural des alentours de Saint Briec (e.g. qu'il n'y ait pas un des quatre axes du carrefour qui soit trop petit, un chemin de terre, une voie privée, que la visibilité soit relativement bonne en amont du carrefour, qu'il soit facile d'accès, qu'il n'y ait pas de travaux).

L'ensemble des carrefours sélectionnés ont ensuite été entrés dans le logiciel INT Converter (version 1.79). Ce logiciel permet de déterminer des itinéraires par portion. Il est possible d'entrer un certain nombre de points géolocalisés par lesquels l'itinéraire doit passer. Ainsi, les carrefours ont été entrés, et certains ont été éliminés. En effet, afin que l'expérimentation ne soit pas trop longue, les carrefours conservés étaient ceux regroupés dans une même zone géographique.

Appendix H

Étude en situation réelle : la vitesse

Les trois figures suivantes représentent les vitesses moyennes des participants pour chacun des carrefours croisés, répartis en fonction de leur règle de priorité. Ces carrefours sont labellisés avec leur numéro de passage détaillé dans la Table 5.1.

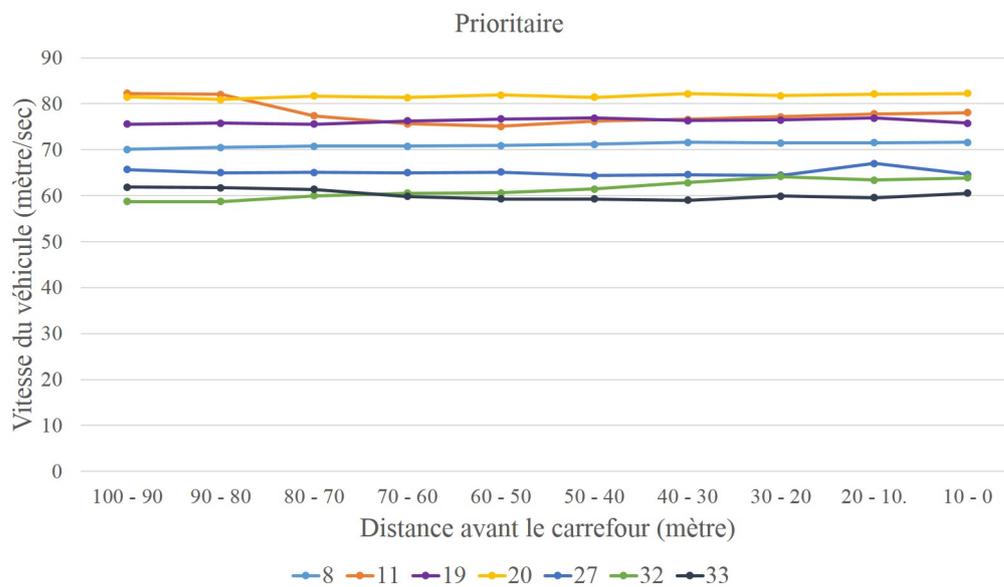


Figure H.1.: La vitesse moyenne des participants durant l'approche de carrefour pour chacun des sept carrefours en Prioritaire.

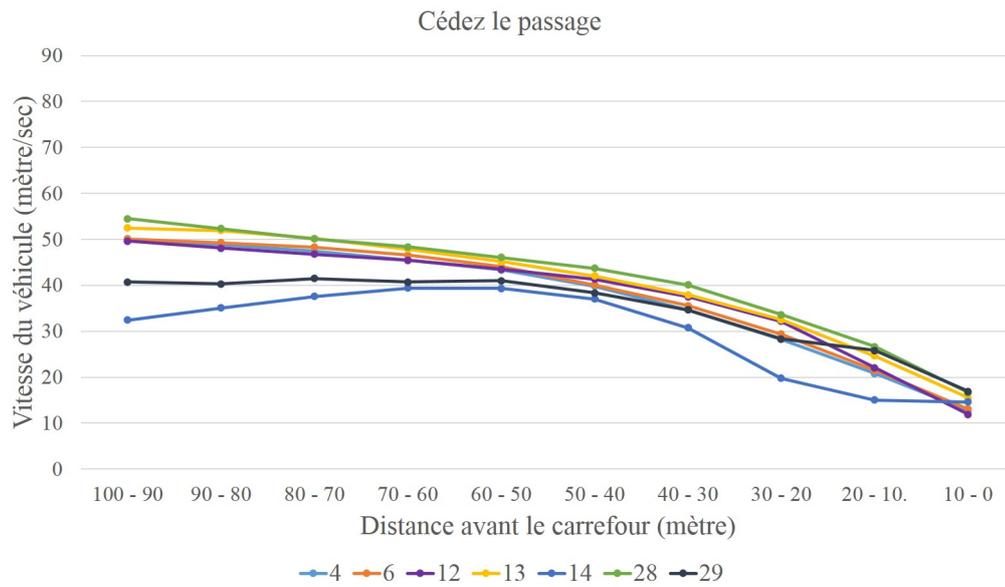


Figure H.2.: La vitesse moyenne des participants durant l'approche de carrefour pour chacun des sept carrefours en Cédés le passage.

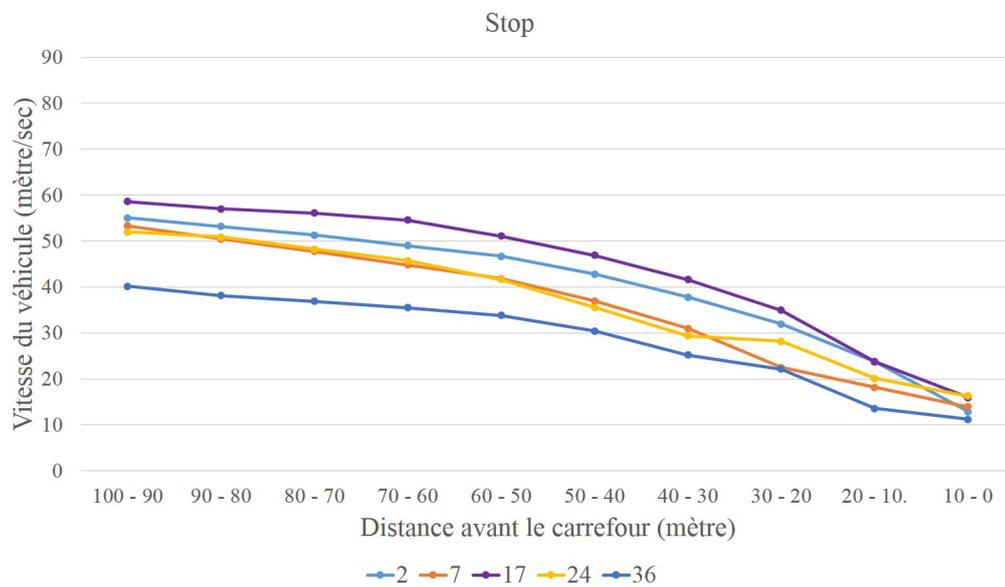


Figure H.3.: La vitesse moyenne des participants durant l'approche de carrefour pour chacun des cinq carrefours en Stop.